

# תופעות אנומליות בחוטים מוליכי-על ננו-מטריים של $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

חיבור לשם קבלת התואר יידוקטור לפילוסופיהיי

דניאל לוי

המחלקה לפיסיקה

הוגש לסנט של אוניברסיטת בר-אילן

אייר, תשעייד

רמת גן

פרופסור יוסף ישורון מהמחלקה לפיסיקה של אוניברסיטת בר-אילן

עבודה זו נעשתה בהדרכתו של

#### תודות

בראש ובראשונה ברצוני להוקיר תודה לפרופ' יוסי ישורון, ראש המעבדה, על שהנחה אותי במהלך עבודה זו. מעורבותו בכל שלבי העבודה, ששילבה מקצועיות ורגישות, עזרו לי להתמודד עם האתגרים שליוו אותי במהלך הדוקטורט.

תודה מיוחדת לפרופ' אבנר שאולוב, על הדרכתו ומעורבותו בחפץ לב במהלך המחקר, דרך הדיונים הרבים שהולידו תמיד תובנות חדשות.

לחברי המעבדה למוליכות-על, ד"ר שוקי וולפוס, ד"ר אלכס פרידמן, יאשה ניקולשין, ד"ר פאינה קופנסקי, אילן חכימי, פרופ' מיכאל בזילביץ', עומרי שרון ואלעד בר, על האווירה המדעית והחברתית והעזרה ההדדית לאורך כל תקופת המחקר.

לחברי במעבדה בעבר ובהווה, ד"ר דורון ברנס, ד"ר איליה סושניקוב ואלרן ברוך-אל על שיתוף הפעולה הפורה, הלמידה המשותפת והחברות הגדולה.

ברצוני להודות לחברי המעבדה של פרופ' ליאור קליין על העזרה הרבה בחשיפתי לעולם מדידות המעבר זרם.

לפרופ' אביעד פרידמן, פרופ' בוריס שפירא וד"ר עמוס שרוני על הפתיחות להתייעצויות שהועילו לי רבות.

למכון לננו-טכנולוגיה (BINA) ובפרט ליוסי אבולעפיה ומשה פלדברג.

מחקר זה נעשה בתמיכתם של הקרן הישראלית למדע (ISF) והפרוייקט הישראלי-גרמני לפיסיקה (DIP).

לאשתי היקרה, אסנתי, על הסבלנות והמסירות לי ולילדינו, שהעניקה לי תמיד רוח גבית חזקה, תודה.

## תוכן עניינים

1		תקציר
3	מבוא	- 1 פרק
7	. המערכת הניסיונית	פרק 2 –
7	YBa₂Cu₃O <sub>7-ō</sub> (YBCO) גידול שכבת	2.1
8	הכנת החוטים	2.2
11	מערכת המדידה	2.3
13	תוצאות ודיון	פרק 3 –
13	אפיון שכבת ה-YBCO – מעבר פאזה התנגדותי	3.1
15	מגנטו-התנגדות (magnetoresistance) של שכבת ה-YBCO	3.2
16	מעבר הפאזה נורמאלי–מוליך-על של חוטי YBCO	3.3
18	יהשפעת השדה המגנטי על מעבר הפאזה בחוטי YBCO	3.4
20	רקע מגנטו-התנגדותי של חוטי YBCO	3.5
21	רקע מגנטי בטמפרטורות גבוהות - דיון	3.6
24	רקע מגטי בטמפרטורות נמוכות - דיון	3.7
30	אוסילציות של ההתנגדות כתלות בשדה	3.8
39(p	eriodic negative magnetoresistance) מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית	3.9
45 אודל למגנטו-התנגדות שלילית; היווצרות של 0 ו- SQUIDs $\pi$ ב- ל $3.10$		
52	· סיכום ומסקנות	– 4 פרק
55	- רשימת מקורות	פרק 5 –
i	A	bstract

## רשימת פרסומים - דניאל לוי

#### 1. <u>Negative magnetoresistance slope in superconducting granular films</u>

B. Ya. Shapiro, I. Shapiro, <u>D. Levi</u>, A. Shaulov, and Y. Yeshurun
Physica C 501, 51 (2014).

# Transport properties of ultra-thin granular YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> nano bridges E. Bar, <u>D. Levi</u>, G. Koren, A. Shaulov, and Y. Yeshurun Physica C (invited, in print)

- Magnetoresistance anomalies in ultra-thin granular YBa2Cu3O7-δ bridges
   D. Levi, A. Shaulov, G. Koren, and Y. Yeshurun
   Physica C 495, 39 (2013).
- 4. Periodic negative magnetoresistance in granular YBa2Cu3O7-δ nano wires
   <u>D. Levi</u>, A. Shaulov, A. Frydman, G. Koren, B. Ya. Shapiro and Y.Yeshurun
   European Physics Letters 101, 67005 (2013).

## 5. Effects of dilute columnar defects on the vortex matter in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub> near the disorder-driven phase transition

<u>D. Levi</u>, A. Shaulov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun Physica C, 470, 496 (2010).

#### תקציר

ההתקדמות המרשימה בטכניקות של יצירת מבנים ננו-מטריים פתחה דלת למחקר בסיסי ויישומי של חוטים ננו-מטריים מוליכי-על מסוגים שונים. המחקר היישומי מכוון לשילוב חוטים מוליכי-על ננו-מטריים בהתקנים ומעגלים אלקטרונים עתידיים. המחקר הבסיסי עוסק בעיקר בהבנת מנגנוני הדיסיפציה מתחת לטמפרטורת המעבר, אשר מקורם בקריסה לוקאלית של פרמטר הסדר כתוצאה מפלקטואציות תרמיות ומנהור קוונטי מקרוסקופי.

העבודה הנוכחית מתמקדת בחקר המגנטו-התנגדות (YBCO) YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-6</sub> של מוליכי-על ננו-מטריים של YBCO (T<sub>c</sub>~90 K) (טמפרטורות מעבר T<sub>c</sub>~90 K) של YBCO) של YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-6</sub> של ננו-מטריים של T<sub>c</sub>~90 א משכבה דקה (T<sub>c</sub>~90 m) של ליתוגרפיה וחציבה ליצירת חוטים ברוחב של *nm* 500 – 80 משכבה דקה (10-20 nm) שגרפיה וחציבה ליצירת חוטים ברוחב של *nm* 500 – 80 משכבה דקה (10-20 nm) שגרפיה וחציבה ליצירת חוטים ברוחב של *nm* 500 – 90 משכבה דקה (10-20 nm) שגרפיה שגרפיה שגרפיה (10-20 nm) שגרפיה וחציבה ליצירת חוטים ברוחב של *nm* 500 *nm* שגודלה בשיטת גידול זו היא גרנולרית עם שגודלה בשיטת גידול זו היא גרנולרית עם העודלה בשיטת גידול זו היא גרנולרית עם העודלה גרגירים של 15-30 nm (נומטר. מדדנו את תכונות התובלה של החוטים כתלות בטמפרטורה ושדה מגנטי חיצוני בתחומים של 4-300 k ו-5 ד ל-2, בהתאמה. מדידות אלה הראו שורה של תופעות יייחודיות אשר אינן קיימות בשכבות דקות או דגמים נפחיים של YBCO אלה הראו שורה של תופעות יייחודיות אשר אינן קיימות בשכבות דקות או דגמים נפחיים של YBCO אלה הראו שורה של תופעות אנומליות אלה מגנטי חיצוני בתחומים של 10-30 k ו-2 לב, בהתאמה. מדידות אלה הראו שורה של תופעות יייחודיות אשר אינן קיימות בשכבות דקות או דגמים נפחיים של YBCO אלה מענותליות אלה ייחודיות אשר אינן קיימות בשכבות דקות או דגמים נפחיים של YBCO אלה אלה הראו שורה של תופעות אנומליות אלה ייחודיות אשר אינן קיימות בשכבות דקות או דגמים נפחיים של אליק לפי שנמדד על ידי ההתנגדות כפונקציה של הסמפרטורה (גדות כתלות בשדה חיצוני בכל תחומי השדות בהם השתמשנו (עד 51) ובתחום כפונקציות של ההתנגדות כתלות בעלות העל בשדות גבוהים (בתחום של הספילציות) הבאה לידי ביטוי בירידה של ההתנגדות עם העלייה בשדה ((K = 1) > R(H = 0) > R(H = 0)) בשדות נמוכים (ל) מגנטו-התנגדות מעם העלייה ((K = 10) > R(H = 0)).

אנו מייחסים אנומליות אלה לשילוב שבין הגיאומטריה של הדגם, המבנה הגרנולרי שלו, אנו מייחסים אנומליות אלה לשילוב שבין הגיאומטריה של הדגם, המבנה הגרנולרי שלו ותכונותיו של ה-YBCO כמוליך-על עם פרמטר סדר בעל סימטרית מייצר מעין מערך של צמתי ג׳וזפסון בין גרגירים סמוכים. חוליות חלשות במערך זה רגישות מאד לפלקטואציות תרמיות מה שגורם להתרחבות של המעבר. כאשר מדובר בעובי חוט מסדר גודל של גרגיר (עשרות ננו-מטרים), נוצרים חללים בדגם אשר עם הפעלת שדה מגנטי מתפתחות סביבם לולאות זרם קוהרנטיות בפאזה. לולאות אלה הן המקור לאוסילציות של ההתנגדות. מציאות של צמתי-π בלולאות כאלה מייצרות מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית. התגברות המוליכות בטווח השדות הגבוהים מיוחסת למנהור של קווזי חלקיקים בין הגרגירים כאשר החוליות החלשות מפסיקות לתפקד כצומתי ג׳וזפסון. מודלים המבוססים על אינטרפרטציות אלה מתיישבים היטב עם התוצאות הניסיוניות.

### פרק 1 - מבוא

ההתפתחות הטכנולוגית המרשימה ביצירת מבנים בסקאלות ננו-מטריות פותחת חלון הזדמנויות לחקר בסיסי ויישומי של מוליכי-על במימדים ננו-מטריים. בפן היישומי קיים פוטנציאל גדול לשימוש בחוטים מוליכי-על כמו YBCO, (המציגים מוליכות-על כבר בטמפרטורה של חנקן נוזלי) במערכות בהן הקטנת המימדים והחיסכון באנרגיה הם קריטיים. בפן הבסיסי, קיימת מוזלי) במערכות בהן הקטנת המימדים והחיסכון באנרגיה הם קריטיים. בפן הבסיסי, קיימת השיבולי) במערכות בהן הקטנת המימדים והחיסכון באנרגיה הם קריטיים. בפן הבסיסי, קיימת נוזלי) במערכות בהן הקטנת המימדים והחיסכון באנרגיה הם קריטיים. בפן הבסיסי, קיימת חשיבות בחקר תהליכי דיסיפציה הקשורים לפלקטואציות תרמיות ו/או קוונטיות של הפאזה מחשיבות בחקר תהליכי דיסיפציה הקשורים לפלקטואציות נמוכות [3] בגלל הערך הגדול יחסית של  $\xi_0$  בחוטים עם ממדים בסדר גודל של אורך הקוהרנטיות, שלא נצפו ב-1-3]. עבודות ניסיוניות במבנים קווזי חד ממדיים נעשו בעבר בעיקר במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות [3] בגלל הערך הגדול יחסית של  $\xi_0$  בחומרים אלה. עבודות אלו חשפו תופעות שלה ממדיים נעשו בעבר בעיקר במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות [3] בגלל הערך הגדול יחסית של החמרים לסומרים אלה. בחומרים הזמנית של הסית של מעבר הפאזה כתלות ברוחב הדגם. הבולטות שנחקרו באופן אינטנסיבי היא התרחבות של מעבר הפאזה כתלות ברוחב הגם. ההתרחבות הנצפית במדידות של ההתנגדות כפונקציה של הטמפרטורה משקפת דיסיפציה הנובעת מפלקטואציות בהן נדון להלן.

מדידות של ההתנגדות, R, כנגד טמפרטורה ב- bulk של מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות מדידות דומות בחוטים קווזי חד ממדיים, מראות מעבר חד ממצב נורמלי למצב מוליך-על. מדידות דומות בחוטים קווזי חד ממדיים, מראות התרחבות של המעבר הגדלה ככל שהדגם צר יותר. שני מנגנונים עיקריים אחראים לכך שבחוטים TAPS- - גדעה מעבר הגדלה ככל שהדגם צר יותר. שני מנגנונים עיקריים אחראים לכך שבחוטים TAPS- - גענות המנגדות גם מתחת לטמפרטורה הקריטית של החומר. המנגנון הראשון - TAPS- אלה נצפית התנגדות גם מתחת לטמפרטורה הקריטית של החומר. המנגנון הראשון - TAPS- גענות הענגדות גם מתחת לטמפרטורה הקריטית של החומר. המנגנון הראשון - TAPS- תרמיות של מחומר. המנגנון הראשון - שלה נצפית הענגדות גם מתחת לטמפרטורות הקרובות ל- ד. עיקריים אחראים לכך שבחוטים ערמיות של מנית המנגדות גם מתחת לסופרטורות הקרובות ל- ד. (מקורו בפלקטואציות הרמיות של פרמטר הסדר, גם מתחת ל- לבנטי בטמפרטורות להריסה זמנית לוקלית של מוליכות העל תרמיות של פרמטר הסדר, גם באריות להסות להריסה זמנית לתופעת ה-TAPS וכתו איל מרמיות של פרמטר הסדר, ניש באלים (גם ל- 14 להריסה זמנית לתופעת ה- ל- 15 (גם לרמיות להיות להריסה זמנית לתופעת ה- לרמיות העליות המונד גם המסות ל- ד (גם לרמיות של מתחת ל- 16 (גם לרמיות לתופעת ה- לרמית לראשונה על ידי בחופר ביונדית מתחת ל- (גם לרמית האקטיבציה, גם היה על ידי המחוט מוליך על מתחת ל- (גם לראשונה גידיה האקטיבציה, גם החוט מוליך-על מתחת ל- (גם ל- 16) (גם ל- 16)

האקטיבציה קטנה וההסתברות לאירועי החלקת פאזה גדלה, וכתוצאה R גדל [7]. מחקרים האקטיבציה קטנה וההסתברות לאירועי החלקת פאזה גדלה, וכתוצאה R גדל [8-12]. ניסיוניים רבים [8-12], של חוטים דקים הראו התאמה טובה מאד לתיאורית TAPS הוא המקובל לתיאור ההתנגדות מתחת לטמפרטורה הקריטית בדגמים בהם שטח החתך הוא מסדר גודל של (T).

QPS- - מנגנון שני, המיוחס לטמפרטורות נמוכות ורחוקות מ-Tc הוא מנגנון קוונטי - QPS- מנגנון שני, המיוחס לטמפרטורות נמוכות ורחוקות מ-mase slip הגורם לקריסה של פרמטר phase slips הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות של הסדר כתוצאה ממנהור קוואנטי דרך בור הפוטנציאל, כך שקיימת הסתברות להתפתחות לשפות התנגדות גם בטמפרטורות נמוכות מאד. הפרדיקציות התאורטיות מנבאות כי ניתן יהיה לצפות בתופעה של ה-QPS בחוטים שרוחבם קטן מ- 10 וד [15]. תוצאות ניסיוניות אכן הראו התנגדות בחופעה של ה-QPS בחוטים שרוחבם קטן מ- 10 וד [15]. תוצאות ניסיוניות אכן הראו התנגדות בחופעה של ה-QPS בחוטים שרוחבם קטן מ- 10 ולון [15]. תוצאות ניסיוניות אכן הראו התנגדות לדוגמא, בחלק מהעבודות שבהן נצפתה התנגדות בטמפרטורות הנמוכות, למשל, [13] היא יוחסה לדוגמא, בחלק מהעבודות שבהן נצפתה התנגדות בטמפרטורות הנמוכות שבין הגרגירים [1].

כדי לבדוק את המנגנון של LAHM צריך, כאמור, ששטח החתך של המבנה הנמדד יהיה מסדר גודל של  $(T)^2 \xi$ . מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות, מאופיינים באורך קוהרנטיות גדול יחסית ( $\xi^2(T)$  מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות, מאופיינים באורך קוהרנטיות גדול יחסית ( $\xi_0^2 - 150 nm - 1500 nm$  העבודות העוסקות בדיסיפציה של מוליכות על במבנים קווזי חד ממדיים עסקו במוליכי-על העבודות העוסקות בדיסיפציה של מוליכות על במבנים קווזי חד ממדיים עסקו במוליכי-על העבודות העוסקות בדיסיפציה של מוליכות על במבנים קווזי חד ממדיים עסקו במוליכי-על העבודות העוסקות בדיסיפציה של מוליכות על במבנים קווזי חד ממדיים עסקו במוליכי-על העבודות העוסקות בנוסף, מוליכי-על אלה מורכבים מאלמנט אחד או תרכובת של שני יסודות לכל היותר, כך שהשמירה על הומוגניות החומר פשוטה גם כשמדובר בחוטים דקים. לעומת זאת, מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות כדוגמת YBCO מאופיינים באורך קוהרנטיות קטן מאד,  $\xi_0 \sim 2 nm$  הופך לאתגרי במיוחד. מסיבה זו קיימות מעט מאד עבודות המתארות מדידות במוליכי-על הופך לאתגרי במיוחד. מסיבה זו קיימות מעט מאד עבודות המתארות מדידות במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות בחוטים ננו-מטריים. עבודות אלה, אשר נעשו ברובן בחוטים שממדיהם בסמפרטורות גדולים מ- $\xi_0$  חשפו תופעות מעניינות שעד כה לא מצאו את הסברן המלא. להלן נסקור בקצרה גדולים מ- $\xi_0$  חשפו תופעות העניינות שעד כה לא מצאו את הסברן המלא. להלן נסקור בקצרה מספר עבודות מייצגות המתארות יצור אלחוטי צולים.

Jiang et al. [17] Jiang et al. [17] Jiang et al. אל מדידות בסוטים אווים אווים שנמדדו היו ברוחב, W, של מאות PLD משכבת YBCO בעובי 50 nm משכבת YBCO אודלה בשיטת קרן יונים ענמדדו היו ברוחב, W, של מאות גנו-מטר, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של London, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של גנו-מטר, גוו-מטר, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של גנו-מטר, גנו-מטר, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של גנו-מטר, גנו-מטר, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של גנו-מטר, גנו-מטר, גדול מאד מאורך הקוהרנטיות אך מסדר גודל של עומק החדירה של גודל גנו-מטר, גוו-מטר, גדול מאד מאורך הקומת ה- גדול אר מסדר גודל של אומק החדירה של גודל ממדי בממדי גבוהה זו איננה מפתיעה שכן או גמים אלה. ממצא מעניין אחר בחוטים אלה הייתה החוט. תוצאה זו איננה מפתיעה שכן או גבוהה מאד של גנומים אלה. צפיפות הירם הגבוהה יוחסה לגיאומטריה של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת וורטקסים. בעבודה אחרת של אחרת של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת וורטקסים. בעבודה אחרת אחרת של אחרת של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת אורטקסים. בעבודה אחרת של אחרת של אחרת של או של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת אורטקסים. בעבודה אחרת אחרת של אחרת של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת אורטקסים. בעבודה אחרת אחרת של הדגם המייצרת מגבלות לייצור מתח הנובע מתנועת אורטקסים. בעבודה אחרת אחרת של הדגם אחרת אחרת של אחרת אחרת אחרת אחרת אחרת אווינו אווינות אווינוות אווינות אווינות אווינוות אווינוות אווינות אווינוות אווינוות אווינוות אווינווווינוות אווינוות

4

דעבודות שהצגנו בסעיף הקודם, חוטי ה-YBCO מציגים דיסיפציות שיוחסו למנגנון TAPS (12] Xu and Heath YBCO למרות שרוחבם של החוטים עולה בהרבה על אורך הקוהרנטיות של 10nm (21] אמרות שרוחבם של החוטים עולה בהרבה על אורך הקוהרנטיות של 10nm (21] המראים הייתה היו הראשונים שהצליחו לייצר חוטי YBCO ברוחב של 10nm עיקר העבודה שלהם הייתה קשורה בפיתוח התהליך הטכני המורכב לייצור חוטים איכותיים דקים מאד של YBCO המראים קשורה בפיתוח התהליך הטכני המורכב לייצור חוטים איכותיים דקים מאד של YBCO המראים קשורה בפיתוח התהליך הטכני המורכב לייצור חוטים איכותיים דקים מאד של YBCO המראים מוליכות על, כאשר מטרתם הייתה לבחון את היעילות של חומרים אלה כרכיבים מוליכי-על מוליכות על, כאשר מטרתם הייתה לבחון את היעילות של חומרים אלה כרכיבים מוליכי-על הדרחבות נעל, כאשר מטרתם הייתה לבחון את היעילות של חומרים אלה כרכיבים מוליכי-על התקנים. מחברים אלה דווחו על מעבר חד ב-R(T) בחוטים ירחבים הלה כרכיבים מוליכי-על הדרגתית במעבר ככל שרוחב הדגם יורד. למריחה ב-R(T) הותאמו עקומות המבוססות על תיאורית הדרגתית במעבר ככל שרוחב הדגם יורד. למריחה ב-ATP הותאמו עקומות המבוססות על תיאורית הדרגתית במעבר כל שרוחב הדגם יורד. למריחה ב-TAPS הותאמו עקומות המבוסטות על תיאורית געורית הדרגתית במעבר כל שרוחב הדגם יורד. למריחה ב-TAPS הותאמו עקומות הנובעת מ-2PS לא חודנית על תיאורית הדרגתית במעבר כל שרוחב הדגם יורד. למריחה ב-TAPS התרחבות הנובעת מ-2PS לא חודנית מלדיחה בעדה מגניי חוטים אלה הראו תלות זניחה בשדה מגנטי חיצוני של עד ד 5.

בעבודה הנוכחית הרחבנו את המחקר במנגנוני הדיסיפציה של חוטי YBCO ננו-מטריים על ידי מדידות של מגנטו-התנגדות בתחום רחב של טמפרטורה ושדות מגנטיים. בחרנו לייצר ננו-חוטים גרנולריים של YBCO בשיטות ליתוגרפיה קונבנציונליות. הצלחנו לייצר חוטים מוליכי-על בעלי רוחב של 80 mm ומעלה, כאשר חוטים צרים יותר לא הראו מוליכות-על. האופי הגרנולרי של החוט גורם לקיומם של מנגנונים שונים האחראים לדיסיפציה בחוט אותם חשפנו בעבודה זו, כאשר העיקריים ביניהם הם פלקטואציות בחוליות החלשות (weak links) שבין הגרגירים, ומנהור של קווזי חלקיקים בין גרגירים סמוכים. מדידות של מגנטו-התנגדות בחוטים שיצרנו חשפו מגוון רחב של אנומליות בהתנהגות של (T,H) וביניהן : התרחבות של מעבר הפאזה התלויה ברוחב הדגם, אוסילציות של ההתנגדות עם העלייה בשדה, מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית (periodic ) אוסילציות של ההתנגדות עם העלייה בשדה, מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית ( ביטוי בשיפוע שלילי של הרקע המגנטי עם העלייה בשדה. אנו מייחסים אנומליות אלה לשילוב שבין ביטוי בשיפוע שלילי של הדגם, המבנה הגרנולרי שלו, ותכונותיו של ה-YBCO כמוליך-על בטמפרטורות הגיאומטריה של הדגם, המבנה הגרנולרי שלו, ותכונותיו של ה-YBCO צוליק בטמפרטורות גבוהות. חלק מתופעות אלה נצפו בעבודות קודמות שעסקן בחוטים של מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות (נתאר אותן בהרחבה בפרק 3) והן מדווחות כאן לראשונה במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות ומשקפות את גבוהות. בנוסף, מקצת מן התופעות ייחודיות למוליכי העל בטמפרטורות גבוהות ומשקפות את סימטריית ה- d-wave של פונקציית הגל.

העבודה שלהלן מאורגנת באופן הבא. בפרק 2 נתאר את הכנת החוטים הננו-מטריים ואת המערכת הניסיונית. בפרק 3 נציג את תוצאות המדידות ב-YBCO. נתחיל בתיאור התוצאות בשכבת האם ממנה נחצבו החוטים ואחייכ נראה את התוצאות לחוטי YBCO. נשווה את התוצאות בחוטי YBCO עם תוצאות במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות ונדון בכל תוצאה. לבסוף, בפרק 4, נסכם את העבודה.

## פרק 2 – המערכת הניסיונית

בפרק זה נתאר את גידול שכבת ה-YBCO הגרנולרית, שנבחרה לעבודה זו. נפרט את תהליך יצירת החוטים הכולל את תכנון המבנה, שימוש בליטוגרפית אלקטרונים וחציבה בחומר באמצעות יוני Ar מואצים. בנוסף, נציג את מערכת המדידה ששימשה אותנו למדידות מגנטו-התנגדות בשיטת 4-מגעים ונתאר את המדידות העיקריות שבצענו.

#### YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) גידול שכבת 2.1

עכבות בעוביים שבין 10-20 משל 10-20 א השייד למשפחת מוליכי העל High-Tc superconductors) בטמפרטורות גבוהות (High-Tc superconductors) (על מצע של (100) SrTiO3 (בגודל  $1 cm^2$  בגודל  $1 cm^2$  בגודל SrTiO3 (100) בטכניקת (20] pulsed laser deposition (PLD) (20] חומם ל-20°C בסביבה של חמצן זורם בלחץ של 100 mT ולאחר מכן קורר ל-20°C במשך שעה חומם ל-20°C בסביבה של חמצן זורם בלחץ של א מתקבלת שכבה של 20°C בסביבה של חמצן זורם בלחץ של המתקבלת שכבה של 20°C בסביבה של חנגין יות תנאים אלה מתקבלת שכבה של 20°C בסביבה של חנגין יות תנאים אלה מתקבלת שכבה של 20°C בסביבה של סידי אופטימאלית באוריינטציית ציר- 2 אפיטקסיאלי ניצב למצע הגידול ( Srtio3 (20) במשך שעה סנון מינון מונון מוספל ליום ל-20°C בסביבה של 20°C בסביבה של חומר הנאים אלה מתקבלת שכבה של 20°C באיכות מינון סידי אופטימאלית באוריינטציית ציר- 2 אפיטקסיאלי ניצב למצע הגידול ( ניצרים איכות מינון oped c-axis ) בלחץ של מספר c-axis ( שנפג שנכם של חומר גרגירי לא מסודר כך שהגרגירים אופטימאלית באוריינטציית ציר- 2 אפיטקסיאלי ניצב למצע הגידול ( ניצרים אזורים בהם אין יינושקיםיי זה לזה ויוצרים יקשרים חלשיםי (weak links) ביניהם. בנוסף, נוצרים אזורים בהם אין אזורים סמוכים בשכבת Drum לישרים לוחמר (AFM) בעובי של חומר גרגירי לא מסודר כד שהגרגירים בהם אין המר (2018). באיור 2.1 גרגיר ליש מסודר כד שהגית מסובי יזה לזה ויוצרים הסריקה מנבי של 2000 בעובי של מחמית (2018) ביניהם. בנוסף, נוצרים אזורים בהם אין המר (2018). באיור 1.2 גרגיר נע בטווח של 100 מונות האזור הנסרק הוא בערים אזורים סמוכים בשכבת סמוכים בשכבת המונות הביאים שתי הדמיות (2018) ביניהם בחי התמונות האזור הנסרק הוא ביור 2.1 גרגירים מצומדים בגרות כי גודלו (קוטרו) של גרגיר נע בטווח של מחונות היו הנסרק הוא ביורים בהם אין בהדמיה ו ניתן לראות כי גודלו (ניתן לראות כי גודלו מריקה הגבוה ויותר. מיינו 1.3 גרגירים מצומדים בגרול מוחיל ב-2000 מיינו מריק בין הגברים ניתן להבחין באזורים בהם אין הדמיה גרגירים מצומדים בגרול מתחיל ב-200 מינות אפריה בפרק הבא (באיור 3.2) המעבר מינות לפאות מוליכת-על מתחיל ב-2000. ביי שנראה בפרק הבא (באיור 3.2) המעבר מינות לפאות מוליכת בגוות מוליכת בגוות מוחיל ב-2000 מיינות מינות מוליניים בגוות מוליכתי מניוים בגוות מוליכתים מג



איור 2.1: הדמיית AFM בשטח של 1x1 μm<sup>2</sup> של שכבת YBCO בעובי של Mm 10 nm בשטח איור 2.1: הדמיית AFM בשטח של איור 2.1: האיזורים החורודים הם שאריות של את גרעיני החומר והאדומים מייצגים את ה-substrate (העדר YBCO). האיזורים הורודים הם שאריות של (I) את גרעיני החומר והאדומים מייצגים את ה-15-30 (I) סריקה ברזולוציה גבוהה, ממנה ניתן לראות התפלגות גדלים של גרגירים בטווח של (I) .resist סריקה ברזולוציה נמוכה המדגימה את קבוצות הגרגירים בסקלות אורך שבין 100 mm.

#### 2.2 הכנת החוטים

(YBCO) בכדי להכין מבנה של חוטים תת-מיקרונים מתוך הפילמים של מוליך-העל (YBCO) השתמשנו בציוד השייך למרכז לננו-טכנולוגיה ב״בר אילן״ (BINA), ובמיוחד בליטוגרפייה של קרן אלקטרונים וחציבה באמצעות יוני ארגון. בשלב ראשון תכננו את מבנה החוטים יחד עם מגעי מלקטרונים וחציבה באמצעות יוני ארגון. בשלב ראשון תכננו את מבנה החוטים יחד עם מגעי המדידה למעבר זרם ומדידת מתח בשיטת ארבע מגעים. באופן כזה החוט ומגעי המדידה עשויים מאותו חומר ובכך אנו נמנעים מזיהומים העלולים להתפתח בין חוט ומגעים המצומדים זה לזה מאותו חומר ובכך אנו נמנעים מזיהומים העלולים להתפתח בין חוט ומגעים המצומדים זה לזה שאינם מאותו חומר ובכך אנו נמנעים מזיהומים העלולים להתפתח בין חוט ומגעים המצומדים זה לזה שאינם מאותו חומר ובכך אנו נמנעים מזיהומים העלולים להתפתח בין חוט ומגעים המצומדים זה לזה שאינם מאותו חומר ועלולים להוסיף התנגדות. מעל הפילם מטופטף חומר הגנה (resist) אורגאני, שישינם מאותו חומר ועלולים להוסיף התנגדות. מעל הפילם מטופטף חומר הגנה (methyl methacrylate) 180°C. שאינם מחומם ל- 180°C מבטיח שכבת הגנה אחידה על פני הפילם עם עובי אופייני של mn 550 לאחר מכן הפילם מחומם ל- 180°C מבטיח הגנה אחידה על פני הפילם עם עובי הופייני של mc 550 השחר מכן הפילם מחומם ל- 180°C במשך 90 שניות כך ששכבת ההגנה תתקשח ותהפוך רגישה לקרן האלקטרונים בתהליך הליתוגרפיה (שלב I באיור 1.2). ל״כתיבת״ המבנה הרצוי השתמשנו במערכת קרן אלקטרונים ברזולוציה גבוהה 1000 כד שכבת ההגנה תתקשח ותהפוך רגישה לקרן האלקטרונים בתהליך הליתוגרפיה נשום ל- 2000 מחומם ל- 2000 מחומם ל- 2000 מחומם ל- 100°C ממשנו במערכת קרן אלקטרונים בתהליך הליתוגרפיה (שלב I באיור 1.2). בשלב זה הקרן תסרוק את אזורי המסגרת (למגעים ולחוט) של המבנה שתכננו (שלב I באיור 1.2). בסיום הכתיבה מוכנס הפילם לחומר מפתח (MIBK) כך שרק האזורים שנחשפו לקרן האזורים נכן לתומרים וכן למגעים ולחוט) של המבנה שתכננו (שלב I באיור 1.2). בסיום הכתיבה מוכנס הפילם לחומר מפתח (MIBK) כך שרק האזורים שנחשפו לקרן האלקטרונים על החומר המגן על החברה וכן כ

נוצרת תבנית מסגרת של המבנה הרצוי של החומר המגן. בשלב זה הפילם עובר תהליך של חציבה והסרה של שכבת ה-YBCO שאינה מוגנת. חציבת השכבה נעשתה בשיטת ion milling של יוני ארגון במתח האצה של V 500 וזרם קרן יונים של 4M 700. לאחר בדיקה חשמלית כי אכן תהליך החציבה הסתיים (קרי, לא נותר חומר באזורים הלא מוגנים), מסתיים תהליך ההכנה של מבנה החוטים כפי שהוא מסוכם באיור 2.2.





איור 2.2: סיכום שלבי הכנת החוט:

180° - אומר הנמדד בשכבת ההגנה PMMA והכנתה לקראת חשיפה לקרן האלקטרונים בעזרת חימום ל (I) ציפוי החומר הנמדד בשכבת ההגנה C

(II) כתיבת/חשיפת ה-PMMA של המבנה הרצוי על ידי קרן האלקטרונים. רק האזורים המופיעים בכחול (II) נחשפים, וכתבים. המסגרת האדומה מציינת שדה חשיפה שונה משאר התבנית.

(III) לאחר כתיבת המבנה מוכסות השכבות לחומר המפתח MIBK כך שה-PMMA שנחשף מוסר. מעל לחוט ומגעי המדידה נותר PMMA.

ion milling ארגון. וואיבת החומר החשוף בעזרת (IV)

 (V) סיום תהליך החציבה: אין מגע חשמלי בין הנקודות A ו-B, כלומר לא נותר חומר באזורים שמהם הוסר ה-PMMA.

בסופו של התהליך נותרת שכבת הגנה הניתנת להסרה על ידי שטיפה באצטון אך נעדיף להשאירה בכדי להגן על החומר. איור 1.3 מציג את המבנה ששימש למדידת 4 מגעים של חוטי YBCO כאשר אורכו ורוחבו של החוט נקבעים על פי המרחק בין האזורים שנחשפו על ידי קרן האלקטרונים. אורכו ורוחבו של החוט נקבעים על פי המרחק בין האזורים שנחשפו על ידי קרן האלקטרונים. ממבנה מתוכנן כך שקיימת רציפות בין החוט ומגעי המדידה העשויים מאותו החומר. ניתן לראות המבנה מתוך האיור כי התנגדות החוט נקבעים על פי המרחק בין האזורים שנחשפו על ידי קרן האלקטרונים. המבנה מתוכנן כך שקיימת רציפות בין החוט ומגעי המדידה העשויים מאותו החומר. ניתן לראות מתוך האיור כי התנגדות החוט היא הדומיננטית במערכת בשל גודלו הקטן ביחס למגעי החיבור (t+, V±) ולכן ההתנגדות האורכית הנמדדת היא אכן של החוט, וכן כל התופעות שנמדדו מבטאות שינויים בחוט בלבד. בעבודה זו, הוכנו חוטי YBCO בעוביים של mn 10-20 (העובי נקבע עייי עוביו YBCO שינויים בחוט בלבד. בעבודה זו, הוכנו חוטי YBCO בעוביים של mn 10-20 (העובי נקבע עיי עוביו YBCO שינויים בחוט בלבד. בעבודה זו, הוכנו חוטי YBCO בעוביים של mn 10-20 (העובי נקבע עיי עוביו YBCO נלא הפילם) באורך mn 500 וברוחב של mn 10-20 (העובי נקבע עיי עוביו YBCO של הפילם) באורך המידת הוטי אחוטי 10-20 איור 2.4 מציג הדמיית YBCO של חוט YBCO של הפילם באורך השל חוט 500 החוכן משכבה של mn 10 ובו ניתן לראות כיצד הסרת האזורים שנחשפו מגדירים את ממדי החוט.



איור 2.3. מבנה חוט YBCO יחד עם מגעי המדידה. האזורים הכחולים הם אלה שנחשפים לקרן האלקטרונים. במסגרת האדומה מופיע אזור החוט עצמו המוגדר על ידי המרחק בין שני המלבנים המוארכים ורוחבם.



איור 2.4. (פאנל שמאלי) הדמיית AFM בשטח של 2x2 μm<sup>2</sup> של חוט YBCO שהתקבל לאחר תהליך החציבה איור 2.4. (פאנל שמאלי) הדמיית AFM בשטח של 2x2 עמט מייצג אזור נמוך יותר בו לא נותר YBCO. משכבה של nm 10 nm האיזור הצהוב מייצג את ה-YBCO והאדום מייצג אזור נמוך יותר בו לא נותר הצהוב מייצג את ה-Soon האיזורים הורודים הם שאריות של resist. אורכו של החוט הוא כ- nm 700 ורוחבו כ- 500nm כפי שניתן לראות מפרופיל הדגם (פאנל ימני) שנלקח לאורך הקו הכחול המקווקו.

צפיפות הזרם של החוטים חולצה ממדידות (V(I). למרות שלבי ההכנה האגרסיביים, צפיפות הזרם בפיפות הזרם של החוטים חולצה ממדידות  $10^7 \ A/\ cm^2$  בטמפרטורות נמוכות ויורדת בקרוב  $T_{\rm c}$ -10 בטמפרטורות נמוכות ויורדת בקרוב ליניארית ל-0 ב- $T_{\rm c}$ -10 ביניארית ל-0 ב- $T_{\rm c}$ -10 ביניארית

#### 2.3 מערכת המדידה

4-probe) איסוף הנתונים בוצע על ידי מדידות של התנגדות/מתח של זרם עובר בשיטת 4 מגעים (PPMS Model 6000 9T (Physical Properties Measurements) במכשיר ה- (measurements) במכשיר ה- Quantum Design) במכשיר השלוט בטמפרטורת המדידה בטווח של (measurements) מתוצרת מצוידת בסליל מוליך-על היכול לספק שדה מגנטי קבוע ומשתנה עד 9 (Vcompliance 95 המערכת קיים מתח סף מקסימאלי של Vcompliance 95 בניצב ובמאונך לדגם ובכל זווית ביניים. למערכת קיים מתח סף מקסימאלי של mV המגנטי קווית אוהמים), אומער מגנטי קבוע ומשתנה עד 9 (Were 1000 איסו מנונים מתח סף מקסימאלי של 1000 איסו מנונים מתח סף מקסימאלי של 1000 איסו אוהמים), בניצב ובמאונך לדגם ובכל זווית ביניים. למערכת קיים מתח סף מקסימאלי של 1000 איסו אוהמים), אומער מגבילה את גודל זרם המעבר בחוטים בהם ההתנגדות גדולה מאד (עשרות קילו אוהמים), ולכן נעשה שילוב של ספקי זרם ומתח חיצוניים מתוצרת עבור מדידות של חוטי YBCO אימוש במכשור החיצוני

R(T,H) החיצוני נעשה במדידות של עקומות מאפייני מתח-זרם (V(I) curves) בלבד. במדידות של (R(T)) לא נדרשנו למכשור חיצוני. במדידות אלה מדדנו את התנגדות החוט כתלות בטמפרטורה (R(T)) בטווח שבין 10K-300K עם ובלי נוכחות שדה (ZFC-FC) ואת התנגדות החוט כתלות בשדה מגנטי משתנה בגודלו (R(H)) בטמפרטורה נתונה. עבור מדידות של חוטי YBCO השימוש במכשור החיצוני נעשה לטובת עקומות מאפייני מתח-זרם (V(I) curves) בלבד, בנוסף למדידות הבאות שבהן לא נדרשנו למכשור חיצוני:

- התנגדות החוט כתלות בטמפרטורה (R(T)) בטווח שבין 10K-300K עם ובלי נוכחות שדה
   (ZFC-FC).
  - התנגדות החוט כתלות בשדה מגנטי משתנה בגודלו (R(H)) בטמפרטורה נתונה.
    - .PPMS + Keithley (V(I) curves) אאפייני מתח-זרם •

## פרק 3 – תוצאות ודיון

בפרק זה נתאר את התוצאות ממדידת התנגדות כתלות בטמפרטורה ובשדה המגנטי החיצוני של שכבת ה-YBCO. לאחר מכן נתאר את תוצאות המדידה עבור החוטים, תוצאות המהוות את ליבה של עבודה זו.

#### אפיון שכבת ה-YBCO – מעבר פאזה התנגדותי 3.1

המדידה הראשונית שנעשתה, לפני הכנת החוטים, היא אפיון של איכות השכבה ממנה הוכנו החוטים מתוך עקומת (R(T). מתוך עקומות אלה ניתן לקבל את הטמפרטורה בה השכבה מתחילה להיכנס לפאזה מוליכת-על (T<sub>c,onset</sub>) ואת הטמפרטורה בה מסתיים מעבר והשכבה נכנסת לפאזה מוליכת-על באופן מלא (T<sub>c</sub>) כלומר, אפס התנגדות. באיזור המעבר שבין תחילת המעבר וסופו מוליך מוליכת-על נמצא במצב התנגדותי. איור 3.1 מציג עקומת (R(T) טיפוסית של שכבת YBCO בעובי של 10 העל נמצא במצה התנגדותי. איור 3.1 מציג עקומת (R(T) חיפוסית של שכבת אונד המ



איור 3.1: עקומת (R(T) המאפיינת שכבת YBCO בעובי של 10 nm מתוך העקומה ניתן לראות כי עד למעבר איור 3.1: עקומת (T<sub>C</sub>) 85 K המאפיינת שכבה מראה התנהגות מתכתית. מעבר הפאזה מתחיל מ-89 K ומסתיים ב-37 (T<sub>C</sub>) כך הפנאזה (T<sub>C</sub>) 85 K השכבה מראה התנהגות מתכתית. מעבר הפאזה מתחיל מ-7 איזה (T<sub>C</sub>) מתוארת הנגזרת לד<sub>C</sub>) מתוארת הנגזרת לר<sub>C</sub> היא אפס. בפאנל הפנימי (inset) מתוארת הנגזרת לת-7 תוחב המעבר מוגדר בעבודה שההתנגדות מתחת ל-10 מיות הנגזרת לוור מיום ב-10 מוארת הנגזרת לוור מ-10 מיום ב-10 מיות לוור בעבודה איז כרוחב המעבר מוגדר בעבודה איז כרוחב מחצית הגובה של פונקציית הנגזרת.

 אירועי ה- TAPS בשכבה באות לידי ביטוי בגלל החלקות פאזה ב-weak links בין ה-grains ולא ב-grains עצמם. בטמפרטורות נמוכות מהמעבר כבר לא קיימות פלקטואציות כאלה ולכן השכבה grains עצמם. בטמפרטורות נמוכות מהמעבר כבר לא קיימות פלקטואציות כאלה ולכן השכבה כולה הופכת למוליכת-על. כפי שנראה בסעיף.3.3, הימריחהי של מעבר הפזה בחוטים היא משמעותית יותר; גם בחוטים המנגנון האחראי למריחה הוא ה-TAPS.

עד כאן תארנו את השפעת הטמפרטורה על התנגדות השכבה. נעבור עתה לתאר את השפעת השדה המגנטי על התנגדות זו.

#### YBCO- מגנטו-התנגדות (magnetoresistance) של שכבת ה-3.2

10 nm איור 3.4 מציג את תלות ההתנגדות בשדה מגנטי ניצב של שכבת YBCO בעובי של MO בטמפרטורות שונות. בטמפרטורות מספיק נמוכות (40 K) השכבה עדיין מראה אפס התנגדות לפחות עד 5 T ב. כאשר מעלים את טמפרטורות המדידה ל- 70 K, סמוך יותר למעבר הפאזה, השכבה מראה אפס התנגדות רק עד לאזור של T t כאשר מעל לשדות אלה השכבה מציגה עלייה השכבה מראה אפס התנגדות רק עד לאזור של T t כאשר מעל לשדות אלה השכבה מציגה עלייה השכבה מראה אפס התנגדות רק עד לאזור של T t כאשר מעל לשדות אלה השכבה מציגה עלייה השכבה מראה אפס התנגדות רק עד לאזור של T t כאשר מעל לשדות אלה השכבה מציגה עלייה השכבה מראה אפס התנגדות רק עד לאזור של T t כאשר מעל לשדות אלה השכבה מציגה עלייה השכבה מנוטונית של ההתנגדות בתלות הנראית ריבועית עם השדה. כלומר, השכבה "נדחפה" לאזור המונוטונית של מוליכות העל אך עדיין הפאזה השלטת היא המוליכת-על. בטמפרטורת הסמוכות מאד למעבר הפאזה (80 K) נצפית התנגדות כבר בשדות נמוכים כמתואר ב- inset לאיור 3.4. העלייה המונוטונית והמהירה של ההתנגדות עם השדה מתמתנת באזור T ל±. כפי שנדון בהמשך, התמתנות זות מצייה זו מצביעה על תחילת הכניסה של השכבה לפאזה הנורמאלית.



איור 3.4: עקומות התנגדות בשכבת YBCO בעובי של 10 nm כתלות בשדה מגנטי ניצב שנלקחו בטמפרטורה של איור 3.4: עקומות התנגדות בשכבת 40 K, 70 K, 80 K

תוצאות המדידה של השכבה מצביעות על מגנטו-התנגדות חיובית (magnetoresistance positive), העלייה החדה התנגדות העולה עם השדה בכל הטמפרטורות, כמצופה עבור מוליך-על [7]. העלייה החדה בטמפרטורות הגבוהות (80 K) כבר בשדות הנמוכים מבטאת את העלייה בקצב הפלקטואציות התרמיות בטמפרטורות אלה, פלקטואציות המשפיעות על החוליות החלשות שבין הגרעינים. בניגוד להתנהגות צפויה זו, וכפי שנראה בסעיפים הבאים, התלות שונות של ההתנגדות בשדה עבור חוטי ה-YBCO מציגה התנהגות מורכבת מאד ובכללן אנומליות שונות. החתנגדות המורכבת של המגנטו-

## YBCO מעבר הפאזה נורמאלי–מוליך-על של חוטי 3.3

3.2 כפי שהוצג בפרק 2, על פני שכבת ה-YBCO הוכנו מספר חוטים יחד עם מגעי המדידה. איור R(T) מציג עקומות R(T) של ארבעה חוטים נבחרים ברוחב של 80, 160, 200, 500nm של NECO שהוכנו משכבה של YBCO בעובי של 10 nm 10. מתוך העקומות השונות ניתן לראות בברור את השפעת מימד החוט לאורך כל טווח הטמפרטורות. לפני מעבר הפאזה החוטים מראים התנהגות מתכתית כך שערכי ההתנגדות של כל חוט בטמפרטורות. לפני מעבר הפאזה החוטים מראים התנהגות מתכתית כך שערכי שריד כל טווח הטמפרטורות. לפני מעבר הפאזה החוטים מראים התנהגות מתכתית כך שערכי לאורך כל טווח הטמפרטורות בני מעבר הפאזה החוטים מראים התנהגות מתכתית כך שערכי שריד בי מווח הטמפרטורות לפני מעבר הפאזה החוטים מראים התנהגות מתכתית כך שערכי ההתנגדות של כל חוט בטמפרטורות החדר ושיפוע הירידה בהתנגדות לתח". בנתונים ככל שהחוט שימיון בזה של החוטים מאפשר לנו לייחס ביותר בהתאמה סבירה ליחסים בין רוחבי החוטים. אפיון כזה של החוטים מאפשר לנו לייחס שינויים בנתונים מחוט לחוט לרוחב החוט על אף העובדה שמדובר בחומר גרגירי דק מאד המאופיין באי-הומוגניות.

ניתן לחלק באופן גס את מעבר הפאה לאזור בו ההתנגדות יורדת מהר ולאחר מכן מעין ״זנב״ onset התנגדות המאופיין בירידה הדרגתית יותר לכיוון השלמת מעבר הפאזה. טמפרטורת ה-tc, onset למעבר למצב של מוליכות-על היא בקרוב T<sub>c, onset</sub>~89 K לכל החוטים והיא מייצגת את מעבר הפאזה בגרגירים. מעבר הפאזה נמרח, באופן ברור, על טווח טמפרטורות רחב יותר ככל שרוחב הפאזה נעשה צר יותר. בפאנל הפנימי שבאיור 3.2 מוצגת הנגזרת dR/dT ל-4 החוטים.



.0.5 μA איור 3.2: עקומות (R(T) של חוטי YBCO ברוחב של R(T) שנלקחו בזרם מעבר של 80, 160, 200, 500 nm בפאנל הפנימי מופיע הנגזרת של ההתנגדות לפי הטמפרטורה לארבעת החוטים.

עבור סט חוטים זה רוחב מעבר הפאזה עולה מ-X K ל-Y 9 כאשר רוחב החוט קטן מ-500 ל-80 nm 80. (את רוחב המעבר אנחנו מגדירים, כאמור בסעיף 3.1, כרוחב מחצית הגובה של פונקציית הנגזרת). כאמור, בחוטים הגרנולרים החוליות החלשות שבין הגרגירים הופכות לדומיננטיות במונחי התנגדות כיוון שהן יסובלותי מפלקטואציות בפאזה המוליכת-על (TAPS) בטמפרטורות הגבוהות. ככל שהטמפרטורה נעשית נמוכה יותר נעלמות הפלקטואציות בחלק מהחוליות החלשות הגבוהות. ככל שהטמפרטורה נעשית נמוכה יותר נעלמות הפלקטואציות בחלק מהחוליות החלשות נצפה בהתנגדות כל שהיא. ככל שממדי החוט יקטנו ההסתברות להתפתחות ערוצי הולכה נוספים קטנה ולכן ההתרחבות של מעבר הפאזה נמשכת לטמפרטורות נמוכות יותר. מכל האמור לעיל, ניתן קטנה ולכן ההתרחבות של מעבר הפאזה נמשכת לטמפרטורות נמוכות יותר. מכל האמור לעיל, ניתן רמיות בחוליות החולשות.

בסעיף הבא נתאר את השפעתו של שדה מגנטי חיצוני על התרחבותו של מעבר הפזה. כפי שנראה, בחוטים הנחשפים לשדה מגנטי, מוגברת השפעתן של הפלקטואציות התרמיות.

#### 3.4 השפעת השדה המגנטי על מעבר הפאזה בחוטי 3.4

התוצאות שנציג כעת קשורות במדידת ההתנגדות של חוטי ה-YBCO בנוכחות שדה מגנטי קבוע הניצב לפני החוט (מקביל לכיוון ציר-c) תוך ירידה בטמפרטורה. איור 3.3 מציג עקומות (R(T) של הניצב לפני החוט (מקביל לכיוון ציר-c) תוך ירידה בטמפרטורה. איור 3.3 מציג עקומות ( $T_{c,onset}$  בעוס שונים. ככל שהחוט מצוי בשדה מגנטי חוט גדול יותר תחילת מעבר הפאזה,  $T_{c,onset}$ , המייצג את מעבר הפאזה של הגרגירים, נדחק מעט לטמפרטורות נמוכות יותר ועד ל- 87.5 K עבור השדה המקסימלי של 7.5 (22 YBCO.



איור 3.3: עקומות R(T) שנלקחו בזרם מעבר של 2 μA עבור חוט ברוחב 500 nm בשדות מגנטיים ניצבים שונים. הפאנל הפנימי מציג אזור בו מתרחש חיתוך בין שתי עקומות.

לעומת זאת אזור מעבר הפאזה רגיש מאד לשדה החיצוני כך שהוא נמרח ככל שהשדה גדול יותר. מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות רגישים מאד לשדה חיצוני שכן מעל לשדה הקריטי הראשון ( $H_{cl} \sim 200 ~G$ ) קווי שטף (וורטקסים) חודרים לחוט ותנועה שלהם בחוט מתבטאת בהתנגדות. ככל שהשדה החיצוני גדל מספר הוורטקסים גדל ומעבר הפאזה נמרח. נזכיר כי בחוט קיים מנגנון של פלקטואציות תרמיות חזקות בחוליות החלשות המוגברות גם הן עם העלייה בשדה התורמות למריחה במעבר הפאזה נמרח. נזכיר כי בחוט קיים מנגנון של שהשדה החיצוני גדל מספר הוורטקסים גדל ומעבר הפאזה נמרח. נזכיר כי בחוט קיים מנגנון של שהשדה החיצוני גדל מספר הוורטקסים גדל ומעבר הפאזה נמרח. נזכיר כי בחוט קיים מנגנון של למריחה במעבר הפאזה. באום חזקות בחוליות החלשות המוגברות גם הן עם העלייה בשדה התורמות למריחה במעבר הפאזה איננה מונוטונית עם השדה כפי למריחה במעבר היחה במעבר הפאזה. באופן מפתיע, המריחה במעבר הפאזה איננה מונוטונית עם השדה כפי למריחה במעבר הידה מנוטונית עם השדה כפי שניתן לראות בפאנל הפנימי באיור 3.3. עקומות ה-(T) ייחותכותיי זו את זו כאשר השדה החיצוני נע מ- T 3 ל- T 5. חיתוך העקומות מרמז על ישיפוריי במוליכות העל עם העלייה בשדה בניגוד לציפייה כי שדה מגנטי יהרוס מוליכות-על. בסעיף הבא נתאר את היישיפוריי במוליכות-העל מזווית הייה אחרת, כשנציג עקומות מגנטו-התנגדות (magnetoresistance) בהן טמפרטורת המדידה קבועה ואילו השדה המגנטי משתנה. כפי שנראה באחד הסעיפים הבאים (סעיף 3.9) המגנטו-התנגדות יחודית בשדה המגנטי. הרקע המגנטו-התנגדותי בחוטי YBCO רותיה אומילו היחודית בשדה המגנטי. הרקע המגנטו-התנגדותי בחוטי YBCO רוסי אומין א א א הנושא של התיקי הבא.

#### YBCO רקע מגנטו-התנגדותי של חוטי 3.5

30-86K איור 3.5 מסכם בגרף חצי לוגריתמי את התפתחות הרקע המגנטי בטווח הטמפרטורות 30-86K בטווח שדות של T בטווח שדות של 5 T בטווח שדות של 5 T בטווח שדות של 5 T מציג מספר אנומליות ביחס לרקע המגנטי הצפוי כמו שבאיור 5.4 עבור השכבה, כפי שנפרט מייד. מציג מספר אנומליות ביחס לרקע המגנטי הצפוי כמו שבאיור 5.4 עבור השכבה, כפי שנפרט מייד. נציין כי התפתחות הרקע המגנטי המוצג באיור 5.5 מאפיין את כל חוטי ה-YBCO שנמדדו למעט הצר ביותר (80 mm).



איור 3.5: גרף חצי לוגריתמי של רקע מגנטי של חוט ברוחב 500 nm בטמפרטורות המצוינות באיור. זרם המדידה במדידות אלה הוא 2 µA.

מאיור 3.5 ניתן לראות בברור תלות שונה של ההתנגדות עם השדה בטווח השדות הנמוכים מאיור 3.5 ניתן לראות בברור תלות שונה של ההתנגדות עם השדה בטווח השדות הנמוכים הופכת לחלשה בטווח (±0.65 T) ובטווח השדות הגבוהים החזקה בשדה לשיפוע של הרקע המגנטי (|dR/d|H) בשדות השדות הגבוהים. תופעה נוספת, מפתיעה מאד, קשורה לשיפוע של הרקע המגנטי (|dR/d|H) בשדות הגבוהים, מעל T 2~. כפי שרואים באיור, השיפוע הולך וקטן עם הירידה בטמפרטורת המדידה עד

שבטמפרטורות נמוכות (T<50~K) הוא הופך לשלילי לאורך טווח שדות רחב. משמעותו של השיפוע השלילי מרמזת על התגברות של מוליכות על כתוצאה משדה חיצוני, דבר הנוגד את מאפייני השלילי מרמזת על התגברות של מוליכות על כתוצאה משדה חיצוני, דבר הנוגד את מאפייני מוליכות העל. עוד רואים באיור שהרקע המגנטי בטמפרטורות של 70 א 70 ומטה מלוות באוסילציות של ההתנגדות עם השדה הן בשדות הגבוהים והן בנמוכים. תופעה נוספת, אותה ניתן לראות של ההתנגדות עם השדה הן בשדות הגבוהים והן בנמוכים. תופעה נוספת, אותה ניתן לראות של ההתנגדות עם השדה הן בשדות הגבוהים והן בנמוכים. תופעה של מגנטו-התנגדות שלילית לראות היען לראות הביניים (למשל ב- 60~K) בשדות נמוכים היא הופעה של מגנטו-התנגדות שלילית בטמפרטורות הביניים (למשל ב- R(H)). היינו (R(0)) בשדות נמוכים היא הופעה של מגנטו-התנגדות שלילית לדומיננטית בחוטים הצרים. ההתנהגות המורכבת של הרקע המגנטי מצביעה על מעורבותם של מספר מנגנונים השולטים בטווח טמפרטורות ושדות שונים היכולים להסביר כל אחת מהאנומליות, כפי שנדון כעת.

#### רקע מגנטי בטמפרטורות גבוהות - דיון 3.6

הרקע המגנטי, (R(H), תלוי באופן ישיר בקצב הפלקטואציות של הפאזה המתגבר עם נוכחותו של שדה מגנטי, ולכן נצפה כי הרקע יגדל מונוטונית עם הגדלת השדה. בכדי לתאר את התפתחות הרקע המגנטי כפונקציה של השדה H, נשתמש בביטוי של Tinkham [23] המתאר כיצד תיראה עקומת (R(T) בנוכחות שדה מגנטי חיצוני קבוע כתוצאה מפלקטואציות תרמיות :

(1) 
$$R/R_n = \left\{ I_o \left[ A (1-t)^{3/2} / 2H \right] \right\}^{-2}$$

: כאשר

,modified Bessel function היא $-I_o$ 

, ההתנגדות בפאזה נורמלית לפני מעבר הפאזה -  $R_n$ 

,( $T_c=89.5\,K$  (בהמשך נשתמש בערך  $t\equiv T/T_c$ 

 $A \approx 3.5 J_{c0}$  בטמפרטורה  $J_{c0}$  כאשר  $J_{c0}$ , איז צפיפות הזרם הקריטית הנמדדת ב- $\left[A/cm^2\right]$  בטמפרטורה במעלות (G) והטמפרטורה במעלות שדה אפס. פרמטר ההתאמה A והשדה H הם ביחידות של גאוס (G) והטמפרטורה במעלות קלווין. הביטוי של Tinkham מנבא את התלות של ההתנגדות בשדה חיצוני קבוע תוך סריקה של הטמפרטורה [23]. בניסוי שלנו אנחנו סורקים את השדה בטמפרטורה קבועה. התחזית של Tinkham עבור הרקע המגנטי (H) מתוך משוואה (1) מודגמת באיור 3.6 עבור טמפרטורות נבחרות ביחס לטמפרטורות ביחס לטמפרטורה במינות ליחס לטמפרטורה נבחרות בניסוי שלנו אנחנו סורקים את השדה בטמפרטורה במפרטורה נבחרות בניסוי שלנו אנחנו סורקים את השדה בטמפרטורה נבחרות בניסוי ליחס לטמפרטורות בניסוי שלנו אנחנו סורקים את השדה בטמפרטורה במפרטורה בניסוי ליחס לטמפרטורה התחזית של החרות בניסוי ליחס לטמפרטורה הקריטית העורות נכחס לטמפרטורה הקריטית.



איור 3.6: גרף חסר ממדים של הרקע המגנטי כתלות בשדה המגנטי עבור טמפרטורות שונות (ממשוואה 1).

ניתן לראות מתוך הרקע המגנטי כי ככל שהטמפרטורה נמוכה יותר, שבירה של מוליכות העל מתרחשת בשדות גבוהים יותר והשדה הנדרש להוציא את הדגם ממוליכות על, הבא לידי ביטוי ברוויה של הרקע המגנטי, גבוה יותר.

ניסיונות להתאים את תוצאות המדידה של (R(H) למשוואה (1) לא צלחו. חוסר הצלחה זה איננו מפתיע; משוואה (1) מניחה כי המערכת מאופיינת בצפיפות זרם,  $J_{c0}$ , והתנגדות,  $R_n$ , יחידים איננו מפתיע; משוואה (1) מניחה כי המערכת מאופיינת בצפיפות זרם,  $J_{c0}$ , והתנגדות,  $R_n$ , יחידים והיא איננה מתאימה, איפא, לחוטים גרנולריים המכילים כאמור, התפלגות של חוליות חלשות בעלות  $T_c$  שונה ולכן, צפיפות זרם שונה. כדי להביא בחשבון התפלגות זו, אנו מניחים כי במערכת שלנו ניתן לחלק את התפלגות החוליות החלשות לשני מרכיבים דומיננטיים בעלי צפיפות זרם שלנו ניתן לחלק את התפלגות החוליות החלשות לשני מרכיבים דומיננטיים בעלי צפיפות זרם קריטי והתנגדות נורמאלית שונים. רכיב אחד יאופיין בצפיפות זרם קריטי נמוך וייקרא *הרכיב הרךיא הרכיב הרקיי*, וזה המאופיין בצפיפות זרם קריטי גבוהה יחסית ייקרא *יהרכיב* הקשה׳. הרכיב הרך בא לידי *הרךי*, וזה המאופיין בצפיפות זרם קריטי גבוהה יחסית ייקרא *יהרכיב* הקשה׳. הרכיב הרך בא לידי הר*יך*, וזה המאופיין בצפיפות הם קריטי גבוהה יחסית ייקרא *יהרכיב* הקשה׳. הרכיב הרך בא לידי גישוו שכן הן מתקבלת כתוצאה מפלקטואציות בחוליות של הרכיב הקשה כך שרכיב זה הוא הדומיננטי ברקע המתקבלת כתוצאה מפלקטואציות בחוליות של הרכיב הקשה כך שרכיב זה הוא הדומיננטי ברקע המגנטי. אנו מקבלים אם כך רקע מגנטי אחד לשדות הנמוכים והשני לגבוהים, לרכיב הרך והקשה, המתקבלת כתוצאה מפלקטואציות בחוליות של הרכיב הקשה כך שרכיב זה הוא הדומיננטי ברקע ממנטי. אנו מקבלים אם כך רקע מגנטי אחד לשדות הנמוכים והשני לגבוהים, לרכיב הרך והקשה, ממקבלת המגנטי. אנו מקבלים אם כן הערכת הגרנולרית המסובכת בעזרת שני רכיבים בלבד של weak

links. ואף על פי כן, המודל מצליח לתאר בקרוב את ההתנהגות הנצפית בניסיון. דוגמא להתאמה על ידי חיבור כזה מתוארת באיור 3.7 עבור הרקע המגנטי שנלקח בטמפרטורה של K



איור 3.7: רקע מגנטי ב- K 70. הקווים המקווקווים הכחול והירוק חולצו ממשווה 1. עבור הרכיב הרך (Soft) וקשה (Hard), בהתאמה. חיבור הרכיבם מודגם על ידי הקו המקווקו האדום (Sum). האזורים בהן ההתאמה מתרחקת מהנתונים (t 1 T) מייצגים אוסילציות שאינן חלק מהרקע המגנטי.

מתוך איור 3.7 ניתן לראות את הרקע המגנטי שצויר ממשוואה (1) עבור צפיפות זרם של  $R_n = 18\Omega$  התנגדות נורמאלית  $J_{co} = 5 \times 10^4 \, A/cm^2$  לרכיב הרך ועבור צפיפות זרם של  $J_{co} = 5 \times 10^4 \, A/cm^2$   $R_n = 122\Omega$  התנגדות נורמאלית,  $J_{co} = 5 \times 10^5 \, A/cm^2$  לרכיב הקשה. האיור גם מראה כיצד  $I_{co} = 5 \times 10^5 \, A/cm^2$  החיבור של שתי התרומות נותן רקע מגנטי המתאים בקירוב טוב למדידה. נציין כי האוסילציות החוליות החיבור של שתי התרומות נותן רקע מגנטי המתאים בקירוב טוב למדידה. נציין כי האוסילציות החיבור של שתי התרומות נותן רקע מגנטי המתאים בקירוב טוב למדידה. נציין כי האוסילציות החיבור של שתי התרומות נותן רקע מגנטי המתאים בקירוב טוב למדידה. נציין כי האוסילציות החוליות הינן חלק מהרקע ומשוואה (1) איננה מביאה אותן בחשבון. מטבע הדברים, התפלגות החוליות החלשות עשויה להיות עשירה יותר והצלחתה של ההנחה שניתן לתאר את המערכת עם שני אינן חלק מהרקע ומשוואה (1) איננה מביאה אותן בחשבון. מטבע הדברים, התפלגות החוליות הרכיבים בלבד היא מפתיעה. מכל מקום, התוצאות מספקות בכך שהן מאשרות את הקונספט איתו יצאנו לדרך, היינו החשיבות של הפלקטואציות התרמיות. עוד חשוב לציין שניתן לבצע את האנליזה של שני הרכיבים רק עבור טמפרטורות שמעל ל- א 50 ראינו כי הרכיב הקשה תורם לרקע המגנטי כל לעריזה כלומר את הנו מתוך הנתונים שבאיור 5.5 ניתן לראות כי מטמפרטורה של 50 ומטה אין כלל תרומה של השדה לרקע המגנטי (עד ל-5 T). בנוסף, הרוויה של הרקע המגנטי באזור 1.9 כלל תרומה של ההגעה של הרכיב הרך לסיומו כתורם להתנגדות כלומר ה.

להסביר רוויה כזו אך אינו יכול להסביר את היפוך הסימן של שיפוע הרקע המגנטי. בסעיף הבא נציע מנגנון המסביר את הרקע המגנטי בטמפרטורות נמוכות.

#### רקע מגטי בטמפרטורות נמוכות -דיון 3.7

התבוננות באיור 3.5 על התפתחות עקומת המגנטו-התנגדות עם הטמפרטורה באזור השדות הגבוהים (H>2T), מגלה כי עם הירידה בטמפרטורה מתמתנת העלייה בהתנגדות עם השדה ואפילו – בטמפרטורות נמוכות יותר – העלייה הופכת לירידה של ההתנגדות עם השדה. תלות מפתיעה זו המציגה שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות, (Negative magnetoresistance dR/dH < 0); (Negative magnetoresistance dR/dH < 0); המציגה שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות, פולי איז הפעלת שדה בשדות גבוהים. כזכור המציגה שיפוע התגברות של המגנטו-התנגדות, מולי של המגנטו-התנגדות, וותר – העלייה הופכת לירידה של ההתנגדות עם השדה. תלות מפתיעה זו המציגה שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות, וותר – העלייה הופכת לירידה לירידה של ההתנגדות העם השדה. תלות מפתיעה זו המציגה שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות, וותר – העלידה לירידה של הפעלת שדה בשדות גבוהים. כזכור המציגה ווים מנסינו באזור הטמפרטורות הנמוכות הרקע המגנטי נשבר באזור הנמוכות באזור השדות הגבוהים. ניתן לראות כי בטמפרטורות הנמוכות הרקע המגנטי נשבר באזור 1.9 T הנמוכות באזור השדות בטמפרטורה, ושיפועו משם הופך מחיובי לשלילי, בסתירה למאפייני מוליכות העל.

Morozov *et* ידי 10 T) נצפה (מעל ל-E) נאפה על ידי Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaO<sub>8+δ</sub> שיפוע שלילי של הרקע המגנטי בשדות גבוהים בהרבה (מעל ל-E) בגבישי c בין שכבות הגביש. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaO<sub>8+δ</sub> בגבישי [24] *al*. Morozov *et al*. 24] סענו כי ההולכה בכיוון c של מוליך-על עם סימטריה של wave מתרחשת בשני Morozov *et al*. ערוצי הולכה שונים של מנהור בין השכבות יערוץ של זוגות קופר וערוץ של קווזי חלקיקים. בהפעלת שדה מגנטי אפשרות למנהור של זוגות בין השכבות יורד ואילו זה של קווזי חלקיקים. בהפעלת שדה מגנטי אפשרות למנהור של זוגות בין השכבות יורד ואילו זה של קווזי חלקיקים דווקא עולה. אם כך, בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת שדה מגנטי אפשרות למנחיר של אוגות בין השכבות יורד ואילו זה של קווזי חלקיקים דווקא עולה. אם כך, בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת הם כך. בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת הם כך. בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת הם כך. בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת הם כך. בשדות הגבוהים ההולכה כתוצאה ממנהור של קווזי חלקיקים הוא הדומיננטי דרך שכבת הם כן. ההתנגדות יורדת של עולית השדה ומכאן מתקבל שיפוע שלילי של הרקע המגנטי [24].



איור 3.8: רקע מגנטי של חוט YBCO ברוחב S00 nm ברוחם 500 בטמפרטורות הנמוכות. הקו הכתום מציין את השיפוע, איור 3.8 dR/dH, הכללי של הרקע המגנטי בשדות הגבוהים. ניתן לראות כי העלייה המונוטונית של הרקע מתמתנת מאד בטמפרטורה של 50 K מעל 1.9 T בוהיא אפילו משנה סימן ב-40 K.

שיפוע שלילי של הרקע המגנטי בשדות גבוהים נצפה גם על ידי .[25] Gardner *et al* [25] בפילמים דקים מאד של עופרת ועל ידי .[26] Cordoba *et al* [26] בחוטי טונגסטן (W) וברשתות מבדיל דק מאד. מחברים אלה [25,26] הסבירו כי בגיאומטריה של חוט ההתנגדות תלויה מאד במוליכות-על המתפתחת בפני החוט (surface superconductivity) המסוגלת לדכא חדירה של שדה מגנטי חיצוני כאשר שדה חלש יחסית כבר חדר. התאוריה של Al מניחה דגם הומוגני ולא ברור אם ההסבר שניתן על ידם רלבנטי לחוטי ה-YBCO בגלל האופי הגרנולרי שלהם.

בכדי להסביר את השיפוע השלילי בחוטי ה-YBCO הגרנולריים אנו מאמצים את הרעיון הבסיסי של Morozov *et al.* [24] משייכים את האנומליה למנהור של קווזי חלקיקים בין גרעינים בלבד (בהמשך נציג חישובים תיאורטיים על בסיס הנחה זו). מקורם של הקווזי חלקיקים במקרה שלנו הוא מליבת הוורטקס הנורמאלית ולא משכבות ה- CuO<sub>2</sub> כמו במודל של Morozov *et al.* מכיוון שהאנומליה באה לידי ביטוי בטמפרטורות נמוכות, התרומה החיובית של פלקטואציות בחוליות החלשות לרקע המגנטי מגיעה לרוויה, קרי לערך קבוע. מרגע זה התרומה לרקע המגנטי היא של הקווזי חלקיקים באופן הבא: כאשר השדה המגנטי עולה, מספר הוורטקסים החודרים לגרעינים עולה ובהכרח מספר הקווזי חלקיקים וצפיפות המצבים עולים, ובכך מגבירים הולכה של קווזי חלקיקים דרך מנהור [27]. כתוצאה מכך, ההתנגדות הכללית יורדת ונוצר שיפוע שלילי ברקע המגנטי.

מצאנו ניסיונית שניתן לדכא את השיפוע השלילי ואף להעלימו לגמרי על ידי הפעלה של זרם מצאנו ניסיונית. איור 3.9 מעבר גדול יותר. איור 3.9 מדגים כיצד זרם מעבר של 20 μA מעבר גדול יותר.



ו- 2 μA איור 3.9: רקע מגנטי של חוט ברוחב 500 nm הנלקח ב-3 40 כאשר זרם המעבר הוא 2 μA (עקומה חומה) ו- 3.9 איור 2.9 עקומה ירוקה). ניתן לראות את דיכוי הרקע המגנטי השלילי על ידי הגדלת צפיפות הזרם.

ומוסיפה תרומה TAPS ההסבר לתופעה הוא כלהלן : עלייה בצפיפות הזרם מגבירה את קצב ה-TAPS ומוסיפה תרומה חיובית לרקע המגנטי, תרומה הממסכת את הירידה בהתנגדות של הקווזי חלקיקים. דיכוי השיפוע השלילי בעזרת העלאת זרם המעבר תומך במודל המנהור שהצענו.



איור 3.10: הרקע המגנטי בסקלה חצי-לוגריתמית של חוטים ברוחב של 200 nm (ירוק) ו- 500 (אדום) ב-T=20K בזרם מעבר של μA בזרם מעבר של

באיור 3.10 אנחנו מראים את הרקע המגנטי בדגמים של mm באיור 3.10 ו-200 באותו זרם מעבר של μA של 20 ברור מן הציור כי השיפוע השלילי לא קיים בדגם הצר. ההסבר לכך הוא כי צפיפות הזרם שבדגם הצר גדולה יותר ולכן תרומת ה-TAPS גדולה יותר.

באיור 3.8 (לדגם של nm 500 nm) רואים בברור ששדה המעבר לשיפוע שלילי איננו תלוי בטמפרטורת המדידה. באיור 3.11 אנו מראים שגם בחוט ברוחב של nm 200 mm בטמפרטורת המדידה. באיור 3.11 אנו מראים שגם בחוט ברוחב של  $\pm 2.3 \text{ T}$  לעומת 1.9 TAPS שלילי איננו תלוי בטמפרטורה אם כי שונה במקצת ( $1.3 \times 1.5 \pm 2.3 \text{ T}$  לעומת  $1.9 \times 1.5 \pm 2.3 \text{ T}$ , כצפוי מחוט (nm). שדה המעבר המעט גבוה יותר משקף תרומה חיובית חזקה יותר של ה-TAPS, כצפוי מחוט צר יותר שבו אינה יותר שבו 200 אינה איננו מחוטים).



איור 3.11: רקע מגנטי של חוט YBCO ברוחב 200 nm בטמפרטורות הנמוכות שנמדד בזרם של 2μA. השבירה איור 3.11: רקע מגנטי של חוט איור 4.2 עבור כל הטמפרטורות.

כפי שנראה בהמשך, הדגם הצר ביותר (80 nm) כלל לא הראה שיפוע שלילי. ההסבר לכך מבוסס על הממצא (איור 3.9) שהשיפוע השלילי נעלם אם מגדילים את צפיפות הזרם. ברור שצפיפות הזרם בדגם הצר היא הגבוהה ביותר, דבר הגורם להגברת ה-TAPS ולתוספת חיובית לרקע המגנטי הממסכת את התרומה השלילית של הקווזי חלקיקים.

לאחרונה פורסמו חישובים תיאורטיים [28] על בסיס הנחות דומות לאלה שהצענו, תוך (jj - Josephson junctions) הסתכלות על המערכת הגרנולרית כמערך דו-ממדי של צמתי ג׳ווּפסון כמודגם באיור 3.12.



החישובים מבוססים על תיאור תלות הפאזה בזמן ובמרחב בצמתי ג׳וזפסון בעזרת הרחבה של פונקציית sine-Gordon. המשוואות המורחבות כוללות איבר צמיגות הגדל ליניארית עם השדה המגנטי. משוואת sine-Gordon המתארת את הפאזה בצומת ג׳וזפסון כתלות במקום ובזמן, הורחבה בכדי שתכלול איבר צמיגות הגדל ליניארית עם השדה. איבר זה מופיע כתוצאה מעלייה במספר הקווזי חלקיקים העולה כתוצאה מעליית מספר הוורטקסים עם העלייה בשדה. הכללת איבר זה, מביא למצב של שיפוע מגנטי שלילי כאשר האינדוקציה בצומת כתלות בשדה החיצוני עוברת מהתנהגות סוליטונית לאמפליטודת גל גדולות [28]. התוצאה החשובה של התאוריה היא ששדה מעבר זה מוגדר על ידי הגיאומטריה בלבד ולכן אינו תלוי בטמפרטורה. התנהגות זו מאפיינת את המגנטו-התנגדות טמפרטורות הנמוכות מכיוון שבטמפרטורות אלה, תרומת הוורטקסים של Abrikosov עד כאן טיפלנו ברקע של המגנטו-התנגדות. עם זאת, ברור מכל התוצאות שהצגנו למעלה (איורים 3.5-3.11) שברוב תחומי הטמפרטורות והשדות, המגנטו-התנגדות מציגה אוסילציות שירוכבותי על הרקע. באוסילציות אלה נטפל בסעיף הבא.

#### 3.8 אוסילציות של ההתנגדות כתלות בשדה

עבור כל החוטים שמדדנו, ההתנגדות מאופיינת ע״י אוסילציות (כפונקציה של השדה) הירוכבותי על הרקע המגנטי. בהמשך נראה כי אוסילציות אלה מוכתבות מאופיו הגרנולרי של החומר בשילוב הגיאומטריה של החוט ונציג את ההתנהגות האוסילטורית של חוטי ה-YBCO ברוחב של mm 200 nm

איור 3.13 מציג ב-4 פאנלים שונים (a-d), בסקאלות התנגדות שונה לכל פאנל בהתאם איור 3.13 מציג ב-4 פאנלים שונים (a-d), בסקאלות התנגדות שונה לכל פאנל בהתאם לטמפרטורת המדידה, את האוסילציות הירוכבותי על הרקע המגנטי של חוט ברוחב 500 nm לטמפרטורת כי עד 60 K האוסילציות לאורך טווח של 5T. ב-70 הרקע המגנטי מפסיק להיות אוסילטורי באזור 3T וב-80K האוסילציות כלל לא קיימות. הקווים האנכיים מפסיק להיות אוסילטורי באזור 3T וב-80K האוסילציות (מינימום או מקסימום) בכמה מן התדרים בציור מבליטים את העובדה שמיקום האוסילציות (מינימום או מקסימום) בכמה מן התדרים הבולטים מופיע באותם שדות ללא תלות בטמפרטורה אם כי באמפליטודה שונה.



איור 3.13: התפתחות הרקע המגנטי של חוט ברוחב של 500 nm שנמדד בזרם של 2 μA בטווח שדות של 5T ±.
הנתונים מחולקים לפאנלים שונים כך שניתן להבחין בהתפתחות הרקע המגנטי בטמפרטורות שונות (a): הנתונים מחולקים לפאנלים שונים כך שניתן להבחין בהתפתחות הרקע המגנטי בטמפרטורות שונות (a): הטמפרטורות הנמוכות 30-50K (b): א 80 K (c) 70 K (c) 60 K (c).
איור גיתן לראות כי הרקע המגנטי הטמפרטורות הנמוכות 30-50K (c) הקווים האנכיים המקווקווים והרציפים מדגישים מלווה באוסילציות של ההתנגדות למעט ב-1.2 (c) והנמוכים (0.12 ). הקווים האנכיים המקווקווים והרציפים מדגישים את המחזוריות בשדות הגבוהים (2 ג -0.12 ) והנמוכים (0.12 ).

כפי שניתן לראות בציור, התמונה האוסילטורית סימטרית סביב האפס ועשירה מאד במחזורי שדה שדה. חלוקה לטווח שדות גבוהים ונמוכים כפי שעשינו בסעיפים הקודמים, תבליט מחזורי שדה דומיננטיים: מחזוריות שדה של כ-1T (קו מקווקו) ו-0.12T (קו רציף) באזור השדות הגבוהים והנמוכים, בהתאמה. בטווח המחזור הגדול ניתן להבחין במחזורי שדה פנימיים רבים. כפי שנסביר והנמוכים, בהתאמה. בטווח המחזור הגדול ניתן להבחין במחזורי שדה פנימיים רבים. כפי שנסביר כפי שנסביר שדה מחזורי שדה מחזוריות שדה של כ-1T (קו מקווקו) ו-0.12T (קו רציף) באזור השדות הגבוהים והנמוכים, בהתאמה. בטווח המחזור הגדול ניתן להבחין במחזורי שדה פנימיים רבים. כפי שנסביר הכמשך, מחזורי השדה נצפים בשל אופיו הגרנולרי של החוט. איור 3.14 מבליט מחזוריות שדה של כ-12T בהמשך, מחזורי השדה נצפים בשל אופיו הגרנולרי של החוט. איור 3.14 מבליט מחזוריות שדה של כ-12T בהמשך מחזורי השדה נצפים בשל אופיו הגרנולרי של החוט. איור 3.14 מבליט מחזוריות שדה של כ-12T בהמשך מחזורי השדה נצפים בשל אופיו הגרנולרי של החוט. איור 3.14 מבליט מחזוריות שדה של כ-12T באמשך השדות הנמוכים הנמדד ב-10 ליתן להבחין כי בטמפרטורה זו ההתנגדות יורדת כ-12T כ-12T באזור השדות הנמוכים הנמדד ב-10 להבחין כי בטמפרטורה זו המנגדות (מוכדת כששר השדה עולה עד ל-0.00 (תופעה זו של מגנטו-התנגדות שלילית (מתוכים) כאשר השדה עולה עד ל-0.00 (תופעה זו של מגנטו-התנגדות שלילית (מתוכים) כשר המשך.



איור 3.14: אוסילציות של ההתנגדות בטווח השדות הנמוכים של חוט ברוחב 500 nm. הקווים המקווקווים מציינים נק׳ מינימום סמוכות המציינות מחזור שדה של T.

200 אוסילציות דומות נצפו גם כאשר רוחב הדגם קטן יותר, כפי שנציג כעת עבור חוט ברוחב של 200 אוסילציות דומות נצפו גם כאשר רוחב הדגם קטן יותר, כפי שנציג כעת עבור חוט ברוחב מעבר היה .nm .nm איור 3.15 מראה את התפתחות הרקע המגנטי של חוט ברוחב 200 משר זרם המעבר היה .nm 200 מראה את התפתחות הרקע המגנטי של חוט ברוחב μΑ נבומה לחוט ברוחב שדות.



2 איור 3.15: אוסילציות של ההתנגדות ה׳רוכבות׳ על הרקע המגנטי בחוט ברוחב של 200 mm שנמדד בזרם של μΑ בטווח שדות של 5T ±. הנתונים מחולקים לפאנלים שונים כך שניתן להבחין בהתפתחות הרקע המגנטי בטמפרטורות שונות (a): הטמפרטורות הנמוכות 20-40K. (b): 20-40K (c): 30-80 K. מתוך האיור ניתן לראות כי הרקע המגנטי מלווה באוסילציות של ההתנגדות למעט ב-T=80 K. הקווים האנכיים המקווקווים והרציפים מדגישים את המחזוריות בשדות הגבוהים (T-80 ) והנמוכים (2.0-70) בהתאמה.

גם עבור חוט זה (200 nm) חוזק (אמפליטודת) האוסילציה תלוי בטמפרטורה, אבל מיקומה בשדה דומה לכל הטמפרטורות. מחזורי השדה הקטנים יותר מתמעטים ומתקבלת תמונה אוסילטורית מעט ברורה יותר מזו שראינו בחוט הרחב יותר (m m) לזיהוי מחזורי שדה. גם כאן נבחין בין מעט ברורה יותר מזו שראינו בחוט הרחב יותר (m m) לזיהוי מחזורי שדה. גם כאן נבחין בין אזורי השדות הגבוהים והנמוכים באפיון האוסילציות. ניתן לזהות מחזורי שדה של 0.3 ושל 0.3 T באזור השדות הגבוהים והנמוכים באפיון האוסילציות. ניתן לזהות מחזורי שדה של T 1.5 אזורי השדות הגבוהים (קווים מקווקווים) ובאזור השדות הנמוכים (קווים רציפים). כאמור, התפתחות הרקע המגנטי דומה מאד באופן איכותי לחוט הרחב יותר. גם בחוט ברוחב של 1.50 m התפתחות הרקע המגנטי דומה מאד באופן איכותי לחוט הרחב יותר. גם בחוט ברוחב של המאר את התפתחות הרקע המגנטי דומה מאד באופן איכותי לחוט הרחב יותר. גם בחוט ברוחב של המסט המגנטו-התנגדות שלילית בשדות נמוכים כפי שניתן לראות באיור 3.16. האיור מתאר את המגנטו-התנגדות של החוט ברוחב 1.50 אורי 1.50 המוכים, מראה שעם הפעלת השדה (ועד לשדה של 1.50) ההתנגדות יורדת.



איור 3.16: אוסילציות של ההתנגדות בטווח השדות הנמוכים של חוט ברוחב 200 nm המדגים מגנטו–התנגדות שלילית ב-3.16 עד לשדה של 50 Oe.

בשני החוטים, nm החוטים, 200 nm ו-200 האוסילציות דומה מאד בכך שבחוטים אלה בשני החוטים, האוסילציות מלוות את התפתחותו של הרקע המגנטי בטווח רחב של טמפרטורות ושדות ומופיעות האוסילציות מלוות את התפתחותו של הרקע המגנטי בטווח רחב של טמפרטורות ושדות ומופיעות האוסילציות מתחת ל-30 את התפתחותו של הרקע המגנטי בטווח רחב של טמפרטורות ושדות ומופיעות האוסילציות מתחת ל-30 את התפתחותו של הרקע המגנטי בטווח רחב של טמפרטורות החוטים החוטים האוסילציות החוטים, מחוטים אלה האוסילציות מאד בכך שבחוטים אלה האוסילציות מחוטים, מחוטים, מחוטים, מחומים, מחומים, מחוסים אלה האוסילציות מאד החוטים, מחומים, מ

אוסילציות במגנטו-התנגדות, בטווח גדול של שדות וטמפרטורות, נצפו בעבר במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות. הראשונים לדווח על התופעה היו Herzog ו-Herzog במדידות שערכו בחוטים גרנולריים של בדיל [29]. האוסילציות יוחסו להתפתחות של לולאות קוהרנטיות-פאזה בגרגירים סמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות חלשות, weak שמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות לולאת זרם סמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות אות הלשות, herzog שמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות הלשות, weak שישריד הבין הגרגירים סמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות הלשות, herzog שמוכים עם הירידה בטמפרטורה. האזורים בין גרגירים סמוכים יוצרים חוליות הלשות, ולשת זרם סמוכים עם הירידה בטמפרטורה. העד העל באזורים אלה מתפתחת כצומת גיוזפסון ומאפשרת לולאת זרם קוהרנטית פאזה. בלולאות אלה מתפתחים זרמי מיסוך מחזוריים עם השדה, כתוצאה מאוסילציות של סד, כפי שהוסבר עייי ( $P_p$ , בלולאות אלה שרז העד השדה, [G]. מחזור השדה, [G]. מחזור השדה, הידי הקשר הבא (נתון על ידי הקשר הבא (ב,31) ביז המנכחים הידידה ביז הידי מיסוך מחזור השדה, [T, בלולאות אלה נתון על ידי הקשר הבא (ב,31) ביז הידית של הדידית עם השדה, כתוצאה מאוסילציות של אות אלה מתון על ידי הקשר הבא (ב,31) ביז הידית הידית הידית הידית הידית הידית הידית ביז הידית הידיית

$$H_{period} = \Phi_0 / S$$

. כאשר  $S_0 = 2*10^{-7} [Gcm^2]$  הוא השטף המגנטי המקוונטט ו-  $\Phi_0 = 2*10^{-7} [Gcm^2]$ 

גם בחומר הגרנולרי שלנו אנו מייחסים את מקורן של אוסילציות בהתנגדות כתלות בשדה המגנטי בהיווצרותן של לולאות קוהרנטיות בפאזה (phase coherent loops) [29], כך שזרם מיסוך מחזורי עם השדה מתפתח בלולאות אלה. הלולאות הקוהרנטיות בפאזה מורכבות מגרעינים שבינם מחזורי עם השדה מתפתח בלולאות אלה. הלולאות הקוהרנטיות בפאזה מורכבות מגרעינים שבינם קיימות חוליות חלשות. איור 3.17 מדגים כיצד בגרגירים סמוכים קוהרנטיים בפאזה יכולים להתפתח זרמי מיסוך מחזוריים כאשר שדה חיצוני במאונך ולתוך הדף. כאמור, החוליות החלשות רגישות לפלקטואציות בפאזה ולכן שדה מגנטי, טמפרטורה וזרם מעבר משפיעות חזק על החוליות החלשות החלשות ועלולים להרוס לולאות קוהרנטיות. בטמפרטורה וזרם מעבר משפיעות חזק על החוליות החלשות החלשות ועלולים להרוס לולאות קוהרנטיות. בטמפרטורה וורם מעבר משפיעות חזק על החוליות החלשות החלשות ועלולים להרוס לולאות קוהרנטיות. בטמפרטורה וורם מעבר משפיעות חזק על החוליות החלשות וניות לפלקטואציות באופן ההחלשות ועלולים להרוס לולאות קוהרנטיות. בטמפרטורה וורם מעבר משפיעות חזק על החוליות החלשות וניו גנולים להרוס לולאות קוהרנטיות. בטמפרטורה נתונה, קצב הפלקטואציות באופן החלשות הלוות נגודל הזרם בלולאה ולכן הזרם המחזורי מווסת את קצב הפלקטואציות באופן שהזגנו: בטמפרטורות הגבוהות קצב הפלקטואציות גבוה מאד ולכן יותר חוליות חלשות נהרסות שהצגנו: בטמפרטורות הגבוהות קצב הפלקטואציות גבוה מאד ולכן יותר חוליות חלשות נהרסות שהצגנו: בטמפרטורות הגבוהות קב אוסילציות כלל (כמו ב-80 עבור שני החוטים שהצגנו (מת 200 חת)). בטמפרטורות הנמוכות (T<30 אוסילציות גם בשדה המגנטי החיצוני מנוכים ולכן גם בטמפרטורות אלה נקבל דיכוי של האוסילציות. עלייה בשדה המגנטי החיצוני מגבירה את קצב הפלקטואציות ולכן בשדות הגבוהים רואים אוסילציות גם מגבית היציה למוכיות גם מגנטי החיצות גםימות מנוכית (גוכות גם אוקני היום גם מגנטי החיצוני מנוכים ולכן גם בטמפרטורות אלה נקבל דיכוי של האוסילציות גם בטמפרטורות מגנטי החיצוני

מנגנון הלולאות הקוהרנטיות בגרגירים מסביר מדוע בחוט הצר יותר מחזורי השדה של האוסילציות ברורות יותר; ככל שהחוט צר יותר קיימות פחות אפשרויות למסלולים קוהרנטיים ולכן ידוכאו מחזורי שדה המופיעים רק בחוטים הרחבים יותר. בטמפרטורות הביניים (40-70 K) קצב הפלקטואציות המחזורי בא לידי ביטוי באוסילציות בכל טווח השדות אך אמפליטודת\גודל האוסילציות *∆R* תלוי בטמפרטורה.



איור 3.17: לולאת זרם מחזורית המתפתחת בלולאה קוהרנטית-פאזה. כיוון השדה החיצוני הוא במאונך ואל תוך הדף.

3.18 לדיון על גודל האמפליטודה נסתכל על האוסילציות שנצפו בחוט ברוחב של nm 200 איור 3.18 מציג את התפתחות הרקע המגנטי של החוט ברוחב nm 200 כאשר מכל עקומה מוחסרת ההתנגדות בשדה אפס. בהצגה זו ניתן לראות כיצד גודל האמפליטודה משתנה עם הטמפרטורה בכל טווח השדות. האיור מראה בברור שגודל אמפליטודת האוסילציות עבור שדה מגנטי מסוים מקבל ערך מקסימאלי בטמפרטורה של 60 אודע בטמפרטורות גבוהות ונמוכות ממנה. איור 3.19 מסכם את אמפליטודת האוסילציה ביחד 2010 של החוט מענה. איור 1.09 מסכם את את אמפליטודת האוסילציה בשדה של 1.09 של החוט.



איור 3.18: התפתחות הרקע המגנטי עם הטמפרטורה של החוט ברוחב nm 200, כאשר מכל עקומה המייצגת טמפרטורה מסוימת הוחסר ערך ההתנגדות בשדה אפס. הפאנל הפנימי מדגיש את המגנטו-התנגדות השלילית.

ניתן לראות בציור שגודל האמפליטודה,  $\Delta R$ , תלוי בקצב שינוי ההתנגדות עם הטמפרטורה, Little-Parks כך שככל שהשינוי מתמתן גודל האוסילציה קטן. במונחים של אוסילציות dR/dTגודל האמפליטודה קשור ב- dR/dT באופן הבא [30] :

$$(3.1) \quad \Delta R = \Delta T_c \, \frac{dR}{dT}$$

ממשוואה  $3.1 \, \mathrm{crr}(dr)$  קטן ניתן, איפא, לייחס ממשוואה  $3.1 \, \mathrm{crr}(dr)$  קטן ניתן, איפא, לייחס את מנגנון האוסילציות שלנו לשינויים ב-Tc בשילוב מנגנון הפלקטואציות המחזוריות באופן הבא קיימת התפלגות של חוליות חלשות בין הגרגרים היכולות להתאפיין בהתפלגות של טמפרטורות קריטיות שונות, ולכן עם הירידה בטמפרטורה שינויים ב-Tc נמוכים יותר גורמים לאוסילציות.



איור (נק׳ אדומות) איור עם גודל האמפליטודה (נק׳ אדומות) איור R(T) של חוט ברוחב R(T) של חוט ברוחב בטמפרטורה.

ראינו כי עבור החוטים ברוחב של 1200 nm 200 ו-200 nm התפתחות של רקע מגנטי- ראינו כי עבור החוטים ברוחב של 100 m מגנטי שלילי ובחלק מהטמפרטורות מתקבלת מגנטו- מגנטי שלילי ובחלק מהטמפרטורות מתקבלת מגנטו- התנגדות שלילית (negative magnetoresistance), R(H=0) > R(H>0), כפי שמופיע באיורים 3.13 ו-3.15. מסתבר, כי כאשר החוט הנמדד הוא צר מאד אופי האוסילציות משתנה דרמטית ודווקא צורת המגנטו-התנגדות השלילית הופכת לדומיננטית כפי שנרחיב בסעיף הבא.

## מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית 3.9 (periodic negative magnetoresistance)

בסעיפים הקודמים תארנו את האוסילציות בדגמים הרחבים יחסית. כאשר חוט ה-YBCO צר מאד (איור 80 nm) הרקע המגנטי מלווה באוסילציות ייחודיות. איור 3.20 מציג את התפתחות עקומת הרקע מגנטי עם הטמפרטורה ב-T=70 K, 65 K, 58 K כפי שנמדדו בחוט ברוחב



איור 3.20 התפתחות רקע מגנטי (R(H)) של חוט ברוחב 80 m בטמפרטורות איור 3.20 התפתחות רקע מגנטי ( $t \in R(H)$ ) של חוט ברוחב שונות הדומות בעקומות השונות. של T  $\pm 2$  . הקווים המקווקווים מדגישים את תבנית האוסילציות הדומות בעקומות השונות.

בטווח שדות של 2 T בטווח שדות של 2 ב תוך מעבר זרם של 5 μA. מתוך האיור ניתן לראות כי ההתנגדות של הרקע המגנטי תלויה באופן חלש בשדה החיצוני. מכיוון שהרקע המגנטי כמעט לא מושפע מהשדה המגנטי תלויה באופן חלש בשדה החיצוני. מכיוון שהרקע המגנטי כמעט לא מושפע מהשדה החיצוני, לאוסילציות יש תבנית מחזורית ייחודית כפי שמתואר באיור 3.21 עבור 55 K ניתן להבחין באיור כי בטווח השדות שבין 1.5 T נוצרת תבנית אוסילטורית שולטת בצורת שרלק התחתון של האוסילציות ובצורת M



65 K איור 3.21: מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית על עקומת (R(H) של חוט ברוחב 80 nm בטמפרטורה של איור 3.21: מגנטו-התנגדות שלילית מחזורית על עצמה עד שדה של כ-1.2 T.

מתוך האיור אפשר גם לראות מגנטו-התנגדות שלילית עד לשדה של כ-500 G. ברור גם מן האיור periodic negative ( מחזורית מחזורית ( Little Parks שהמגנטו-התנגדות אוסילטורית נזכיר, שבמתכונת אוסילציות Little Parks אין התייחסות למגנטו-התנגדות שלילית.

מגנטו-התנגדות שלילית (NMR) נצפתה בעבר במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות. דוגמא לכך מתוארת באיור 3.22 הלקוח ממדידות שערכו Herzog ו-32] [32] בחוטי עופרת אמורפיים. האיור מראה בצורה ברורה את האנומליה: בין שדה אפס לשדה של כ-2 kOe ההתנגדות יורדת. ניתן למצוא בספרות הסברים שונים ל- NMR שנצפה במוליכי-על בטמפרטורת נמוכות. אחד ההסברים מתבסס על ההנחה שבדגם יש זיהומים מגנטיים [33,34]; שדה מגנטי חיצוני גורם לקיטוב ספינים, קיטוב המקטין את הסיכוי לפיזור זוגות אלקטרונים ובכך מפחית את ההתנגדות. כיון שבחוטי ה-YBCO שלנו לא ידוע על זיהומים מגנטיים הסבר זה כנראה שאיננו רלבנטי עבורנו.



איור 3.22:מגנטו-התנגדות שלילית שנצפתה בחוטי עופרת אמורפים [32]. ההתנגדות השלילית מופיעה רק ליד שדה אפס והיא איננה חוזרת על עצמה בשדות הגבוהים יותר.

הסבר אחר הוצע על ידי Spivak ו-35,36] Kivelson (35,36]. ההסבר מבוסס על הרעיון שבמערכת המאופיינת באי סדר גבוה שילוב של פלקטואציות חזקות ושדה מגנטי יכולים ליצור זרמי ג׳וזפסון שליליים ספונטאניים המקטינים את המתח שבין צמד גרגירים. ההסבר של Kivelson ו-Spivak ו-Sitr-superconductor/insulator יוחסה ל-NMR המתרחשת ליד המעבר ממוליך-על למבודד (Sitr-superconductor/insulator vinon ליוחסה ל-32,35,36] (transition שחוטי ה-32,25]. נדגיש כי ההסבר של Sitr-superconductor/insulator איננו רלבנטי לתוצאות שלנו כיון שחוטי ה-YBCO שהראו NMR (מצאים יעמוקי בתוך הפזה מוליכת העל, ראה

יותר מכך, במקרה של חוט ה-YBCO הופעת ה-NMR אינה יחד פעמיתי כמו בכל המדידות האחרות (ראה, למשל, איור 3.22 המתאר את התוצאות בעופרת) אלא חוזרת על עצמה. כלומר, ה-NMR הוא חלק מההתנהגות האוסילטורית שמקורה כאמור בלולאות קוהרנטיות בפאזה של הגרגירים. מסיבה זו, ההסברים ל- NMR שתיארנו למעלה, כמו גם הסברים אחרים הנמצאים בספרות [37-40] אינם רלבנטיים לתוצאות שלנו. נחזור לנקודה חשובה זו בהמשך. קודם לכן, נאפיין את המחזוריות של האוסילציות.

איור 3.23 מציג אנליזת פורייה (FFT) עבור החוט ברוחב 80 mm איור 3.25 מציג אנליזת פורייה (הת $H_{period}$  עבור החוט ברוחב בטמפרטורה, ומתאימים להבחין בשני תדרים דומיננטיים של שדה,  $1/H_{period}$ , שאינן תלויים בטמפרטורה, ומתאימים למחזורי שדה של 2200 סני



איור 3.23: אנליזת פורייה (FFT) לאוסילציות של ההתנגדות עם השדה בחוט ברוחב 80 nm עבור שלוש טמפרטורות שונות. הקו המקווקו האנכי מציין את שני מחזורי השדה העיקריים.

בהנחה כי גם בחוט זה מחזוריות השדה של האוסילציות קשורה בקוהרנטיות הפאזה בלולאות של גרגירים, ניתן להעריך את גודל הלולאה גרגיר מתוך הקשר [7,31]:

$$H_{period} = \Phi_0 / S$$

כאשר  $[Gcm^2] = 2*10^{-7} [Gcm^2]$  הוא קוונט שטף מגנטי ו- S הוא שטח הלולאה, כאשר במקרה של voids לולאת גרגירים ניתן לומר כי בקרוב שטח זה שווה לשטח של void אחד. גדלי ה- voids מתוך מחזורי שדה של 2200 Oe ו-2200 Oe הם 95 nm כל בהתאמה, גדלים המתאימים לגדלים מחזורי שדה של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים מציעה האופייניים של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים מציעה סגופייניים של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים מציעה האופייניים של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים מציעה סגופייניים של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים מציעה האופייניים של השכבה וכן לרוחב החוט. ההתאמה של מחזורי השדה לגדלים הגיאומטריים בעיעה כתנית סגינית של המונרי השדה לגדלים הגיאומטריים בלומר, אוסילציות האסילציות העקומת שנתייחס, בשלב ראשון, לאוסילציות אלה כאוסילציות קוהרנטיות השדה גודלים מציג את עקומת כתוצאה מזרמי מיסוך מחזוריים בלולאות קוהרנטיות (29,30). איור 3.24 מציג את עקומת ההתנגדות כתלות בטמפרטורה, (R(T), של החוט יחד עם גודל אמפליטודת האוסילציה כתלות בטמפרטורה.



איור R(T) (בכחול) עקומת (R(T) של חוט ברוחב 80 nm שנמדדה בזרם מעבר של R(T) הנקודות החומות איור איור איור גבחול האמפליטודה,  $\Delta R$ , של האוסילציות המחזוריות (באזור השדות הנמוכים) כפונקציה של הציינות את גודל האמפליטודה,  $\Delta R$ , של האוסילציות המחזוריות (באזור השדות הנמוכים) כפונקציה של המפרטורה. הקו המנוקד העובר בין הנקודות החומות הוא קו עזר (guide for the eye).

80 K-3 של החוט מאופיינת בנפילה חדה של ההתנגדות עד לטמפרטורה של כ-R(T) ומשם ירידה הדרגתית כלומר, dR/dT קטן ושם מתרחשות האוסילציות. כפי שהוסבר בסעיף 3.9, מנגנון האוסילציות קשור במחזוריות קצב הפלקטואציות בחוליות החלשות כתוצאה מזרמי מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K > 30) קצב הפלקטואציות בחוליות החלשות כתוצאה מזרמי מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K > 30) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל לא מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K > 30) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל לא מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K > 30) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל לא מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K > 30) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל לא מיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K = 7) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל לא המיסוך מחזוריים. בטמפרטורות הגבוהות (80 K = 7) קצב הפלקטואציות גדול מאד כך שכלל א גוצרות לולאות קוהרנטיות כאשר קצב הפלקטואציות בחוליות החלשות מחזורי עם השדה (כפי שהסברנו לעיל) ומייצר אוסילציות של ההתנגדות. ירידה נוספת של הטמפרטורה מדכאת את הפלקטואציות כליל וכן את האוסילציות לים הנגדות. ירידה נוספת של הטמפרטורה מדכאת את הפלקטואציות כליל וכן את האוסילציות גם כאן ננסה להשתמש במודל של Little-Parks בכדי להסביר את (30 K = 30). גודל האמפליטודה נתון לאוסילציות במודל במודל של נוד בשינויים של דר ומודגשים ליד דר.

(3.1) 
$$\Delta R = (dR/dT)\Delta T_c$$

: [7] (dirty limit-) ,  $\Delta T_c$  , והשינוי בטמפרטורה הקריטית, והשינוי

(3.2) 
$$\Delta T_c = 0.18T_c(\xi_0 \ell / r^2)$$

-אורך הקוהרנטיות בטמפרטורה אפס של 2*nm* YBCO אורך הקוהרנטיות בטמפרטורה אפס של 10*nm* [41], ו- $\ell$ ,  $\xi_0 \sim 2nm$  YBCO אופייני, ו-r הוא מסדר גול של רדיוס (41] אורך 10*nm* . $r \sim 25 nm$  אורך הוא רדיוס אופייני, כלומר void

נשים לב כי ממשוואה 3.1 ככל ש- dR/dT גדול יותר כך גודל האמפליטודה גדל, ואילו בחוט ה-ORC כאשר YBCO גבוה (ליד T<sub>c</sub> - C) כלל אין אוסילציות. בנוסף, גודל האמפליטודה גדל כאשר AR/dT לשער T<sub>c</sub> בכדי להשתמש במודל Little-Parks עלינו לומר כי קיימת התפלגות של סמפרטורות קריטיות הנובעות מהתפלגות של חוליות חלשות ובכל חוליה חלשה שינויים ב-T<sub>c</sub> סמפרטורות קריטיות הנובעות מהתפלגות של חוליות חלשות ובכל חוליה חלשה שינויים ב-dR/dT את  $C_c = 65K$  קטואציות. על פי הנחות אלה, אם נרצה, לדוגמא, לחשב קשורים בשינויים המחזוריים של קצב הפלקטואציות. על פי הנחות אלה, אם נרצה, לדוגמא, לחשב  $T_c = 65K$  ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  עבור  $T_c = 65K$  עבור  $\Delta T_c = 65K$  את (T = 65K) ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את (T = 65K) ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את העבור  $T_c = 65K$  ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את (T = 65K) את נרצה, לחשב משואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את העבור  $T_c = 65K$  ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את (T = 65K) את נותר כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את (T = 65K) ממשואה 2.5 כי  $\Delta T_c = 0.5184 K$  את (T = 65K) את גוור אלה, אם נרצה דומה לממצא ממצא ממשואה כי של א 5.5 את הומה לממצא ממצא ממצא ממפרטורה קריטית של א 6.5 אינו מניחים כי עבור טמפרטורה זו החוליות החלשות מצטרפות ללולאה הקוהרנטית המייצרת אנו מניחים כי עבור טמפרטורה זו החוליות החלשות מצטרפות ללולאה הקוהרנטית המייצרת אוסילציות.

למרות שניתן לייחס אוסילציות אלה להיווצרות ״טבעית״ של לולאות קוהרנטיות בגרגירים למרות שניתן לייחס אוסילציות אלה להיווצרות ייטבעית״ של לולאות קוהרנטיות בגרגירים דרך חוליות חלשות והפיסיקה המתארת אותן היא כמו בניסוי LP. הופעת מגנטו-התנגדות שלילית <u>מחזורית</u> כמתואר באיור 3.21 עבור 3.21 (ולא ירידה חד-פעמית בהתנגדות כמתואר באיור 3.22 עבור מוליכי-על קונבנציונליים) היא תופעה חדשה שנצפתה לראשונה בעבודה זו. ההסברים 3.22 עבור מוליכי-על קונבנציונליים) היא תופעה חדשה שנצפתה לראשונה בעבודה זו. ההסברים שהוצאו בעבר לתופעה של סונבנציונליים היא תופעה חדשה שנצפתה לראשונה בעבודה זו. ההסברים להסביר את המחזוריות. כדי שהוצאו בעבר לתופעה של סימטים היא תופעה חדשה שנצפתה לראשונה בעבודה זו. ההסברים שהוצאו בעבר לתופעה של סונבנציונליים המצמובים המסובים המסובים המסובים להסביר את המחזוריות. כדי להסביר את התופעה אנחנו מניחים כי המגנטו-התנגדות השלילית קשורה באופיו של ה-YBCO כבעל סימטרית שמערים לוגות קופר המסוגל לייצר צומת ג׳וזפסון-π. צומת זו, כמו גם צמתים ירגילים׳ (ג׳וזפסון-0), יוצרים SQUIDs האחראים לתופעות המחזוריות. על מודל זה נרחיב בסעיף הבא.

## 3.10. מודל למגנטו-התנגדות שלילית; YBCO ב- SQUIDs π ו- 0

בסעיף 3.9 הבאנו את ההסבר של Spivak ו-Rivelson שייחסו את המגנטו-התנגדות השלילית להסתברות שבמוליכי-על גרנולריים קיימת התפלגות של זרמי ג׳וזפסון חיוביים ושליליים. ההסבר שלהם תקף ליד ה- SIT ולכן איננו רלבנטי לדגמים שלנו [35,36]. בכל אופו, במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות המאופיינים בסימטרית d-wave של פרמטר הסדר, התפלגות של זרמי גיוזפסון חיובים ושליליים יכולים להימצא גם רחוק מ- SIT ולכן, אנו מאמצים את הקונספט של זרם גיוספסון שלילי כאחראי להופעת מגנטו-התנגדות שלילית. כבר הראו בעבר כי כאשר מדובר בחומרים בעלי סימטרית לקבל צומת גיוזפסון  $\pi$ , כאשר בחומר הגרנולרי הצומת בחומרים בעלי בחימ מורכבת משני גרגירים סמוכים וביניהם חוליה חלשה [42,43]. במקרה כזה, אוריינטציה שונה של גרגירים סמוכים יכולה לבוא לידי ביטוי בהסחה של π בהולכה. בעבור החוטים שלנו, אפשרות של גרגירים באוריינטציות שונות כמעט ולא קיימת בשל גידול החומר על מצע STO הקובע אוריינטציה כמעט אחידה של מרכיבי החומר. (כאשר מדובר בשכבה מאד דקה, ייתכנו אמנם גרגירים סמוכים בעלי אוריינטציה שונה, בשל טיפוס של גרגירים על גרגירים אחרים בזמן גידול השכבה, אך זאת רק באחוזים נמוכים). כדי להסביר כיצד בכל זאת רואים בניסיון הזזת פאזה π אל אנחנו מציעים הסבר המבוסס על עבודה תיאורטית של [44] Gumann et al. הסבר המבוסס על עבודה תיאורטית של constriction גיאומטרי עשוי לגרום להיפוך פאזה [45]. תופעה כזו, אותה הם [44] יgeometric pi-Josephson junction היא הבסיס להסבר שלנו ל-NMR. איור 3.24 מציג כיצד יכול להתקבל מצב של geometric  $\pi$ -Josephson junction יכול להתקבל מצב של קופר הנעים בחוט (חצים שחורים) מחויבים לפגוש את גבול החוט כאשר המעבר בין גרגיר לגרגיר הוא צר מאד (מעבר עליון) ובכך נוצרת צומת  $\pi$  בין שני הגרגירים. לעומת זאת, כאשר אזור הגבול רחב (מעבר תחתון) הזוגות יבצעו מנהור ״רגיל״ בין הגרגירים ונקבל צומת גיוזפסון ״רגילה״.



6 הנוצר בחוט. הקווים המאוזנים מציינים את גבולות החוט הכולל δ גרעינים π-squid איור 3.24 : קונפיגורציה של 0-junciton: עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה π- (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (עיגולים כחולים). ניתן לראות כיצד הזרם (מצוין בחצים) מתפצל לשני צמתי ג׳וזפסון; צומת תחתונה (עיגולים כחולים) (עיגולים כחולים). ניתן לר

הוא יהווה חלק  $\pi ext{-SQUID}$  מודל זה המורכב מצומת ג׳וזפסון  $\pi ext{-squid}$  וווא יהווה חלק מודל זה המורכב מצומת ג׳וזפסון המקנית מחזורית.

:π - נזכיר כאן את משוואת הזרם דרך צומת ג׳וזפסון לצומת-0 ולצומת

(3.3) 
$$0 - junction \quad I_s = I_{c0} \sin \Delta \varphi$$

(3.4)  $\pi$  - junction  $I_s = I_{c0} \sin(\Delta \varphi + \pi) = -I_{c0} \sin(\Delta \varphi)$ 



איור 3.25 : אילוסטרציה של צומת ג׳וספסון. Is הוא הזרם המתפתח בצומת. S- מציין מוליך-על ו-I מציין מבודד.

כאשר  $I_{c0}$  הוא הזרם הקריטי בצומת ו- $\Delta \varphi$  הוא הפרש הפאזה בין מוליכי העל, ראה אילוסטרציה של צומת באיור 3.25. כאשר צומת ג׳וזפסון נמצאת בנוכחות שדה ניצב לזרם, המתח על הצומת של צומת באיור 3.25. כאשר צומת ג׳וזפסון נמצאת בנוכחות שדה ניצב לזרם, המתח על הצומת הוא בצורת פונקצית sinc הדועכת עם השדה; התמונה הניסיונית לדגם של mm 80 mm איננה מראה דעיכה כזו. איור 3.26 מראה את האוסילציות בדגם בטווח שדות של T ל. 10.7 בהם מודגשים שני דעיכה כזו. איור 3.26 מראה את האוסילציות בדגם בטווח שדות של T ל. איור 3.26 מראה את האוסילציות בדגם בטווח שדות העיסית לדגם של mm מודגשים שני חלקים מחזוריים M (כחול) ו-W (אדום). צורות אלה מזכירות אופייני מתח של SQUID המורכב משני צמתי ג׳וזפסון ולכן, אנו מציעים כי צורה כזו של מגנטו-התנגדות היא כתוצאה מהימצאות של שתי לולאות קוהרנטיות אינטריזיות המחוברות בטור, כאשר כל לולאה יוצרת SQUID אבל האחת היא כתובדה שהדגם צר ואיננו יכול להכיל שני SQUID נאות היא במקביל).



80 nm איור 3.26 : צורת מגנטו-התנגדות מחזורית חיובית (M כחול) ושלילית (W אדום) המופיעות בחוט של נאיור 5.26 : בטווח שדות של החלק השלילי.

איור 3.27 מציג כיצד נראה SQUID קונבנציונאלי המורכב משני צמתי ג׳וזפסון-0 וכיצד המתח איור 3.27 מציג כיצד נראה SQUID קונבנציונאלי המורכב משני צמתי ג׳וזפסון-0. וכיצד המתח דרך ס-SQUID יכול לתאר את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות (M). הביטוי למתח דרך SQUID יכול האר את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות (D-SQUID). הביטוי למתח דרך דרך SQUID יכול לתאר את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות (מגדות למתח איור למתח איור 5.20 מנור את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות (מגדות למתח איור למתח איור 5.20 מציג כיצד נראה לתאר את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות (מגדות למתח איור 5.20 מנור את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות למתח איור 5.20 מנור את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות למתח איור למתח איור למתח איור למתח איור 5.20 מנור את החלק של התרומה החיובית במגנטו-התנגדות למתח איור למתח איו

(3.7) 
$$V = (R/2) \sqrt{I^2 - \left(2I_c \cos \frac{\pi \Phi}{\Phi_0}\right)^2}$$

-כאשר I הוא זרם המעבר,  $I_c$  הוא הזרם הקריטי בצומת,  $\Phi$  הוא סך השטף המגנטי בצומת ו $\sigma_c$  כאשר I הוא זרם המעבר,  $\Phi_o$  הוא יחידת שטף מקוונטט. ממשוואה 3.7 ניתן לראות כי המתח כתלות בשדה החיצוני מחזורי ספי שמופיע באיור 3.27. כאשר במקרה זה המחזוריות היא של מגנטו-התנגדות חיובית.



איור 0-SQUID (a) : 3.27 המורכב משני צמתי ג׳וזפסון-0. (b) מתח של ס-SQUID (a) : 3.27 איור איור  $\Phi_0$  המורכב משני אחת  $\Phi_0$ , המתקבל ממשוואה המגנטי, המנורמל ליחידת שטף אחת  $\Phi_0$ , המתקבל ממשוואה המגנטי, המנורמל ליחידת שטף אחת אחת ס-SQUID (a) - 10 מורכב משוואה החיובי.

π-SQUID איור 3.28 מציג כיצד נראה π-SQUID המורכב מצומת ג׳וזפסון 3.28 מציג כיצד נראה (W) הוור במגנטו-התנגדות (W).
 המתח דרך π-SQUID יכול לתאר את החלק של התרומה השלילית במגנטו-התנגדות (W).

(3.8) 
$$V = (R/2) \sqrt{I^2 - \left(2I_c \sin \frac{\pi \Phi}{\Phi_0}\right)^2}$$
.

ממשוואה 3.8 ניתן לראות כי המתח כתלות בשדה החיצוני הוא מחזורי כפי שמתואר באיור 3.28. המחזוריות מתחילה בשדה אפס עם שיפוע שלילי, תרומה של ה-π- SQUID.



(חסר יחידות) ה-SQUID (a) : 3.28 איור  $\pi$ -SQUID (a) : 3.28 איור  $\pi$ -SQUID (a) : 3.28 איור ממריב משני צמתי ג׳וזפסון  $\Phi_0$ , המתקבל ממשוואה הסלק תורם את החלק המגנטי, המנורמל ליחידת שטף אחת  $\Phi_0$ , המתקבל ממשוואה הסלילי.

כפי שתיארנו בסעיף 3.9, בחוט קיימים שני מחזורי שדה דומיננטיים המתאימים לשני גדלים כפי שתיארנו בסעיף 3.9, בחוט קיימים שני מחזורי שדה דומיננטיים המתאימים לשני גדלים טיפוסיים של 15 nm סיפוסיים של  $55 \text{ nm}^2$  בעלי שטח של  $55 \text{ nm}^2$  ו- 3S, בהתאמה. לכן אנו מניחים כי גם ל-SQUIDs יש יחס שטחים של 1: 3 והתמונה הכוללת מתקבלת מחיבור טורי של המתח מכל SQUIDs ( $\pi$  - 10) SQUID ( $\pi$  - 10) SQUID

(3.9) 
$$V = (R_1/2)\sqrt{I^2 - \left(2I_{c1}\cos\frac{\pi SH}{\Phi_0}\right)^2} + (R_2/2)\sqrt{I^2 - \left(2I_{c2}\sin\frac{\pi (3S)H}{\Phi_0}\right)^2}$$

משוואה 3.9 לוקחת בחשבון חיבור טורי של 2 לולאות בעלות שטח אפקטיבי שונה ; האיבר הימני משוואה 3.9 לוקחת בחשבון חיבור טורי של  $\pi ext{-}\mathrm{SQUID}$  בצד ימין של השוויון מתאר בדול פי 3.



איור 3.29 : חישוב מגנטו-ההתנגדות מתוך משוואה 3.9 המתארת חיבור טורי של 0 ו- SQUID  $\pi$  (קו רציף), יחד עם תוצאות המגנטו התנגדות של חוט ברוחב 80 (נקודות).

הקו הרציף שבאיור 3.29 מראה שמשוואה 3.9 מתארת בצורה טובה את הסגנון הייחודי של הקו הרציף שבאיור 3.29 מראה שמשוואה המגנטו-התנגדות שלילית מחזורית. הקו הרציף חושב עבור הפרמטרים הבאים המגנטו-התנגדות שלילית מחזורית. הקו הרציף חושב עבור הפרמטרים הבאופן המגנטו-התנגות שלילית מחזורית. הקו הרציף חושב אינו מתיימר להסביר באופן  $I_{c1}/I = I_{c2}/I = 0.48$ ,  $R_1 = R_2 = 60\Omega$  מדויק את ההתנהגות האוסילטורית המורכבת הקיימת בחוט, אלא להתחקות באופן איכותי אחר

תבנית ה-NMR השלילית המופיעה כתוצאה מנוכחותו של הסביר מדוע המודל יכול להסביר מדוע הבנית ה-NMR האוסילציות מופיעות בטמפרטורות הביניים (55-70K) בלבד. מתוך משוואה 3.8 המתח בכל האוסילציות מופיעות בטמפרטורות הביניים ( $I/2I_c$  וערכו המקסימאלי של המתח מתקבל כאשר SQUID מוגדר על ידי היחס  $I/2I_c$  וערכו המקסימאלי של המתח מתקבל כאשר בטמפרטורות הנמוכות  $I/2I_c$  כך שהאוסילציות במתח נעלמות, ואילו בטמפרטורות הנמוכות  $I > 2I_c$  כך שכלל לא מתפתח מתח.

## פרק 4 – סיכום ומסקנות

בעבודת מחקר זו הצגנו מדידות התנגדות של חוטים ננו-מטריים של YBCO כתלות בטמפרטורה ושדה מגנטי. את החוטים האלה יצרנו על ידי תהליכי ליתוגרפיה ו-ion milling בטמפרטורה ושדה מגנטי. את החוטים האלה יצרנו על ידי תהליכי ליתוגרפיה זו, מתקבלת שכבה משכבת YBCO שגודלה בשיטת Deposition בשיטת גידול זו, מתקבלת שכבה גרנולרית (גרגירית) של החומר. בכל החוטים נצפו אנומליות במדידות המגנטו-התנגדות ויוחסו לשילוב שבין גיאומטרית החוט, המבנה הגרנולרי שלו ותכונותיו של ה-YBCO כמוליך-על עם פרמטר סדר בעל סימטרית אלה. שהצענו להסביר אנומליות אלה.

#### . התרחבות במעבר ממצב נורמלי למצב מוליך-על.

עקומות (R(T) עבור חוטים ברוחב שונה (80-500nm) מראים כי המעבר ממצב נורמלי למצב מוליך-על נמרח על טווח גדול יותר של טמפרטורות ככל שרוחב החוט צר יותר. מריחות אלה אינן phase slips) מוליך-על נמרח על טווח גדול יותר של טמפרטורות ככל שרוחב החוט צר יותר. מריחות אלה אינן קשורות בפלקטואציות של הפאזה (phase slips) בחומר, שכן ממדי החוטים גדולים מאד ביחס לאורך הקוהרנטיות של MBCO (2 nm) לאורך הקוהרנטיות של NBCO (2 nm) לאורך הקוהרנטיות של הפאזה בחוליות חלשות משחקות תפקיד מרכזי, לכן התרחבות של המעבר קיימת גם בחוטים ערוחבם גדול מאד מאורך הקוהרנטיות. עם הירידה בטמפרטורה המעבר קיימת גם בחוטים שרוחבם גדול מאד מאורך הקוהרנטיות. עם הירידה בטמפרטורה המעבר קיימת גם בחוטים אוליות חזקות גדלה, ולכן פלקטואציות אלה ידוכאו מתחת לטמפרטורה מסוימת. אולם, כאשר ממדי החוט קטנים ההסתברות למציאות ערוצי הולכה כאלה קטנה ולכן המעבר מתרחב אל עבר טמפרטורות נמוכות יותר.

#### . התפתחות מונוטונית מורכבת של ההתנגדות כתלות בשדה בטמפרטורות גבוהות.

עקומות (R(H) בטווח הטמפרטורות הגבוהות (T > 50K), ואילו תלויה חזק בשדה החיצוני, בטווח השדות הנמוכים (H<0.65T), ואילו תלות זו מתמתנת בשדות גבוהים יותר. הסקנו - ביטוי מתמטי לתלותה של ההתנגדות בשדה מתוך התיאוריה של Tinkham עבור (R(T) של מוליך על בשדה קבוע. ביטוי זה תלוי בזרם הקריטי של המערכת וניסיונות להתאים את התוצאות שלנו לתיאוריה זו עם זרם קריטי יחיד לא צלחו. ההתנגדות נובעת כאמור מפלקטואציות בחוליות החלשות ואלה מאופיינות על ידי התפלגות של זרמים קריטיים שונים. הנחנו כי ניתן לחלק באופן גס את המערכת לשני רכיבים; רכיב רך – השייך לחוליות החלשות בעלות זרם קריטי נמוך, ורכיב קשה – השייך לחוליות החלשות בעלות זרם קריטי גבוה יותר. הרכיב הרך מושפע מיד עם הפעלת השדה ואילו הרכיב הקשה מושפע בשדות גבוהים יותר. סופרפוזיציה של התרומה של שני הרכיבים הראתה התאמה טובה לתוצאות הניסיוניות.

.ווו התפתחות לא מונוטונית של ההתנגדות כתלות בשדה בטמפרטורות נמוכות.

בטווח השדות הגבוהים (H > 2T) תלות ההתנגדות בשדה הולכת ומתמתנת עם הירידה בטמפרטורה עד שב- T = 50 K ההתנגדות אינה תלויה בשדה החיצוני. יתרה מכך, בטמפרטורות נמוכות יותר (T < 50 K) עליית השדה מעבר ל-T 2, גורמת *לירידה* בהתנגדות (כלומר לשיפוע שלילי של עקומת (R(H)), מה שעלול להתפרש כהגברה של מוליכות העל כתוצאה מנוכחות של שדה מגנטי. ייחסנו את השיפוע השלילי למנגנון ההולכה של הזרם בחומר הגרנולרי, הנשלט על ידי שני יחסנו את השינים: פלקטואציות תרמיות של הזרם בחומר הגרנולרי, הנשלט על ידי שני החליכים: פלקטואציות תרמיות של הפאזה בחוליות חלשות ומנהור של קווזי-חלקיקים בין הגרגירים. בטמפרטורות נמוכות ובשדות גבוהים התהליך הראשון מדוכא והתרומה של התהליך השני נחשפת; כאשר השדה החיצוני גדל חודרים יותר וורטקסים לגרגירים וכתוצאה מספר הקווזי-חלקיקים בין האני נחשפת; כאשר השדה החיצוני גדל חודרים יותר וורטקסים לגרגירים וכתוצאה מספר הקווזי-

חישובים תיאורטיים על בסיס הנחות דומות לאלה שתוארו לעיל, תוך הסתכלות על המערכת הגרנולרית כמערך דו-ממדי של צמתי ג׳וזפסון, הראו שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות משדה קבוע ללא תלות בטמפרטורה, בהתאמה לתוצאות הניסיוניות.

.IV אוסילציות של ההתנגדות עם השדה.

עבור כל החוטים שמדדנו, ההתנגדות כתלות בשדה מאופיינת ע*ייי* אוסילציות בטווח מסוים של טמפרטורות ושדות. ייחסנו את האוסילציות לזרמי מיסוך מחזוריים עם השדה הזורמים בלולאות קוהרנטיות בפאזה (phase coherent loops) בגרגירים סמוכים. הופעת האוסילציות וגודלן כתלות בטמפרטורה הוסברה על ידי השפעת הזרם המחזורי על קצב הפלקטואציות בחוליות כתלות בטמפרטורה הוסברה על ידי השפעת הזרם המחזורי עם השדה ולכן גם ההתנגדות. החלשות. קצב הפלקטואציות בחוליות החלשות מחזורי עם השדה ולכן גם התנגדות. החלשות. קצב הפלקטואציות בחוליות החלשות מחזורי עם השדה ולכן גם ההתנגדות. החלשות מחזורי עם השדה ולכן גם ההתנגדות. החלשות החלשות. קצב הפלקטואציות מאד (T > 0.8 Tc) קצב הפלקטואציות בטמפרטורות גבוה מאד כך שכלל לא נראה אוסילציות שכן הפלקטואציות הורסות את הלולאות הקוהרנטיות. בטמפרטורות נמוכות מאד (T > 0.8 Tc) כמעט ולא קיימות פלקטואציות וגם שם לא נראה אוסילציות.

#### .V התנגדות שלילית מחזורית

מדידות של מגנטו-התנגדות בחוטים הצרים הראו אוסילציות ייחודיות שכללו מגנטו-התנגדות שלילית בכל תחילת מחזור החל משדה אפס. ייחסנו תופעה זו לאופי הגרנולרי של החוטים שלילית בכל תחילת מחזור החל משדה אפס. ייחסנו תופעה זו לאופי הגרנולרי של החוטים ולסימטריית ה-wave של פרמטר הסדר בגרגירי ה-YBCO. בכדי ליישב את ההופעה של המגנטו-התנגדות השלילית מצד אחד, ומחזוריותה מצד שני הצענו את מודל ה-wave  $0. \pi$  SQUIDS ההתנגדות השלילית מצד אחד, ומחזוריותה מצד שני הצענו את מודל ה- $0. \pi$  SQUIDS המתנגדות השלילית מצד אחד, ומחזוריותה מצד שני הצענו את מודל ה- $0. \pi$  SQUIDS ההתנגדות השלילית מצד אחד, ומחזוריותה מצד שני הצענו את מודל ה- $0. \pi$  squid שליליות של מוליכי-על מסוג שמיני שיתכן היווצרות של צמתי ג׳וזפסון שלילי. מניזיסטון שניז שבהם הסחת פאזה היתכן דרך אפקט גיאומטרי העשוי לגרום להיפוך פאזה (geometric  $\pi$ -Josephson junction) אשר עשויה לגרום להופעת מגנטו-התנגדות שלילית. הראנו שניתן לקבל אוסילציות דומות לאלו שראינו עשויה לגרום להופעת מגנטו-התנגדות שלילית. ס. ס. ס. מודל זה הוא ייחודי בכך שהוא מציע בניסיון על ידי חיבור טורי של אוסילציות ומגנטו-התנגדות שלילית מחזורית כתוצאה מהימצאות של מנגנון יחיד להופעה של אוסילציות ומגנטו-התנגדות שלילית בספרטורות גבוהות. צמתי מנגנות שניתן לקבל אוסילציות זחזורית כתוצאה מהימצאות של מנגנון יחיד להופעה של אוסילציות ומגנטו-התנגדות שלילית בסמורות גבוהות.

לסיכום, חוטים גרנולריים של YBCO מראים שפע של תופעות אנומליות הכוללות : התרחבות של אזור המעבר, אוסילציות במגנטו-התנגדות, שיפוע שלילי של המגנטו-התנגדות ומגנטו-התנגדות שלילית מחזורית. בבסיס כל התופעות הללו מצוי אופיים הגרנולרי של החוטים. תופעות אלה תלויות חזק בתהליך הייצור של החוטים ועשויות להתגלות באופן שונה בחוטים שונים אפילו עם אותם ממדים. גורמים אלה חייבים להילקח בחשבון בכל ניסיונות עתידיים ליישם חוטים כאלה במעגלים והתקנים אלקטרונים.

## פרק 5 – רשימת מקורות

 C. N. Lau, N. Markovic, M. Bockrath, A. Bezryadin and M. Tinkham, Phys. Rev. Lett. 87, 217003 (2001).

- [2] N. D. Mermin and H. Wagner, Phys. Rev. Lett. 17, 1133 (1966).
- [3] K. Yu. Arutyunov, D. S. Golubev and A. D. Zaikin, Physics Reports **464**, 1, (2008).
- [4] W. A. Little, Phys. Rev. 156, 396 (1967).
- [5] J. S. Langer and V. Ambegaokar, Phys. Rev. 164, 498 (1967).
- [6] D. E. McCumber and B. I. Halperin, Phys. Rev. B 1, 1054 (1970).
- [7] M. Tinkham, Introduction to superconductivity, McGraw-Hill (New York, 1995).
- [8] R. S. Newbower, M. R. Beasley and M. Tinkham, Phys. Rev. B 5, 864 (1972).
- [9] J. E. Lukens, R. J. Warburton and W. W. Webb, Phys. Rev. Lett. 25, 1180 (1970).
- [10] A. T. Bollinger, A. Rogachev and A. Bezryadin, EPL (Europhysics Letters) **76** (2005).
- [11] A. Bezryadin, Journal of Physics: Condensed Matter 20, 043202 (2008).
- [12] K. Xu and J. R. Heath, Nano Lett. 8, 3845 (2008).
- [13] N. Giordano, Phys. Rev. Lett. 61, 2137 (1988).
- [14] N. Giordano and E. R. Schuler, Phys. Rev. Lett. 63, 2417 (1989).
- [15] A. D. Zaikin, D. S. Golubev, A. van Otterlo, Z. Aacute and G. T. nyi, Phys. Rev. Lett. **78**, 1552 (1997).
- [16] A. Bezryadin, C. N. Lau and M. Tinkham, Nature 404, 971 (2000).

[17] H. Jiang, Y. Huang, H. How, S. Zhang, C. Vittoria, A. Widom, D. B. Chrisey, J. S. Horwitz and R. Lee, Phys. Rev. Lett. **66**, 1785 (1991).

[18] J. A. Bonetti, D. S. Caplan, D. J. Van Harlingen and M. B. Weissman, Phys. Rev. Lett. **93**, 087002 (2004).

[19] P. Mikheenko, X. Deng, S. Gildert, M. S. Colclough, R. A. Smith, C. M. Muirhead, P. D. Prewett and J. Teng, Phys. Rev. B **72**, 174506 (2005).

[20] G. Koren, A. Gupta, E. A. Giess, A. Segmüller and R. B. Laibowitz, App.Phys. Lett. **54**, 1054 (1989).

[21] K. Yu. Arutyunov, D. S. Golubev and A. D. Zaikin, Physics Reports **464**, 1 (2008).

[22] Y. Hidaka et al. Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987).

[23] M. Tinkham, Phys. Rev. Lett. 61, 1658 (1988).

[24] N. Morozov, L. Krusin-Elbaum, T. Shibauchi, L. N. Bulaevskii, M .P. Maley, Yu I. Latyshev and T. Yamashita, Phys. Rev. Lett. **84**, 1784 (2000).

[25] H. J. Gardner, A. Kumar, L/Yu, P. Xiong, M. P. Warusawithana, L. Wang, O. Vafek and D. G. Schlom, Nat. Phys **7**, 895 (2011).

[26] R. Córdoba, T. I. Baturina, J. Sesé, A. Yu Mironov, J. M. De Teresa, M. R.
Ibarra, D. A. Nasimov, A. K. Gutakovskii, A. V. Latyshev, I. Guillamón, H. Suderow, S. Vieira, M. R. Baklanov, J. J. Palacios and V. M. Vinokur, Nat. Commun 4, 1437 (2013).

[27] I. Vekhter ,L. N. Bulaevskii, A. E. Koshelev and M. P. Maley, Phys. Rev. Lett. 84, 1296 (2000).

[28] B. Ya. Shapiro, I. Shapiro, D. Levi, A. Shaulov, and Y. Yeshurun Physica C **501**, 51 (2014).

[29] A. V. Herzog, P. Xiong and R. C. Dynes, Phys .Rev. B 58, 14199 (1998).

[30] W. A. Little and R. D. Parks, Phys. Rev. Lett. 9, 9 (1962).

[31] M. Tinkham, David W. Abraham and C. J. Lobb, Phys. Rev. B 28, 6578 (1983).

[32] P. Xiong, A. V. Herzog and R. C. Dynes, Phys. Rev. Lett. 78, 927 (1997).

[33] A. Rogachev, T. C. Wei, D. Pekker, A. T. Bollinger, P. M. Goldbart and A. Bezryadin, Phys. Rev. Lett. **97**, 137001 (2006).

[34] T.-C. Wei, D. Pekker, A. Rogachev, A. Bezryadin and P. M. Goldbart, EPL (Europhysics Letters) **75**, 943 (2006).

[35] B.I. Spivak and S. A. Kivelson, Phys. Rev. B 43, 3740 (1991).

[36] S. A. Kivelson and B. Z. Spivak, Phys. Rev. B 45, 10490 (1992).

[37] V. V. Moshchalkov, L. Gielen, G. Neuttiens, C. Van Haesendonck and Y. Bruynseraede, Phys. Rev. B **49**, 15412 (1994).

[38] K. Yu Arutyunov, D. A. Presnov, S. V. Lotkhov, A. B. Pavolotski and L. Rinderer, Phys. Rev. B **59**, 6487 (1999).

[39] D. A. Pesin and A. V. Andreev, Phys. Rev. Lett. 97, 117001 (2006).

[40] Y. B. Simons, O. Entin-Wohlman, Y. Oreg and Y. Imry, Phys. Rev. B 86, 064509 (2012).

[41] M. Cyrot and D. Pavuna, *Introduction to superconductivity and high-Tc materials*, World Scientific (New Jersey, London, 1991).

[42] C. C. Tsuei and J. R. Kirtley, Rev. Mod. Phys. 72, 969 (2000).

[43] H. Hilgenkamp and J. Mannhart, Rev. Mod. Phys. 74, 485 (2002).

[44] A. Gumann, C. Iniotakis and N. Schopohl, Appl. Phys. Lett. 91, 192502 (2007).

[45] A. Barone and G. Paterno, *Physics and applications of the Josephson effect Chapter* 13.2 *and references therein.*, John Wiley & Sons (New York, 1982)

[46] L. N. Bulaevskii, V. V. Kuzii and A. A. Sobyanin, JETP Lett. 25, 291 (1977).



# Magnetoresistance anomalies in superconducting $YBa_2Cu_3O_{7\text{-}\delta}\text{ Nano-wires}$

Daniel Levi

Department of physics

Ph.D. Thesis

Submitted to the Senate of Bar-Ilan University

Ramat-Gan, Israel

May 2014

This work was carried out under the supervision of

## **Prof. Yosef Yeshurun**

Department of physics, Bar-Ilan University

## **Table of Contents**

Abstracti		
1. Introduction		
2. Methodology7		
2.1 YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> (YBCO) films7		
2.2 Wires fabrication		
2.3 The experimental system11		
3. Results and discussion		
3.1 YBCO films – the resistive transition		
2.3 Magnetoresistance of YBCO films		
3.3 YBCO wires – the resistive transition		
3.4 YBCO wires – effect of magnetic field on the resistive transition		
3.5 Magnetoresistance "background"		
3.6 Magnetoresistance background at high temperatures - Discussion		
3.7 Magnetoresistance background at low temperatures - Discussion		
3.8 Magnetoresistance oscillations		
3.9 Periodic negative magnetoresistance		
3.10 Zero and $\pi$ SQUIDs model		
4. Summary and conclusions		
5. References		

## Abstract

Superconducting nanowires have become a subject of growing fundamental and applied studies. The applied research is motivated by a desire to apply superconducting nanowires in future electronic circuits and devices. Most of the fundamental studies deal with wires of dimensions comparable to the superconducting coherence length,  $\xi_{0}$ , aiming to understand the dissipation mechanisms below the transition temperature, originating from thermally activated and quantum phase slips. Naturally, most of these studies have been focused on conventional, low T<sub>c</sub> superconductors due to their relatively large  $\xi_{0}$ .

In this work we studied the magnetoresistance of ultra-thin (10-20 nm) granular YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub> wires (T<sub>c</sub> ~ 90K) of width 80-500 nm. The wires were patterned on a laser ablated YBCO films using a high-resolution electron beam lithography system. Although the dimensions of these wires are much larger than  $\xi_0$  of YBCO (~2 nm), they exhibited a series of unique phenomena that are normally absent in bulk or films of YBCO. These include: (1) Broadening of the transition zone from normal to superconducting state as measured by the resistance as a function of temperature; This broadening increases as the cross-sectional area of the wire decreases. (2) Magnetoresistance oscillations which are superimposed on a complex behavior of the magnetoresistance background, observed in a wide range of temperatures (T < 0.8 Tc) and fields (up to 5 T). (3) Negative magnetoresistance slope observed at low temperatures in a wide field range in the Tesla regime, suggesting the counterintuitive enhancement of superconductivity. (4) Negative phenomenon of field magnetoresistance  $(R(H=0) > R(H \neq 0))$  in the low field regime. (5) Unique magnetoresistance oscillations with a rich structure, observed in the narrowest wire (80 nm), including a *periodic* negative magnetoresistance component.

We ascribed the observed anomalies to the combination of the wire geometry, its granular structure, and the nature of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  as a d-wave superconductor. In granular samples phase fluctuations at weak links play a dominant role giving rise to broadening even in wires with dimensions much larger than the coherence length. In such wires, as temperature is reduced the probability for current flow channels with relatively strong links is increased and hence the effect of fluctuations is not observable below a certain temperature. However, as the dimensions of the wires are reduced the probability for such current-flow channels is decreased causing a transition broadening to lower temperatures.

We attributed the magnetoresistance oscillations to phase coherent loops established around voids in the granular structure of the ultra-thin wires. The unique structure of the oscillations, exhibiting a negative magnetoresistance in the initial part of each cycle, is attributed to the d-wave pairing symmetry of the YBCO grains, giving rise to the possibility of presence of  $\pi$ - Josephson junctions in the loops. We further showed that the salient features of the observed oscillations can be simulated by a serial combination of zero and  $\pi$ -SQUIDS.

The complex magnetoresistance background was attributed to the interplay between thermally activated phase slips in weak links and quasiparticles tunneling between grains. At high temperature the first mechanism is dominant giving rise to an increase in the magnetoresistance due to enhanced phase slips rate with the field. Below a certain temperature the phase slips rate at high fields reaches saturation, giving rise to a constant magnetoresistance. In this temperature range the contribution of quasiparticles tunneling is revealed: as the field increases, more vortices enter the grains and the number of quasiparticles increases, enhancing conductivity of quasiparticles and hence exhibiting a negative magnetoresistance slope. A theoretical model developed along similar lines, predicted the negative magnetoresistance phenomenon in accordance with the experimental results.