

השפעת גודל הדגם על השיא השני
ב- $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$

דוד סילמן

עבודה זו מוגשת כחלק מהדרישות לשם קבלת תואר מוסמך
במחלקה לפיזיקה של אוניברסיטת בר-אילן

עבודה זו נעשתה בהדרכתם של

פרופ' יוסף ישורון

ופרופ' אבנר שאולוב,

המחלקה לפיזיקה

אוניברסיטת בר-אילן.

רב תודות לפרופ' יוסף ישורון על הדרכתו ועזרתו
לאורך כל שלבי העבודה. תודה לפרופ' אבנר
שאולוב על הדרכתו במחקר זה.

תודה רבה לכל חברי המעבדה: ד"ר שוקי וולפוס,
ד"ר משה סינוואני, ד"ר אלכס פרידמן, ד"ר פאינה
קופנסקי, ד"ר בינה קליסקי, ישי ברוקנטל, יפית
פלגר, דורון ברנס, יוסי עדני, ולאד רויטברג
ושמואל אזולאי על תמיכתם הסיוע והעצות ועל
חממה נפלאה ומדהימה. לאבי סנטו, מנחם כץ
וסמיון נתליאשווילי אשר היו נכונים לסייע בשמחה
בכל הדרוש.

עבודה זו בוצעה במעבדה הלאומית למוליכות על
שבמחלקה לפיזיקה באוניברסיטת בר-אילן.
תודתי נתונה לראשי המחלקה פרופ' טייטלבוים
ופרופ' רפפורט ולסגניהם ד"ר מנצור ופרופ' פייגל
ולמזכירות רחל, שרה וחגית.

תודה מיוחדת גם לפרופ' ישראל פלנר
מהאוניברסיטה העברית.

תודה להורי,

לנטע אשתי, אשר כל אשר לי - שלה הוא
ולבנותי הדס ואביטל.

תקציר

מחקר זה מתמקד בהשפעת גודלו של הדגם על ההתנהגות המגנטית של לולאת המגנטיזציה בגבישי $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$ (LSCO). מחקר זה התמקד בשתי שאלות, מהי ההשפעה של שינויי גובה הדגם על השיא השני בלולאת המגנטיזציה? ומהי ההשפעה של שינויי רוחב הדגם על השיא השני בלולאת המגנטיזציה?

המוטיבציה לשאלה הראשונה מקורה במחקרים שהוכיחו כי ב- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ השיא השני הוא כתוצאה ממעבר פאזה סדר - אי סדר. קו המעבר המצופה לפי מודל זה צריך להיות אדיש לשינויים בטמפרטורה בטמפרטורות נמוכות, LSCO לעומת זאת מגלה התנהגות שונה בקו מעבר ייחודי המראה דוקא תלות חזקה בטמפרטורה, פתרון לבעיה דומה ב- $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-\delta}$ הוצע בידי de Andrade שהראה כי התלות בטמפרטורה היא כתוצאה ממחסומי שפה הגורמים להסטה של קו המעבר. מכיוון ששינויי גודל משפיעים על גודל מחסומי השפה המטרה הראשונה היתה לבדוק האם על ידי שינוי מימדי הדגם והקטנת מחסומי השפה תקטן התלות של קו המעבר בטמפרטורה והקו יתאים למצופה ממודל מעבר הפאזה.

המוטיבציה לשאלה השנייה היתה במחקרים שנעשו לאחרונה והראו כי ב- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ באזור מעבר הפאזה סדר - אי סדר יש מצב מטהסבילי המושפע ממצבים טרנזיינטיים תוצאות אלו הראו תלות של לולאת המגנטיזציה וקצבי הרלקסציה ברוחב הדגם. מטרתנו השנייה היתה לבחון את ההשפעה של שינויי רוחב הדגם על הלולאה בהשוואה למחקרים אלו ובחינת המצבים המטהסביליים ב-LSCO.

במחקר זה בוצעו מדידות גלובליות, בעזרת מערכת SQUID, על מספר דגמי LSCO בעלי מימדים שונים אשר נחתכו מאותו הדגם. המדידות הראו כי השינויים בלולאת המגנטיזציה באזור מעבר הפאזה סדר - אי סדר הם מזעריים. תוצאות אלו משאירים על כנה את בעיית קו המעבר הייחודי ל-LSCO ומראים כי אין מצבים מטהסביליים ב-LSCO. תוצאות אלו מוליכות למסקנה כי תופעת השיא השני אינה כנראה תוצאה של מעבר פאזה סדר - אי סדר, אלא זוהי תופעה דינמית. תוצאות נוספות שנתקבלו להפתעתנו היו דוקא באזור השדות הגבוהים שם התגלו הבדלים בין הדגמים. ראינו כי:

א. קצב הרלקסציה גדל עם רוחבו של הדגם.

ב. המגנטיזציה גדלה עם רוחבו של הדגם.

ההסבר להבדל בקצבי הרלקסציה הוא כי באזור השדות הגבוהים שבו הזרם הקריטי הוא קטן מחסומי השפה מתחילים להיות דומיננטיים ולכן אנו מקבלים קצבי רלקסציה ממוצעים מהרפיית מחסומי השפה ומהרפיית מחסומי הלכידה. אפקט זה גורם לכך שקצבי הרלקסציה אינם מציגים נרמול אמיתי, ולכן עבור הדגם הצר שהוא בעל מחסומי שפה גבוהים יותר הרלקסציות יתחילו לדעוך בשדות נמוכים מהדגם הרחב בעל מחסומי השפה הנמוכים.

ההסבר להבדלים במגנטיזציה מתבסס על ההסברים כי השיא השני הוא כתוצאה של אפקט דינמי שבו קצבי הרלקסציה משתנים מהשפעת זחילה אלסטית לזחילה פלסטית. התוצאות מרמזות כי הזחילה הפלסטית שונה מהאלסטית שהיא משנה את הזרם לוקלית ולכן בדגם הרחב נמצאים זרמים גבוהים מזה של הדגם הצר, ולכן מתקבלת מגנטיזציה גבוהה יותר בדגם הרחב.

תוכן העניינים

תקציר

1.....	פרק 1 הקדמה	
	הפלקסונים	1.1
	מודל Bean ומחסומי נפח	1.2
	מחסומי שפה	1.3
	מודל מעבר הפאזות	1.4
	לולאת המגנטיזציה	1.5
	קו מעבר הפאזה של $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$	1.6
	מחסומי שפה והשפעתם על השיא השני	1.7
	מצבים טרנזיינטים והשפעתם על השיא השני	1.8
	סיכום	1.9
13.....	פרק 2 שאלות המחקר	
	השפעת גובה הדגם על קו המעבר של $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$	2.1
	השפעת רוחב הדגם על השיא השני ב- $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$	2.2
14.....	פרק 3 אופן ביצוע הניסוי	
	מתודולוגיה	3.1
	הדגמים	3.2
	אמצעי המדידה	3.3
17.....	פרק 4 השפעת גובה הדגם על קו המעבר הנמדד	
	קו מעבר הפאזה של $\text{La}_{1.874}\text{Sr}_{0.126}\text{CuO}_4$ והפתרון של de Andrade	4.1
	הניסוי	4.2
	תוצאות הניסוי	4.3
	מסקנה	4.4
21.....	פרק 5 השפעת רוחב הדגם על השיא השני	
	השפעת רוחב הדגם על השיא השני ב- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$	5.1
	הניסוי	5.2
	תוצאות הניסוי	5.3
	מסקנה	5.4
25.....	פרק 6 ההשפעה של גודל הדגם באזור שאחרי השיא השני	
	השפעת רוחב הדגם בשדות שמעל השיא השני	6.1
	הניסוי ותוצאותיו	6.2
	ההבדל בהתנהגות של H_{irr}	6.3
	הסבר	6.4
	מסקנה	6.5
34.....	פרק 7 סיכום ומסקנות	
36.....	פרק 8 נספחים	
	נספח א': פקטור הנרמול	8.1
	נספח ב': נרמול לולאות המגנטיזציה בטמפרטורות שונות	8.2
40.....	ביבליוגרפיה	

1. הקדמה

1.1 הפלקסונים

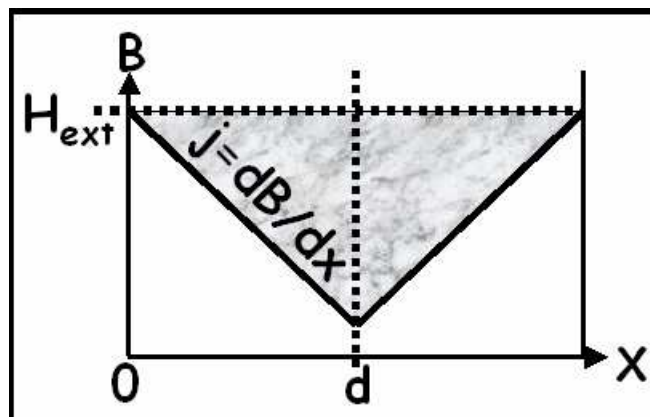
במוליכי על מן הסוג השני (type II) השטף המגנטי חודר לדגם רק בשדות חיצוניים הגבוהים מהשדה המגנטי הקריטי התחתון (H_{c1}). מעל לשדה זה נוצר המצב המעורב (mixed state); במצב זה השטף המגנטי חודר לתוך מוליך העל אך החומר ממשיך להתנהג כמוליך על עד לשדה קריטי עליון (H_{c2}) שבו הוא הופך לנורמלי.

במצב המעורב החדירה של השטף נעשית בצורה של קוי שטף בעלי ליבה נורמלית אשר מסביבה זורם זרם בכיוון ההפוך לזרם שמסביב לשפת הדגם - אלמנט זה נקרא פלקסון. כל פלקסון מכיל קוונט אחד של שטף מגנטי.

1.2 מודל Bean ומחסומי נפח (bulk pinning)

פגמים במבנה הגבישי של מוליכי על יוצרים מרכזי לכידה (pinning centers) שבהם הפלקסונים מעדיפים להתפס משיקולי אנרגיה. בכדי לחלץ את הפלקסון ממרכז לכידה יש צורך בזרם קריטי בגודל j_c (אז כח לורנץ משתווה לכח הלכידה). מודל Bean [1] מניח זרם קריטי בגודל קבוע לאורך הדגם. לפי משוואת מקסוול, $\frac{dB}{dx} = -\frac{4\pi}{c} j$, נקבל פרופיל של שדה מגנטי ישר כך ש-

$$B(x) = \frac{4\pi}{c} j_c |x| \quad \text{כבאיור 1.}$$



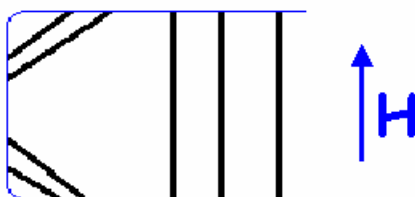
איור 1: פרופיל חד מימדי לפי מודל Bean.

הפגמים שבדגם יוצרים מחסום המעכב חדירה של השטף המגנטי לדגם. מחסום זה נקרא מחסום נפח (bulk pinning) [2]. בכדי שהשטף המגנטי יחדור למרכז הדגם צריך להתגבר על המחסום בעזרת שדה חיצוני שגודלו תלוי ברוחב הדגם. ככל שהדגם רחב יותר כך השדה החיצוני שבו יגיע השטף אל מרכז הדגם יהיה גבוה יותר.

1.3 מחסומי שפה

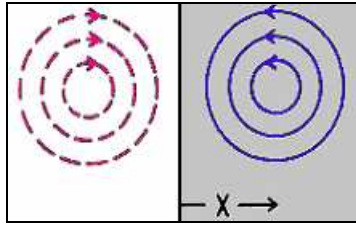
מחסומי השפה הם מחסומים הלוכדים את הפלקסונים בשפת הדגם ומונעים מהם לחדור פנימה למרכז הדגם. מחסומי השפה הם תוצאה של שני סוגי מחסומים: מחסומים גיאומטריים [4,3] ומחסומי השפה של Bean-Livingston (BL) [5]. המחסומים הגיאומטריים יחד עם מחסומי השפה של BL נקראים יחד בשם הכוללני מחסומי שפה.

מחסומים גיאומטריים נובעים מתחרות בין שתי כוחות: האחד, הדוחף את הפלקסון לתוך הדגם בהשפעת כח לורנץ שמפעילים זרמי המיסוך של מייזנר על הפלקסון. השני, כח המונע מהפלקסון לחדור פנימה למרכז הדגם בגלל מתיחות קו הפלקסון שמתארך כאשר הוא מתחיל לנוע אל מרכז הדגם. באיור 2 אפשר לראות את צורת התעוותות הפלקסון כאשר הוא נע מהשפה למרכז הדגם.



איור 2: העיוות של הפלקסונים בכניסה לדגם.

מחסומי השפה של BL נובעים מתנאי שפה, המכריחים כי על השפה בכיוון הניצב לפנים הזרם יתאפס, דבר המביא ליצירת דמות לפלקסון בעלת סימן הפוך שנמצאת מחוץ לדגם. כח המשיכה שבין דמות הפלקסון לפלקסון גורם למשיכה של הפלקסון לשפה. באיור 3 אפשר לראות את הפלקסון ודמותו בשפת הדגם.



איור 3: הפלקסון והדמות שלו.

גודלו של מחסום השפה פרופורציונלי לשורש יחס גובה הדגם לרוחבו ($\sqrt{t/D}$) [6]. גם המחסומים הגיאומטריים וגם מחסומי BL תלויים באותה צורה בגודל הדגם. במחסומים הגיאומטריים הדבר נובע מכך שככל שהדגם גבוה יותר כך המתיחות שלו בכניסה תגדל ולעומת זאת ככל שהוא רחב יותר יחס קצוות הדגם, ששם הפלקסונים נכנסים, קטן יחסית לשאר הדגם. במחסומי BL התלות נובעת דרך הפקטור הדיאמגנטי.

כל המחסומים גדלים עם הורדת הטמפרטורה. התלות של מחסומי BL היא תלות אקספוננציאלית [6] ולכן השינוי של מחסומי השפה הוא משמעותי בטמפרטורות נמוכות. לעומת זאת תלות המחסומים הגיאומטריים היא ליניארית [3]. אך גודלו של המחסום הגיאומטרי משמעותי רק עבור טמפרטורות גבוהות.

1.4 מודל מעבר הפאזות

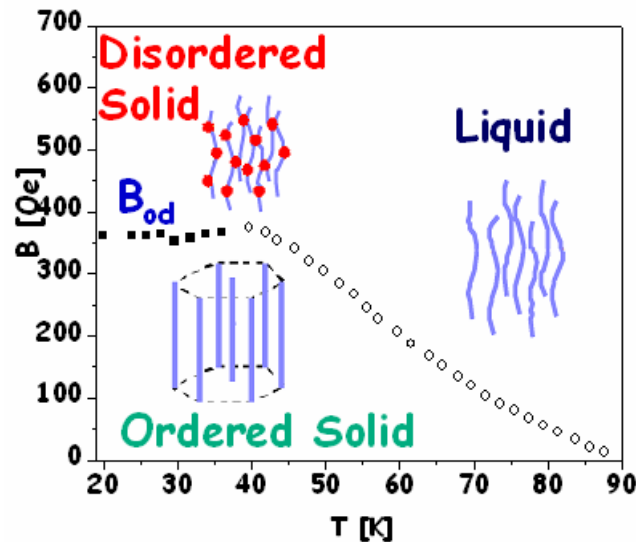
גילוי מוליכי העל בטמפרטורות גבוהות בשנת 1986 בידי Bednorz ו-Muller [7], הביא לגילוי של מצבי פאזה שונים של הפלקסונים במצב המעורב (mixed state) בחמרים אלו. דבר זה נובע מעומק החדירה (λ) הארוך שלהם ואורך הקוהרנטיות (ξ) הקצר וכן מהמבנה האנאיזטרופי של החומר וטמפרטורת מעבר גבוהה התורמים לכך שמארג הפלקסונים יהיה בעל מבנה גמיש. מחקרים של השנים האחרונות [2,8] הראו שישנם שלושה מצבים עיקריים שבהם הפלקסונים מסתדרים:

מצב מסודר – בו הפלקסונים מסתדרים בחומר בשריג משולשי (Abrikosov lattice). פאזה זו שייכת לתחום הטמפרטורות הנמוכות ושדות מגנטיים נמוכים של המצב המעורב.

מצב לא מסודר – בו הסדר של הפלקסונים נשבר. פאזה זו שייכת לתחום הטמפרטורות הנמוכות ושדות מגנטיים גבוהים.

מצב נוזלי – בו שריג הפלקסונים מותך ומתנהג כנוזל. פאזה זו שייכת לתחום הטמפרטורות הגבוהות.

באיור 4 אפשר לראות את דיאגרמת הפאזות השונות של $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) ואת מבנה הפלקסונים בכל פאזה.



איור 4: דיאגרמת הפאזות של $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ לפי Khaykovich *et al.* [9].

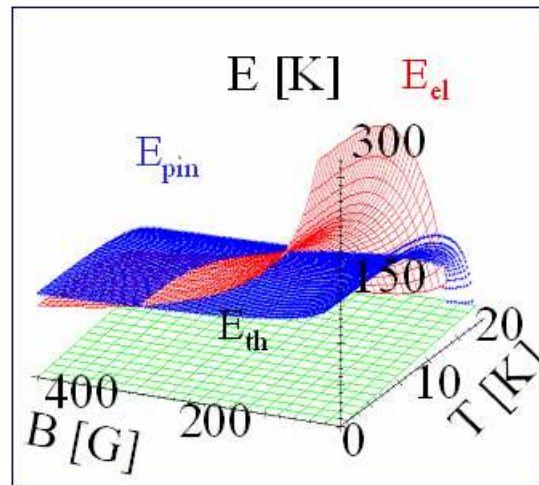
האנרגיות האחראיות לשלושת מערכי הפלקסונים [10]:
 אנרגיה אלסטית – זו היא האנרגיה שנובעת מהאינטרקציה בין הפלקסונים. כתוצאה מהזרמים שזורמים סביב קווי השטף המגנטי ישנה דחייה בין הפלקסונים, המביאה למרחק זהה בין הפלקסונים ולמבנה השריגי שבהם הם מסודרים.

אנרגית הלכידה – מקורה בפגמים הנמצאים בגביש אשר משיקולי אנרגיה הפלקסונים מעדיפים להתפס בהם. גודל אנרגית הלכידה היא האנרגיה הנדרשת כדי לחלץ את הפלקסונים ממרכזי לכידה אלו. אנרגיה זו גורמת לעוות הפלקסונים ולשבירת השריג בגלל העדפת הפלקסונים להמצא במרכזי הלכידה אשר אינם תואמים את שריג אבריקוסוב.

אנרגיה תרמית – אנרגיה זו גורמת לתנועה של הפלקסונים דבר הגורם להרס השריג או לשחרור הפלקסונים ממרכזי הלכידה. התחרות בין האנרגיות השונות תלויה בטמפרטורה ובעוצמת השדה המגנטי המופעל.

בטמפרטורות גבוהות האנרגיה התרמית היא השולטת ולכן שריג הפלקסונים מותך לנוזל, דבר זה בא לידי ביטוי במדידות בקפיצה במגנטיזציה ההדירה.

בטמפרטורות נמוכות שולטות האנרגיה האלסטית ואנרגית הלכידה. כאשר בשדות מגנטיים נמוכים שולטת האנרגיה האלסטית ואלו בשדות גבוהים אנרגית הלכידה. המעבר הזה ממצב מסודר ללא מסודר בא לידי ביטוי בהופעת השיא השני בלולאת המגנטיזציה. באיור 5 אפשר לראות את התלויות של האנרגיות השונות בשדה המגנטי ובטמפרטורה ואיזה אנרגיה היא הדומיננטית.

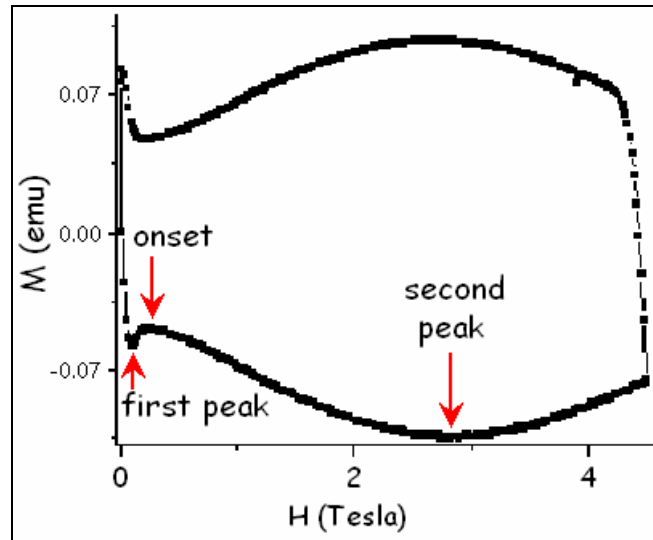


איור 5: האנרגיה האלסטית (E_{el}), אנרגית הלכידה (E_{pin}) והאנרגיה התרמית (E_{th}) כתלות בשדה המגנטי ובטמפרטורה עבור $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$ [11].

1.5 לולאת המגנטיזציה

לולאת המגנטיזציה במוליכי על בטמפרטורות גבוהות מאופיינת בהופעת שיא שני בלולאה, המכונה גם fishtail. ללולאה יש 4 שדות מגנטיים מאפיינים: שדה השיא הראשון, שדה ה-onset, שדה השיא השני והשדה ההדיר. שדה השיא הראשון ($H_{first\ peak}$) - הוא השדה שבו המגנטיזציה לראשונה מפסיקה לגדול. שדה זה מהווה אפיון לגודל המחסומים (מחסומי נפח ומחסומי שפה). השיא הראשון מצוין להלן באיור 6 כ- first peak. שדה ה-onset (H_{onset}) - השדה בו המגנטיזציה מתחילה לגדול שוב. ההסבר המקובל לאנומליה זו הוא שבשדה זה ישנו מעבר מפאזה מסודרת לפאזה לא מסודרת. ה-onset מצוין באיור 6. שדה השיא השני ($H_{second\ peak}$) - השדה בו לולאת המגנטיזציה מגיעה למגנטיזציה מקסימלית. השיא השני מצוין באיור 6 כ- second peak.

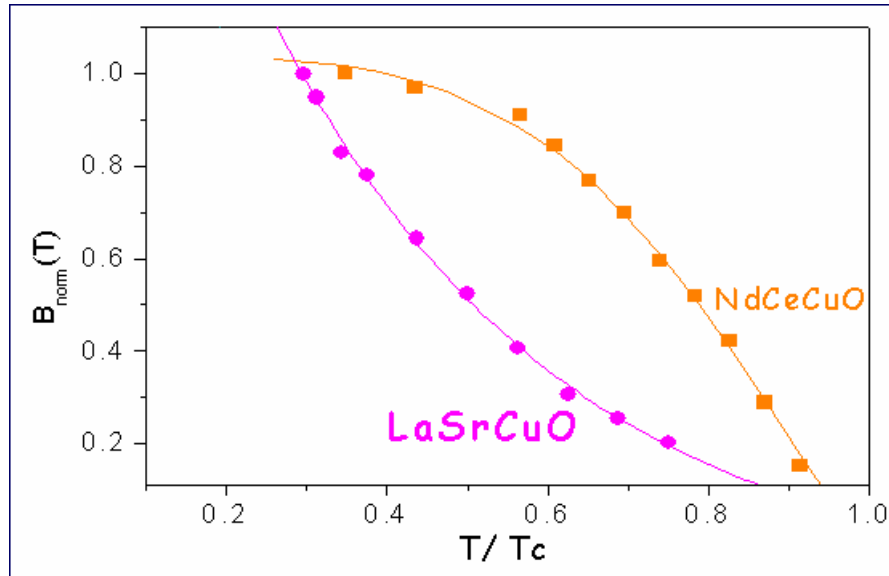
השדה ההדיר (H_{irr}) – השדה בו המגנטיזציה הופכת לזוהה בין אם מעלים את השדה המגנטי ובין אם מורידים את השדה המגנטי. דבר המעיד כי אין זרמי נפח בדגם.



איור 6: לולאת מגנטיזציה של $La_{2-x}Sr_xCuO_4$.

1.6 קו המעבר של $La_{2-x}Sr_xCuO_4$

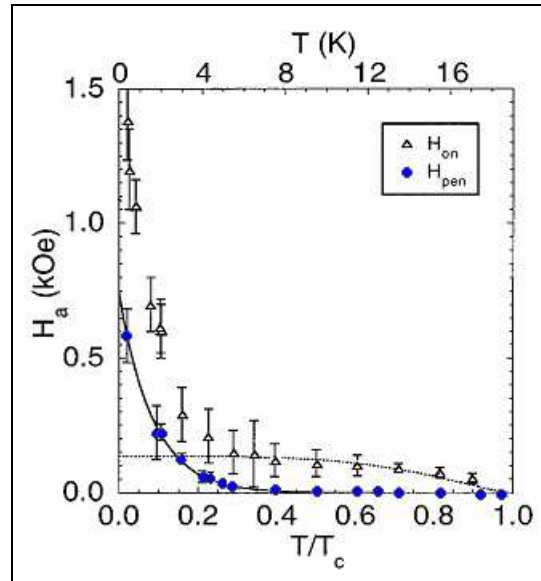
האנרגיה התרמית בטמפרטורות נמוכות זניחה, כמובן, ולכן קו מעבר הפאזה ממצב מסודר למצב לא מסודר לא צריך להיות תלוי בטמפרטורה בטמפרטורות הנמוכות [13,12]. מכיוון שהמעבר מתאפיין על ידי השיא השני אנו מצפים כי התלות של השיא השני בטמפרטורה תקטן עם ירידת הטמפרטורה, וכך באמת ההתנהגות של רוב מוליכי על. יוצא דופן הוא ה- $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (LSCO) שהשיא השני שלו תלוי בטמפרטורה ומראה תלות חזקה יותר דוקא בטמפרטורות הנמוכות [14]. את תלות קו המעבר של LSCO בטמפרטורה בהשוואה לזו של $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$ (NCCO) אפשר לראות באיור 7. התנהגות זו מעלה שאלה על הסבר מודל מעבר הפאזה בכלל וב- LSCO בפרט. שאלה זו נמצאת ברקע של המחקר המוצג כאן.



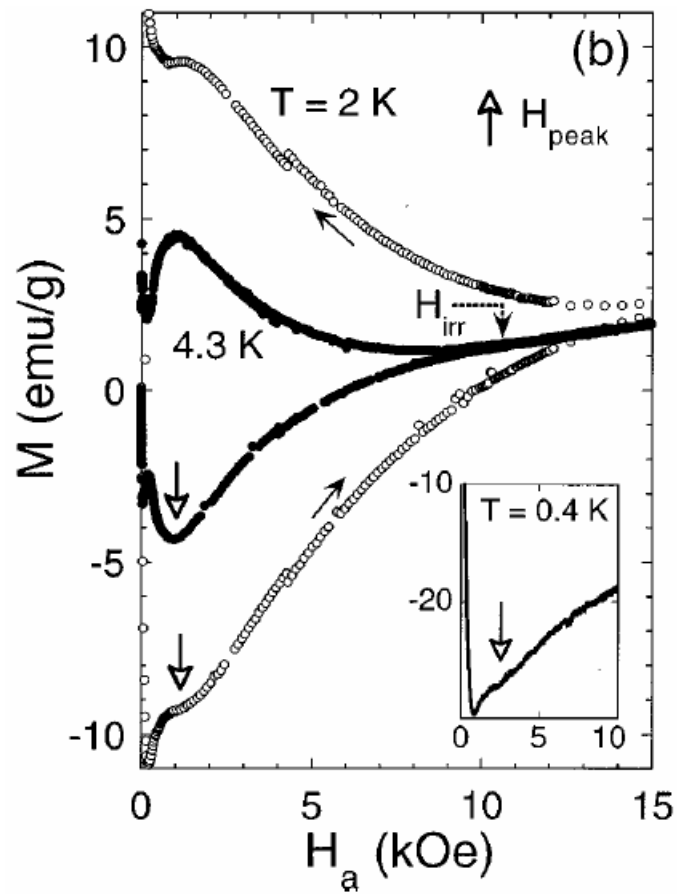
איור 7: קו המעבר סדר – אי סדר של LSCO ושל NCCO [14].

1.7 מחסומי שפה והשפעתם על השיא השני

בעיה דומה התעוררה ב- NCCO שמראה, בטמפרטורות נמוכות, עליה חזקה מאוד של קו המעבר עם הירידה בטמפרטורה, כמתואר ע"י המשולשים באיור 8. בטמפרטורות גבוהות יותר ההתנהגות של NCCO היא ההתנהגות המצופה מהמודל כלומר, קו המעבר אינו תלוי בטמפרטורה, עד ברך $0.5 T_c$ ואח"כ הוא יורד לאפס. de Andrade [15] הסביר כי התלות הזאת אין מקורה במעבר הפאזה אלא כתוצאה ממחסומי שפה הגורמים להסחה במדידת ה- onset ובכך גורמים לתזוזה מדומה של קו המעבר. הוא הראה כי כתוצאה ממחסומי שפה (הגדלים בצורה דרמטית בטמפרטורות נמוכות) השיא הראשון נע לשדות גבוהים וגורם להזזת ה- onset ממקומו המקורי. דוגמא לכך באיור 9 אפשר לראות שב- 2 K כמעט ולא ניתן לראות את ה- onset כתוצאה מהשיא הראשון. כתוצאה מכך, באזור הטמפרטורות הנמוכות, ששם מחסומי השפה הם דומיננטיים, ההתנהגות של ה- onset היא כשל השיא הראשון. באיור 8 מודגמת טענתו של de Andrade. רואים באיור כי עד לאזור הטמפרטורות הנמוכות קו ה- onset מתאים לקו המעבר המצופה, ובטמפרטורות הנמוכות (מתחת ל- $0.2T_c$) ה- onset נוסק לשדות גבוהים, כאשר התנהגות זו זהה לקו השיא הראשון.



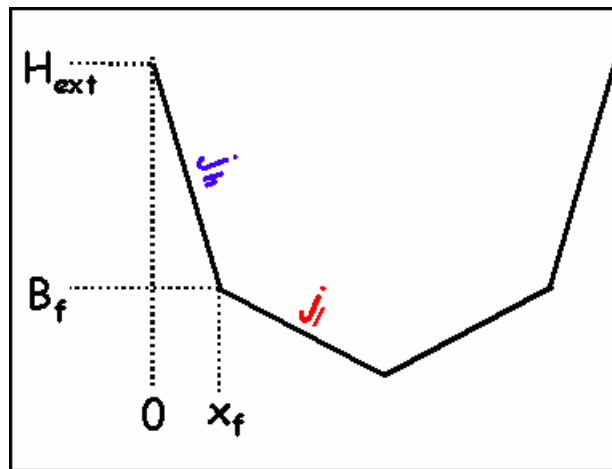
איור 8: דיאגרמת פאזות מגנטית ב-NCCO. המשולשים מציינים את שדות ה-onset, העגולים מציינים את שדות השיא הראשון, והקו המקווקו מציינ את קו המעבר המצופה [15].



איור 9: לולאות מגנטיזציה של NCCO בטמפרטורות של 2, 4.3 K [15].

1.8 מצבים טרנזיינטיים והשפעתם על השיא השני

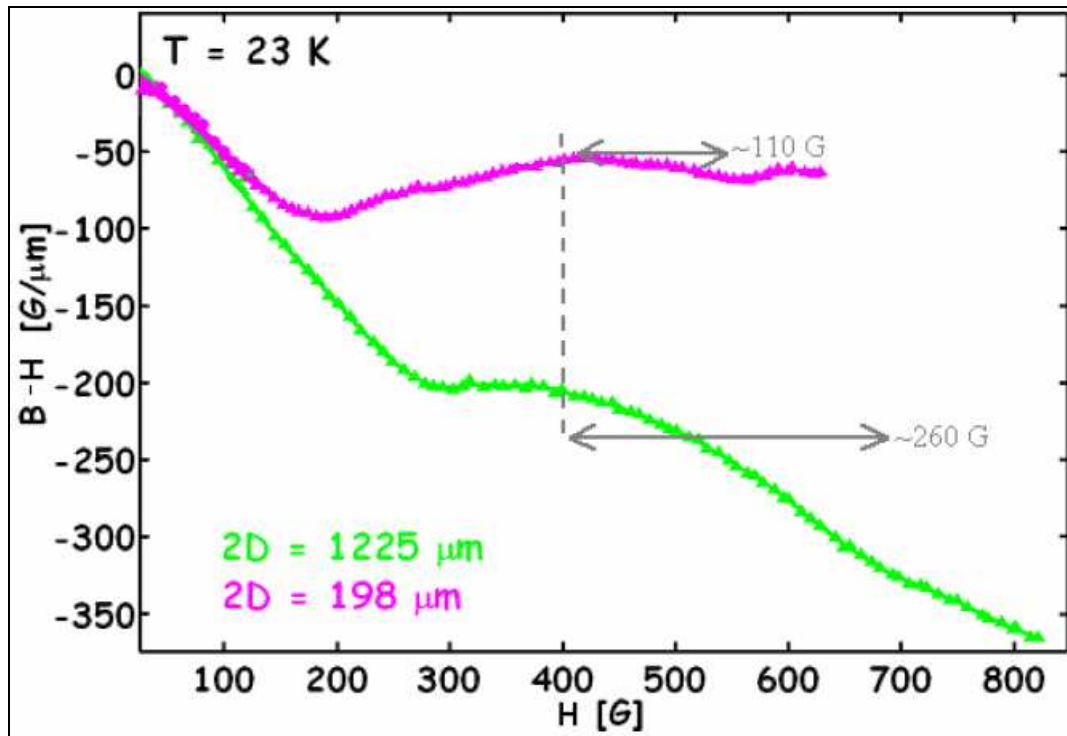
ההנחה המקובלת היא כי השיא השני במוליכי העל הוא כתוצאה ממעבר פאזה מוצק-מוצק של מערך הפלקסונים [12,13,16]. מעבר הפאזה מתבטא בחדירה של הפלקסונים במצב לא מסודר לדגם. מצב זה מתאפיין בזרם נפח גבוה וכתוצאה מכך המגנטיזציה גדלה ונוצרת האנומליה של השיא השני. השדה שבו מתחיל המצב הלא מסודר לחדור לדגם הוא שדה ה- $onset$. מצב זה ממשיך לחדור לדגם כאשר ממשיכים להעלות את השדה המגנטי החיצוני עד שמגיעים לשדה שהמצב הלא מסודר ממלא את כל הדגם ואז המגנטיזציה מפסיקה לגדול. שדה זה הוא שדה השיא השני. דהיינו, בשדות שמתחת ל- $onset$, שאז נמצאים בפאזה המסודרת, הזרם שבדגם הוא הזרם הנמוך בלבד, ומעל השיא השני הזרם הוא הזרם הגבוה ובתחום השדות שביניהם שני הזרמים משמשים יחד; תחום זה הוא התחום של מצבים טרנזיינטיים. באיור 10 אפשר לראות את נקודת השבר בין הזרם הגבוה הטרנזיינטי לזרם הנמוך.



איור 10: תאור סכמתי של התפלגות האינדוקציה בדגם. מיקום השבר x_f המבדיל בין הזרם הגבוה j_h לבין הזרם הנמוך j_l .

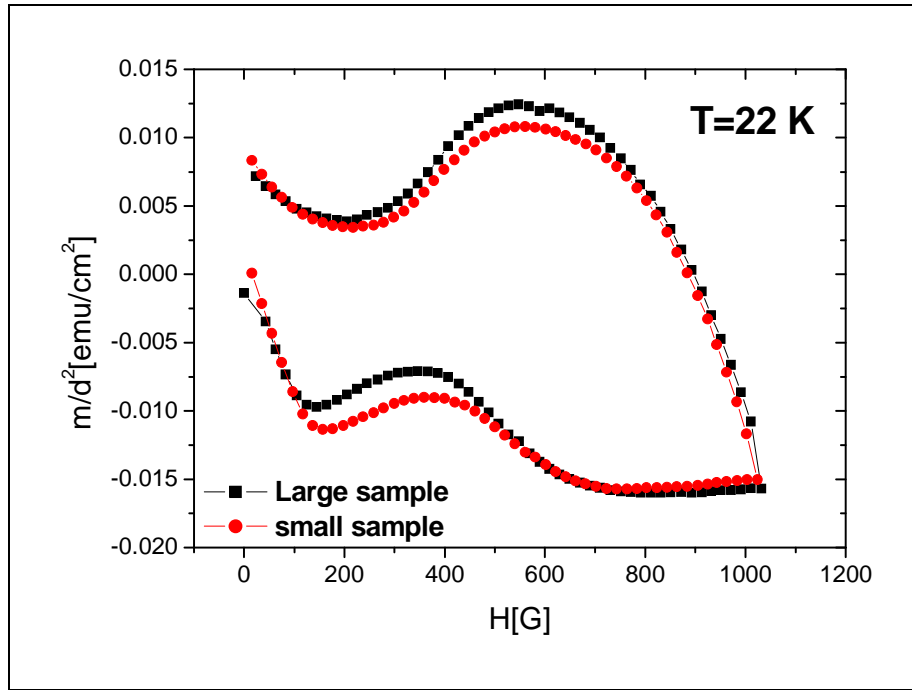
ממודל זה יוצא כי שינוי ברוב הדגם צריך לגרום שינוי ישיר במרחק שבין ה- $onset$ לבין השיא השני. מכיוון שבמצב לא מסודר המתאפיין בזרם גבוה שיפוע המגנטיזציה חד יותר לכן השדה שבו המצב הלא מסודר יגיע למרכז הדגם יהיה גבוה יותר עבור דגם רחב יותר. תוצאות מתאימות להנחה זו התקבלו בסימולציות ובמידות מגנטו-אופטיות (MO) [17]. איור 11 מתאר לולאות

מגנטיזציה, בדגם רחב ובדגם צר, שהתקבלו במדידות MO. באיור רואים שמרחק השיא השני מה- onset הוא גדול יותר עבור הדגם הרחב.



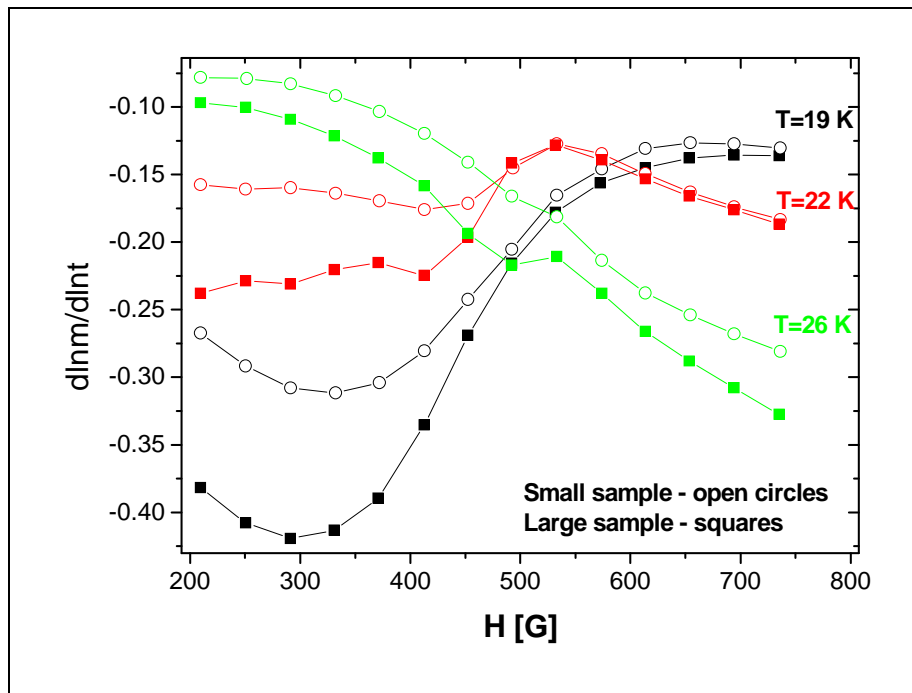
איור 11: לולאות מגנטיזציה ב- 23K עבור הדגם הרחב והדגם הצר. רואים הבדל של כ- 150 Gauss בין המיקום של השיא בין הדגם הגדול לדגם הקטן [17].

אפקט נוסף המצביע על מציאותם והשפעתם של המצבים הטרנזיינטיים קשור לנרמול של עקומות המגנטיזציה לדגמים בעלי רוחב שונה. עפ"י מודל Bean נתן ל'נרמל' את העקומות ע"י חלוקת הערך הנמדד ב- d^2 , כאשר d הוא רוחב הדגם. מהשוואת לולאות מגנטיזציה של שני דגמי BSCCO, רחב וצר, התקבל כי לאחר נרמול המגנטיזציה של הלולאות לא מתקבלת חפיפה באזורים הטרנזיינטיים [18]. עבור הדגם הצר מתקבלת מגנטיזציה גבוהה יותר בהעלאת השדה ואילו בהורדת השדה המגנטיזציה של הדגם הרחב גבוהה יותר. דוגמא לכך אפשר לראות באיור 12. ההסבר לכך הוא שבתחומי השדות הללו ישנן שתי תרומות למגנטיזציה האחת מזרם נמוך והשניה מזרם גבוה. החלוקה בין הזרמים אינה פרופורציונית בין שני הדגמים ולכן מתקבלת מגנטיזציה שונה עבור שני הדגמים.



איור 12: לולאות מגנטיזציה מנורמלות של הדגם הרחב והצר [18].

השפעה נוספת שהוסברה לפי מודל זה היא קצבי רלקסציה שונים שנמדדו עבור הדגם הרחב והדגם הצר [18]. דוגמא לכך אפשר לראות באיור 13: קצבי הרלקסציה עבור הדגם הרחב גבוהים משל הדגם הצר בתחום השדות הנמוכים, שהוא האזור הטרינזיטני.



איור 13: קצבי הרלקסציה עבור הדגם הרחב והצר [18].

עפ"י מודל זה ההרפייה של המצבים הטרנזיינטיים היא שמשפיעה על קצבי הרלקסציות, לכן נוצר ההבדל בשדות הנמוכים שבהם קיים המצב הטרנזיינטי. מכיוון שהאזור הטרנזיינטי בדגם הגדול הוא גדול מזה של הדגם הקטן לכן הרפיית המצבים הטרנזיינטיים תהיה בו משמעותית יותר ולכן קצב הרלקסציה יהיה בו גדול יותר.

1.9 סיכום

לסיכום, בפרק זה תארנו את בעיית קו המעבר הייחודי של LSCO. קו זה מראה תלות מפתיעה בטמפרטורה בטמפרטורות נמוכות. אנו נבדוק במחקר זה האם הפתרון של de Andrade, כי יכולה להיות השפעה של מחסומי שפה על מדידות קו המעבר, יתאים גם ל-LSCO. בפרק זה תארנו גם את השפעתם של מצבים טרנזיינטיים על השיא השני של BSCCO. במחקר זה נבדוק האם מצבים טרנזיינטיים קיימים ב-LSCO ומה השפעתם על השיא השני. כפי שנראה בפרק המסכם של העבודה, הממצאים שלנו עשויים לשפוך אור על התנהגות השיא השני של LSCO וההתאמה של השיא השני לקו מעבר הפאזה.

2. שאלות המחקר

2.1 השפעת גובה הדגם על קו המעבר של LSCO

התלות הייחודית של קו המעבר של LSCO בטמפרטורה באזור הטמפרטורות הנמוכות מגדירה את השאלה הראשונה למחקר זה: האם קו המעבר של LSCO מושפע ממחסומי שפה התלויים בגובה הדגם, כמו שהראה de Andrade ב- NCCO?

2.2 השפעת רוחב הדגם על השיא השני ב- LSCO

שינויים בשיא השני כתלות ברוחב הדגם נמדדו ב- BSCCO. השינויים הוסברו לאחרונה בידי קליסקי [17] ופלגר [18] כתוצאה ממצבים טרנזיינטיים. ממצאים אלה מגדירים את שאלת המחקר השנייה: האם המצבים הטרנזיינטיים משפיעים גם על התכונות המגנטיות של LSCO על מבנה צורת הלולאה, על התלות ברוחב הדגם של מרחק ה- onset מהשיא השני ועל קצבי הרלקסציות?

3. אופן ביצוע הניסוי

3.1 מתודולוגיה

כדי לענות לשתי השאלות הנ"ל נמדוד דגמי LSCO בגיאומטריות שונות. מחסומי השפה התלויים בגובה הדגם משפיעים על השיא הראשון ולכן עפ"י de Andrade, צריכים גם להשפיע גם על קו המעבר סדר-אי סדר. השפעתם של המצבים הטרנזיינטים על צורת המגנטזציה של השיא השני ועל קצבי הרלקסציה תלויה ברוחב הדגם ולכן צריכים להשפיע על המדידות.

3.2 הדגמים

בכדי לקבל דגמים בעלי גאומטריות שונות לקחנו גביש LSCO גדול יחסית וע"י חיתוך בעזרת מסור חוט וליטוש קבלנו דגמים בעלי צורה מלבנית במימדים שונים. כל הדגמים הם מאותו הגביש, בעל טמפרטורה קריטית של 32 K. מימדי הדגמים:

La1 – $1 \times 2.3 \text{ mm}^2$. גובהו לא אחיד בין 0.2 ל- 0.65 מ"מ.

את La1 ליטשנו ואחרי הליטוש הוא נקרא La2.

La2 – $1 \times 2.3 \text{ mm}^2$. גובהו 0.15 מ"מ. משקלו: 2.2 mg .

Lb1 – $1.5 \times 1.9 \text{ mm}^2$. גובהו לא אחיד בין 0.3 ל- 0.4 מ"מ. משקלו: 9.7 mg .

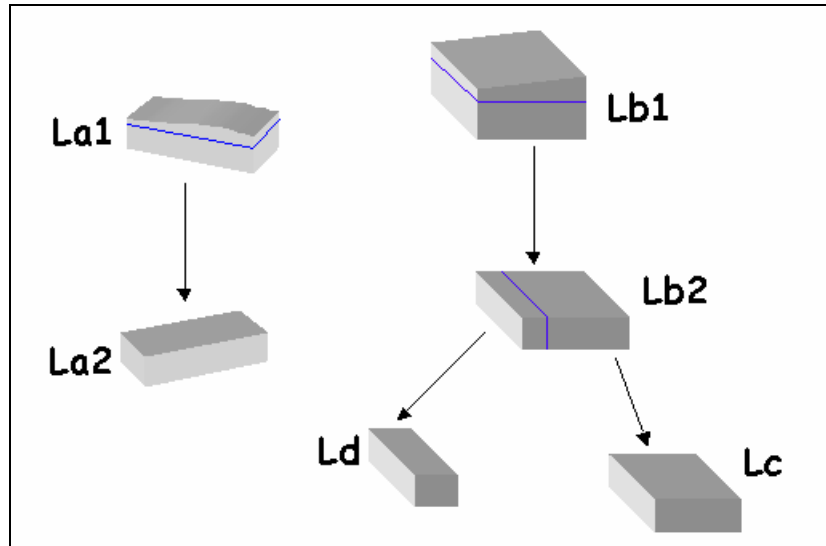
את Lb1 ליטשנו ואחרי הליטוש הוא נקרא Lb2.

Lb2 – $1.5 \times 1.9 \text{ mm}^2$. גובהו 0.18 מ"מ. משקלו: 3.2 mg .

את Lb2 חתכנו לשני דגמים Lc, Ld.

Lc – $1 \times 1.9 \text{ mm}^2$ גובהו 0.15 מ"מ. משקלו: 2 mg .

Ld – $0.5 \times 1.8 \text{ mm}^2$ גובהו 0.18 מ"מ. משקלו: 1.1 mg .



איור 14: תאור סכמטי של הדגמים השונים

3.3 אמצעי המדידה

המדידות המגנטיות נעשו במערכת SQUID דגם MPMS-5S מתוצרת Quantum Design, המערכת עובדת בתחום שדות שבין 5T לבין 5T- ובתחום טמפרטורות שבין 1.7K ל- 400K.

המערכת בנויה מארבעה טבעות על מוליכות בעלות צמתי ג'וזפסון, כאשר במהלך המדידה הדגם נע בין ארבע הטבעות. כל שינוי בשטף המגנטי גורם לשינוי בזרם של הטבעות. ומחישוב השינויים בזרם מקבלים את המומנט המגנטי של הדגם.

טכניקות המדידה שהשתמשנו היו מדידות DC ומדידות RSO. מדידת DC היא מדידה אשר בה הדגם נע דרך מערך של 4 טבעות ג'וזפסון בקפיצות קטנות תוך כדי מדידת המומנט המגנטי בכל נקודה. לעומתה מדידת RSO הדגם נע באזור שבו הנגזרת של המגנטיזציה הוא הגדול ביותר באוסילציות קטנות. היתרון של מדידות RSO על פני מדידות DC מתבטא ברגישות גבוהה יותר ונקיה יותר מרעשים. יתרון נוסף לטכניקה זו נובע מהמרחק הקצר שהדגם נע הוא זמן מדידה קצר יותר, תכונה החשובה למדידות רלקסציה.

המדידות שהתבצעו היו לולאות ZFC, שבהם הדגם מחומם לטמפרטורה הגבוהה מטמפרטורה קריטית ולאחר מכן מקורר לטמפרטורה שבה רוצים למדוד כאשר אין שדה חיצוני. המטרה בחימום זה היא הוצאת הפלקסונים שקיימים בדגם ורק כך ניתן למדוד את השיא הראשון. כן התבצעו מדידות רלקסציה. במדידות אלו

העלינו את השדה עד לשדה מסוים ושם חיכינו 20 דקות כאשר בכל דקה ביצענו מדידת מגנטיזציה.

בכל המדידות השדה שהופעל היה מקביל לציר c של הדגם. הסיבה לכך היא שבכדי להשוות בין הדגמים ישנה חשיבות גבוהה לציר המדידה בגלל התכונות האנאיזטרופיות של החומר [2]. שינויים בזווית קטנות בכיוון c אינם גורמים לשינוי משמעותי במגנטיזציה. לעומת זאת כאשר השדה הוא מאונך לציר c שינוי קטן בזווית גורם לשינוי גדול במגנטיזציה.

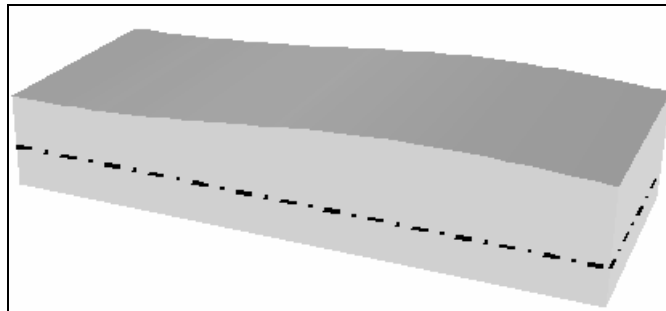
4. השפעת גובה הדגם על קו המעבר הנמדד

4.1 קו מעבר הפאזה של LSCO והפתרון של de Andrade

מכיוון שבעיית קו מעבר הפאזה של LSCO היא בעלת מאפיינים דומים לזה של NCCO, ניסינו לבדוק האם הפתרון של de Andrade, הטוען כי התנהגות ה-onset בטמפרטורות נמוכות מושפעת ממחסומי השפה ואינה מתארת את קו מעבר הפאזה האמיתי, יסביר גם את מדידות ה-onset של LSCO.

4.2 הניסוי

בניסוי השתמשנו בשני דגמים, ע"י ליטוש הדגם הקטנו את גובהם ובכך הקטנו את מחסומי השפה של הדגמים התלויים בגובהם. הדגמים במצבם התחילי לפני הליטוש היו במישור ab בעלי צורה מלבנית אך בציר c הגובה לא היה אחיד, אחרי הליטוש קבלנו דגם מלבני שגובהו אחיד.



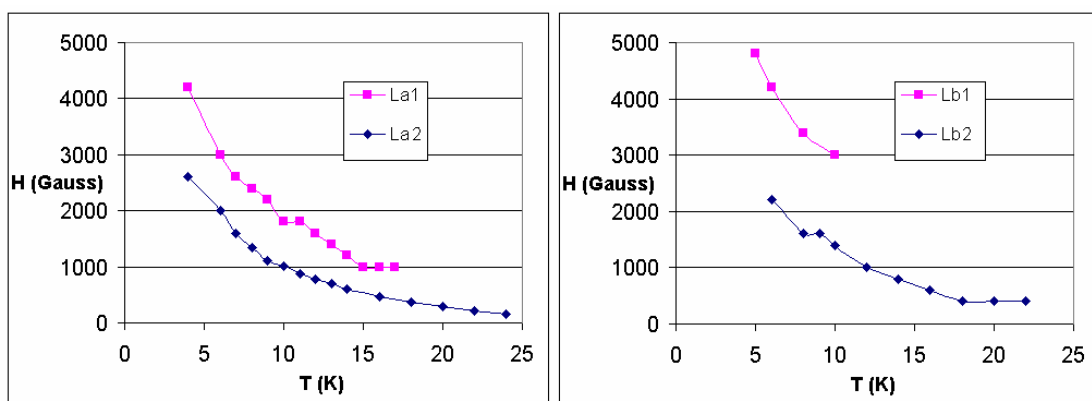
איור 15: צורת הדגם לפני הליטוש, הקו המקווקו מציין את הגובה החדש

מכיוון שהדברים שהשתנו היו רק הגובה והצורה הגיאומטרית של הגביש, השינוי נוצר רק במחסומי השפה ולא במחסומי הנפח התלויים רק ברוחבו של הדגם [19].

הסיבה שרצינו לבדוק רק את שינויי הגובה נובעת מכך שרצינו ליצור שינויים במחסומי השפה בלבד, שהם לא אמורים ליצור שינויים בצורת הלולאה (שינויים ברוחב הדגם יכולים לשנות את צורת הלולאה בגלל המצבים הטרנזיינטים השונים).

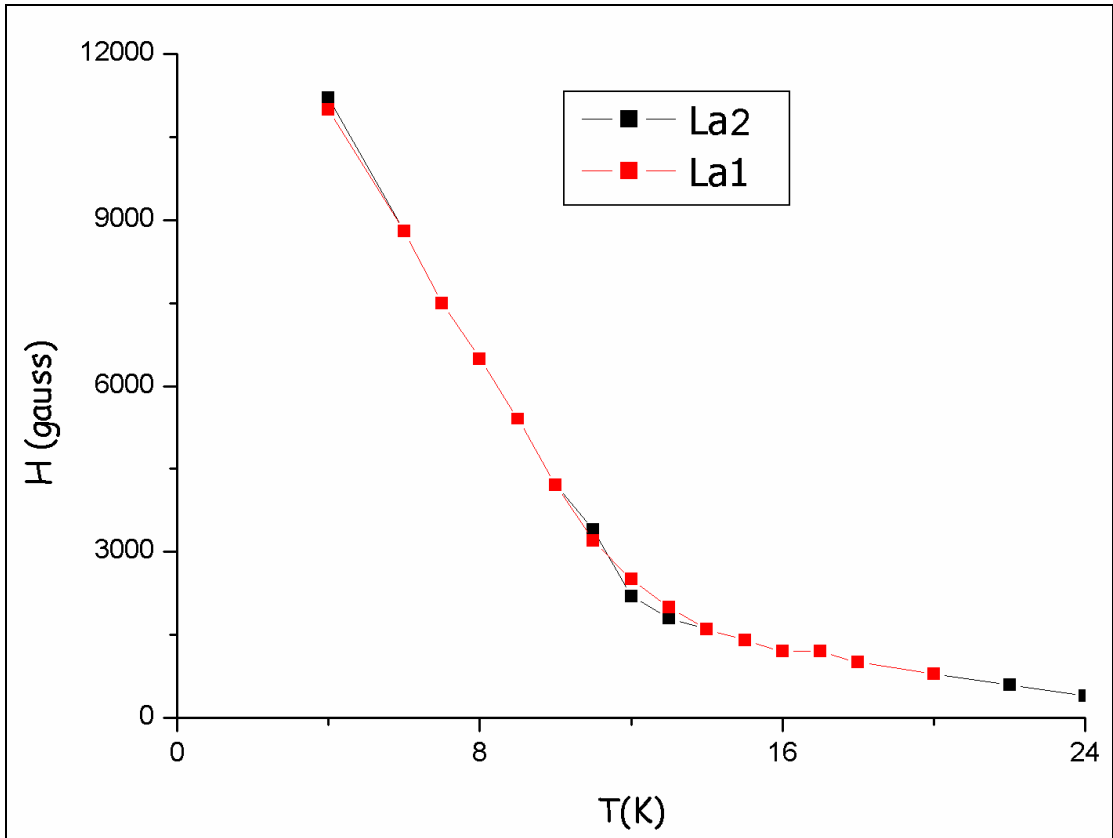
הדגם הראשון לפני ליטוש הוא: La1 והשני הוא: Lb1, ראה לעיל עמ' 14.

התוצאות של התנהגות השיא הראשון המוצגים באיור 16 התאימו למצופה - קבלנו כי השיא הראשון עבור הדגם הגבוה היה בשדות גבוהים מאלו של הדגם הנמוך. כלומר, מחסומי השפה בדגם הנמוך קטנים מאלה של הדגם הגבוה כמצופה מן הקשר של מחסומי השפה ב- t/D (ראה בהקדמה).

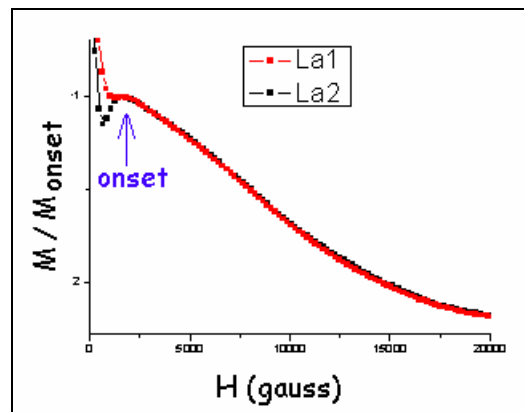


איור 16: שדות הפיק הראשון עבור La1,2 ו- Lb1,2

למרות ההשפעה הברורה של מחסומי השפה על השיא הראשון, התוצאות עבור השיא השני הראו, כי אין שינוי משמעותי עבור שדה ה- onset כתוצאה משינוי מחסומי השפה. לא ראינו, איפא, את ההתנהגות שציפינו לראותה, על בסיס הסבריו של de Andrade היינו, ששדות ה- onset ינועו לשדות נמוכים יותר עם הורדת מחסומי השפה. באיור 17 ניתן לראות כי השדות של ה- onset של השיא השני זהים בדגם הגדול ובדגם הקטן למרות השינויים המשמעותיים בשיא הראשון, ובאיור 18 אפשר לראות כי אין שינוי אפילו בצורת לולאת המגנטומציה למרות השינוי במחסומי השפה.



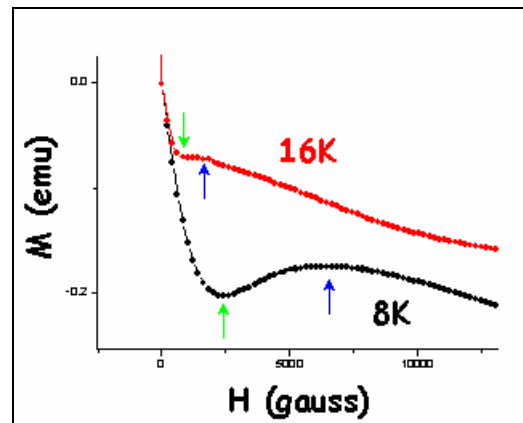
איור 17: שדות ה- onset של La1,2



איור 18: לולאות מגנטיזציה מנורמלות בתחילת השיא השני בדגמים La1,2 בטמפרטורה של 14K

הבדל נוסף שהבחנו בו, בשונה מ- NCCO, הוא המרחק בין ה- onset לבין השיא הראשון. ב- NCCO בטמפרטורות נמוכות עם הירידה בטמפרטורה השיא הראשון נע אל שדות גבוהים יותר והתקרבו אל השיא השני ולכן ה- onset הנמדד אינו המקום האמיתי שבו השיא השני מתחיל אלא הוא מוסט לשדות גבוהים יותר ולכן מקבלים אפקט מלאכותי. לעומת זאת ב- LSCO כאשר היו דגמים בעלי

מחסומי שפה גבוהים קבלנו אפקט הפוך. דוקא בטמפרטורות הגבוהות השיא הראשון קרוב אל השיא השני כמו שאפשר לראות באיור 19, ואלו בטמפרטורות הנמוכות הוא היה מובדל ממנו, דהיינו שאם יש אפקט של מחסומי שפה ב-LSCO זה יהיה דוקא בתחום הטמפרטורות הגבוהות, דבר שמבדיל יותר את ההתנהגות של LSCO מ-NCCO. ההתנהגות הזו אין סיבתה מחסומי השפה אלא היא תוצאה מהתלות של ה-onset בטמפרטורה.



איור 19: לולאות מגנטיזציה של La1 בטמפרטורות 8,16 K. רואים כיצד השיא הראשון צמוד לשיא השני כשעולים בטמפרטורה וחדות ה-onset מטשטשת

כדי להבין מדוע מחסומי השפה אינם משפיעים על השיא השני ב-LSCO נעיר שבדגם זה, בניגוד ל-NCCO, גודלו של שדה השיא הראשון בטמפרטורות נמוכות נמוך בהרבה יחסית לשדה ה-onset. כלומר למחסומי השפה אין השפעה כל כך גדולה על הזתת ה-onset באזור הטמפרטורות הנמוכות.

4.4 מסקנה

בניגוד לתופעות שהתגלו ב-NCCO, לא הובחנה ב-LSCO כל השפעה של מחסומי השפה על קו המעבר הנמדד. הסיבה להבדל בתוצאות בין הדגמים נובעת, כנראה, מזה שב-LSCO התלות של ה-onset אינה נובעת ממחסומי שפה, אלא קו המעבר באמת תלוי בטמפרטורה. תלות זו גורמת לכך שבטמפרטורות נמוכות השיא השני יהיה בשדות רחוקים מהשיא הראשון ולכן השפעת התזוזה של השיא הראשון על השיא השני אינה מורגשת.

5. השפעת רוחב הדגם על השיא השני

5.1 השפעת רוחב הדגם על השיא השני ב-BSCCO

ממדידות שנעשו ב-BSCCO התברר כי רוחב הדגם משפיע על השיא השני. ההבדלים שנמצאו היו: א) במרחק שבין ה-onset והשיא השני, ככל שהדגם רחב יותר כך גם המרחק בין ה-onset לבין השיא השני גדל. ב) אי התאמה באזורים הטרנזיינטיים בלולאה לאחר נרמול הלולאה. ג) הבדל במדידות רלקסציה באזור הטרנזיינטי.

5.2 הניסוי

הדגמים שהשתמשנו בהם למדידות אלו הם: La_2 , Lb_2 , Ld אשר הבדלי הגובה ביניהם קטן וההבדל העיקרי הוא ברוחב הדגמים שהוא: 0.5, 1, 1.5 mm. החשיבות במדידות אלו הם שינויי הרוחב בין הדגמים שהם משפיעים על המצבים הטרנזיינטיים ולא שינויי הגובה שמשפיעים רק על השיא הראשון (כמו שהוכח בפרק הקודם).

בכדי לאשר את קיומם של מצבים טרנזיינטיים בצענו שני סוגי מדידות: לולאות רלקסציה ומדידות רלקסציה.

בכדי שנוכל להשוות בין לולאות המגנטיזציה של הדגמים השונים הנחנו כי בכל הדגמים הזרם הקריטי (לפי מודל Bean) היוצר את האנומליה של השיא השני זהה.

הנרמול נעשה בשני שלבים: בשלב הראשון הורדנו רכיב דיאמגנטי שעליו ישבה הלולאה, ההתייחסות אל הרכיב הזה היתה בקירוב כתלוי ליניארית בשדה המגנטי (H) ושאינו תלוי בטמפרטורה (מצאנו אותו בטמפרטורות גבוהות לפי קירוב ליניארי של האזור ההדיר אחרי הלולאה).

השלב השני היתה הכפלת המגנטיזציה בפקטור כך שהלולאות ישבו אחת על השניה.

באופן מעשי אפשר למצוא את הפקטור באחת משתי הדרכים הבאות:

א) לפי הקשר בדגמים מלבניים בין המגנטיזציה לבין הזרם

$$m = J \cdot \frac{V \cdot a(1 - \frac{a}{3b})}{4} \quad b \geq a \quad [20]$$

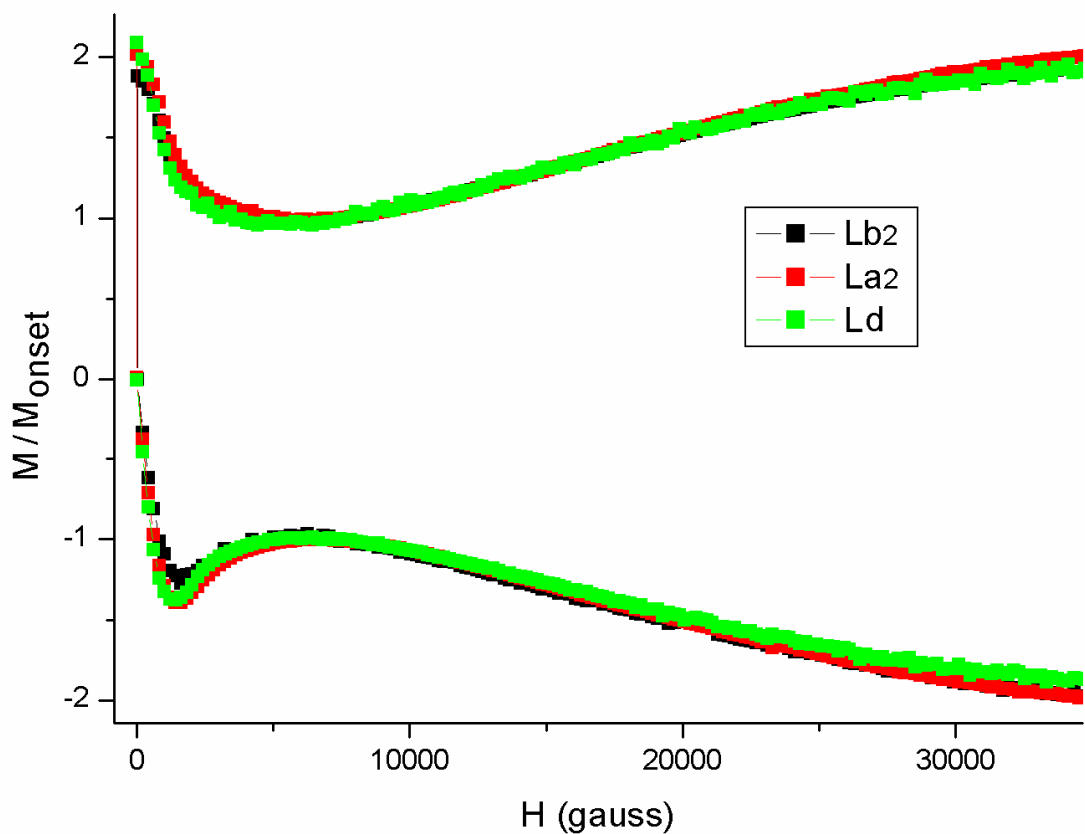
ב) לפי ההנחה כי ב- onset הזרם בכל הדגמים ולכן אפשר לנרמל לפי M/M_{onset} (ראה להלן בעמ' 36 בנספח א' מדוע בחרנו דוקא ב- onset). מצאנו כי בקירוב טוב שתי הדרכים מובילות לאותו פקטור תיקון. ההבדלים הקטנים בין הפקטורים הם כנראה כתוצאה מזה שהגיאוטרסה היתה קרובה למלבנית ולא ממש מלבנית. לעומת זאת במדידות הרלקסציה לא היה צורך בנרמול, מכיוון שקצבי

$$S = \frac{\partial \ln M}{\partial \ln t} = \frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial \ln t}$$

הרלקסציה הם בהגדרתם מנורמלים

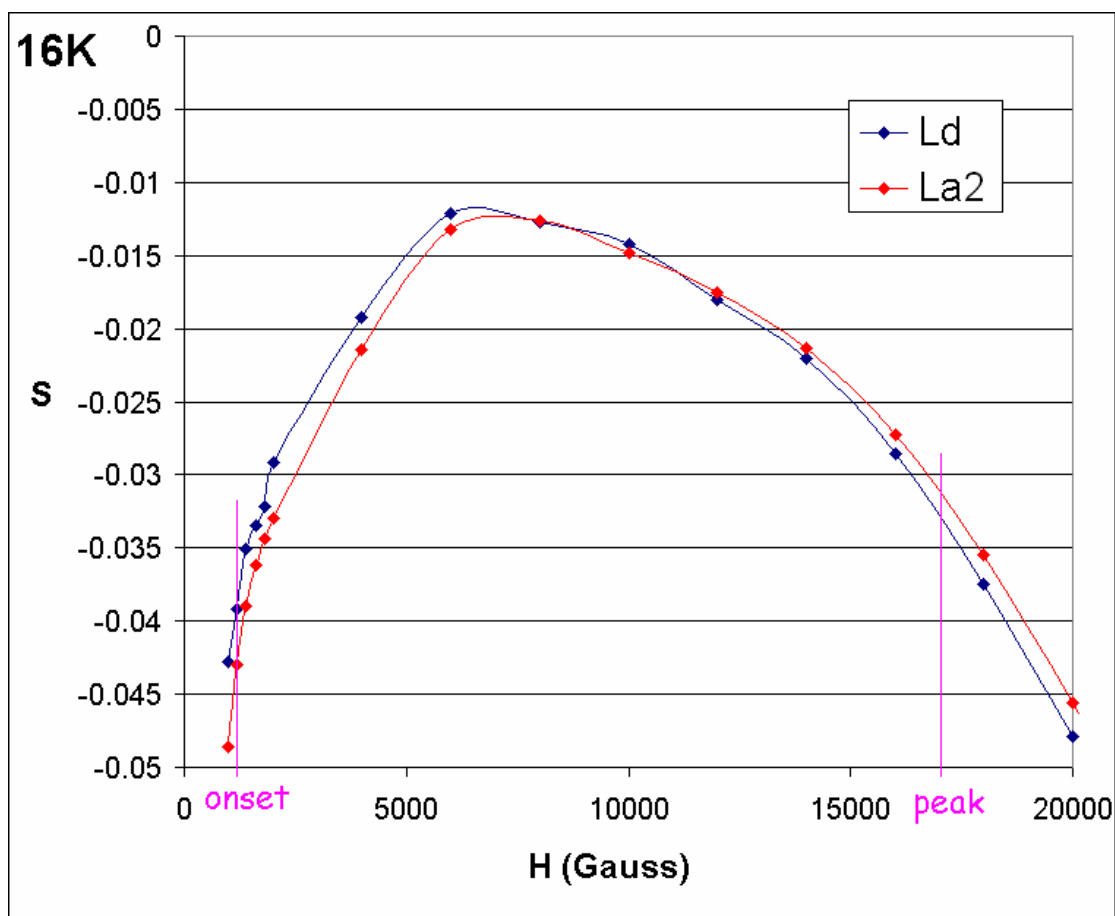
5.3 תוצאות הניסוי

על פי ההשוואה בין הלולאות רואים כבאיור 20 שמתקבלת התאמה בכל התחום שבין ה- onset לבין השיא השני. תוצאות אלו שונות מהתוצאות שנצפו ב- BSCCO ששם נצפו שינויים במגנטיזציה באזור הטרמזיינטי. ראה איור 12, כתוצאה מהמצבים הטרמזיינטיים. תוצאות אלו ב- LSCO מעידות כי ב- LSCO אין מצבים טרמזיינטיים.



איור 20: לולאות מגנטיזציה מנורמלות של שלושת הדגמים.

מהשוואה של קצבי הרלקסציות כבאיור 21 התקבל כי גם קצבי הרלקסציה זהים בין הדגמים. השינויים שרואים זניחים, שינויים כאלו יכולים להיווצר אפילו מחזרה על הניסוי. דבר המחזק עוד את הטענה דלעיל, שהרי אם היו מצבים טרנזיינטיים היינו מצפים כי עבור הדגם הרחב היו קצבי הרלקסציה מהירים יותר מזה של הדגם הצר.



איור 21: קצבי הרלקסציה דומים בשני הדגמים.

5.4 מסקנה

על בסיס הידוע מ-BSCCO, ובהנחה שבאזור שבין ה- onset לבין השיא השני ישנם מצבים טרנזיינטיים, היינו מצפים לשינויים במגנטיזציה ובקצבי הרלקסציה בין דגמים בעלי רוחב שונה. מכיוון שלא נראה שום רמז לכך בנסיון, נראה שאין כלל מצבים טרנזיינטיים ב-LSCO. מתוצאות אלו נראה כי אפילו מצב מטהסטבילי, המתאפיין בכך ששתי הפאזות נמצאות יחד, לא קיים ב-LSCO.

חיזוק נוסף לכך שאין מצב מטהסטבילי ב-LSCO מתקבל גם מנרמול הלולאות
בטמפרטורות שונות, ראה להלן בנספח ב' עמ' 38.

6. ההשפעה של גודל הדגם באזור שאחרי השיא השני

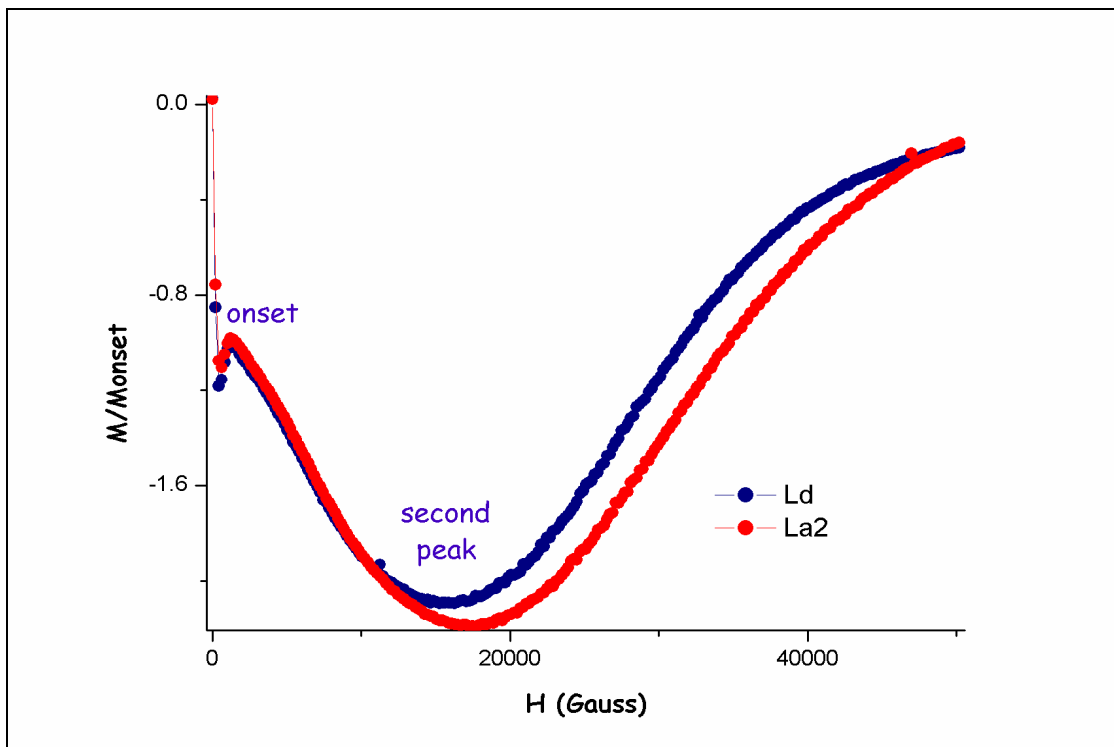
6.1 השפעת רוחב הדגם בשדות שמעל השיא השני

על אף שבתחום השדות שבין ה- onset לבין השיא השני לא הובחנו הבדלים משמעותיים לגבי המדידות המגנטיזציה ומדידות רלקסציה בין הדגמים השונים, במדידות שבצענו בתחום השדות שלאחר השיא השני מצאנו מספר הבדלים: שינוי במגנטיזציה בלולאות המגנטיזציה, הבדל גדול ברלקסציה והבדל בהתנהגות של H_{irr} .

6.2 הניסוי ותוצאותיו

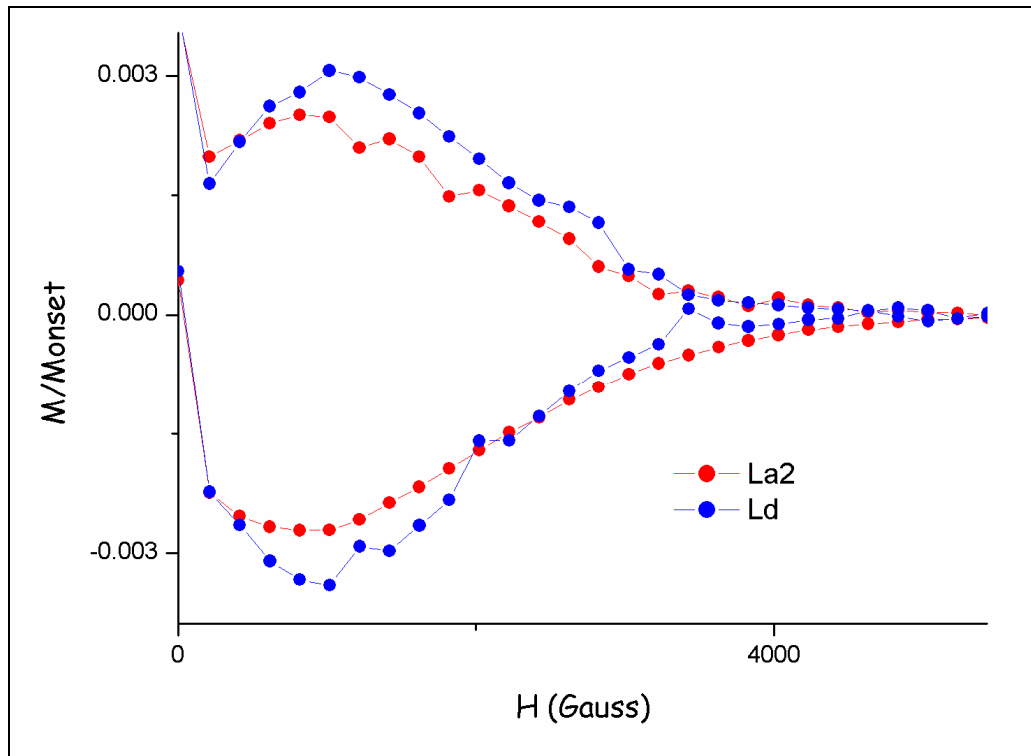
הניסוי שהתבצע הוא המשך של הניסוי המתואר בפרק 5 רק שבפרק זה מדובר בשדות שמעל השיא השני.

מהשוואה בין לולאות מנורמלות של דגמים בעלי רוחב שונה מתקבל כי המגנטיזציה היא זהה עד אזור השיא השני ומשם נוצר הבדל, שככל שהדגם צר כך המגנטיזציה שלו תהיה נמוכה יותר, כמתואר באיור 22.



איור 22: עקומות מגנטיזציה מנורמלות ב- 16 K של הדגם הרחב ושל הצר.

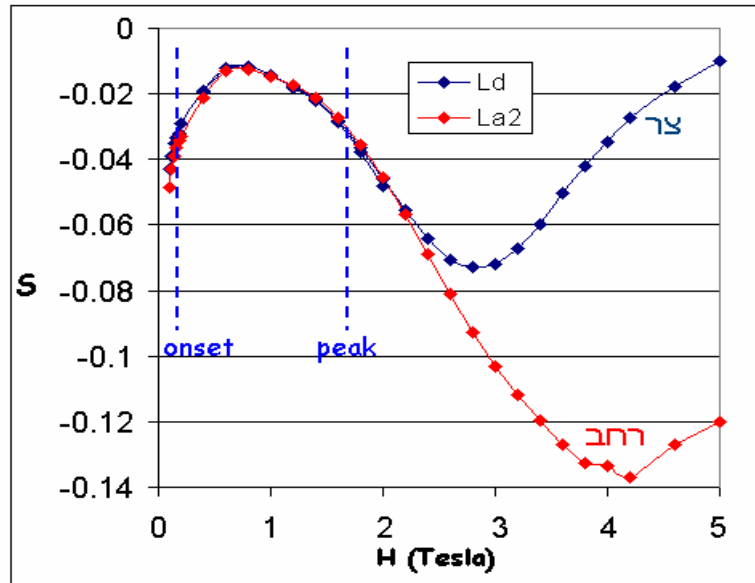
ההבדל שבין עקומות המגנטיזציה התהפך כאשר התקרבונו לטמפרטורת המעבר. ליד טמפרטורת המעבר הדגם הצר היה בעל מגנטיזציה גדולה מזו של הדגם הרחב כבאיור 23.



איור 23: לולאות המגנטיזציה המנורמלות של La2, Ld ב-28 K.

מהשוואה בין קצבי הרלקסציה עד אזור השיא השני קבלנו התנהגות זהה עבור הדגמים השונים. אבל, אחרי השיא השני נוצרת התפצלות כמתואר באיור 24 הדגם הרחב ממשיך להגדיל את קצבי הרלקסציה עם השדה לעומת הדגם הצר שקצבי הרלקסציה שלו קטנים עם השדה.

באזור השיא השני הרלקסציות גדלות ליניארית עם הגדלת השדה, עד לשדה מסוים ששם הקצבים מתחילים לקטון, שדה זה הוא תלוי ברוחב הדגם ככל שהדגם צר יותר כך שדה זה נמוך יותר.

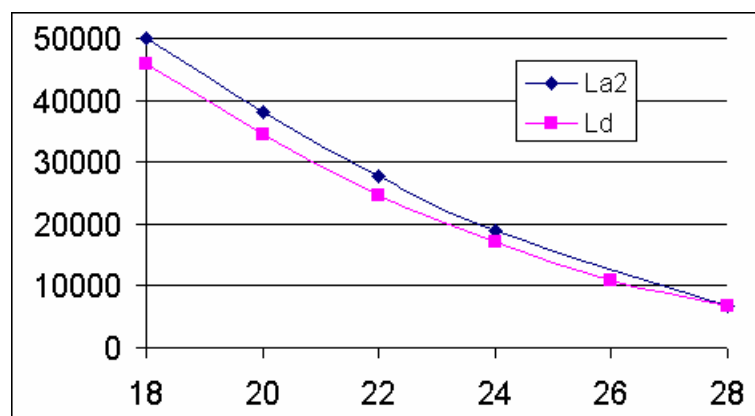


איור 24: קצבי הרלקסציה כתלות בשדה בשני הדגמים ב-16K.

תופעה זו לכאורה הפוכה ממדידות המגנטיזציה שקבלנו מקודם, שהרי בדגם עם קצבי הרלקסציה המהירים יותר אנו מצפים שתהיה מגנטיזציה נמוכה יותר.

6.3 ההבדל בהתנהגות של H_{irr}

את התנהגות השדה ההדיר כתלות בטמפרטורה אפשר לתאר כתלות בחזקה [21]. ע"י שינוי כמות ה- Sr [22] או החמצן [23] בדגם משתנה התלות של השדה ההדיר בטמפרטורה. שינוי רחב הדגם גם יצר תלות שונה בטמפרטורה. באיור 25 אפשר לראות כי תלות הקו ההדיר בטמפרטורה בדגם הצר מתונה מזו של הדגם הרחב. כאשר ב- 18 K ההבדל בין הדגמים מגיע לכ- $1/2$ Tesla.

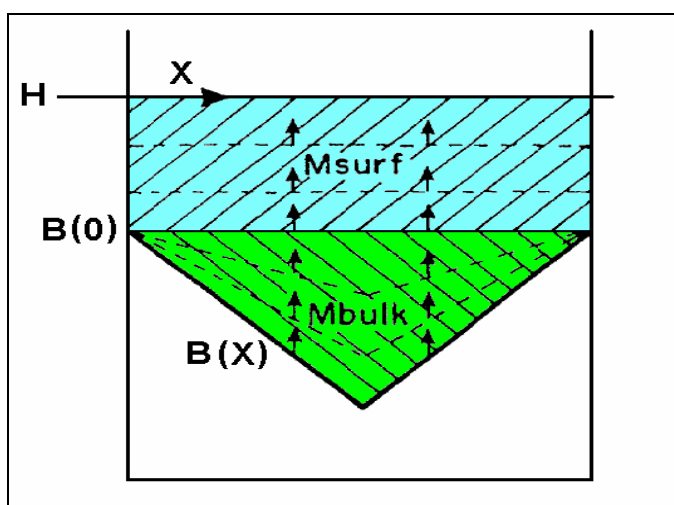


איור 25: דיאגרמה של השדה ההדיר כתלות בטמפרטורה

לעומת הקו ההדיר, עבור השיא השני השינויים שקיימים בין העקומות הם קטנים מאוד.

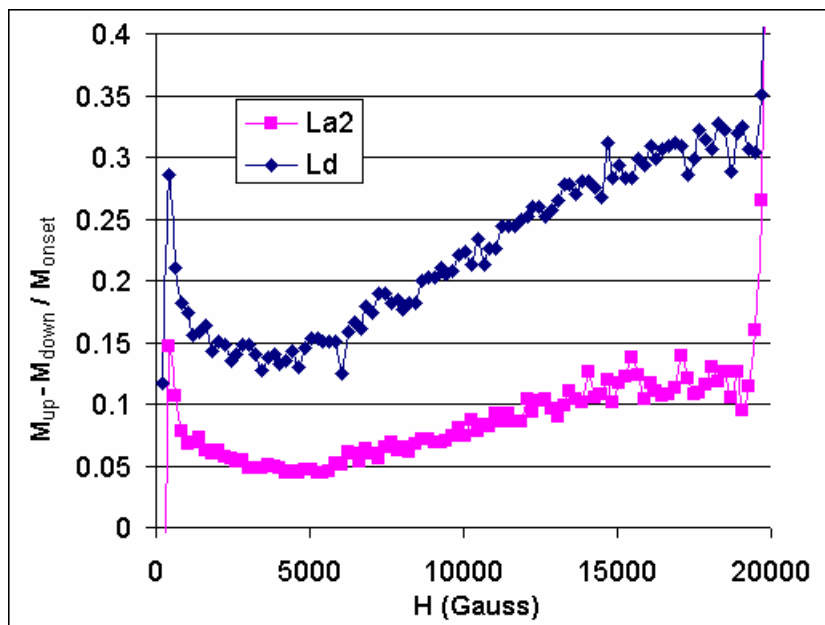
6.4 הסבר להבדלים ברלקסציות

ההסבר המוצע כאן לאפקט של רוחב הדגם על מדידות הרלקסציה הוא תוצאה של מחסומי שפה. ההסבר שלנו מבוסס על הרעיון כי מחסומי השפה תורמים למגנטיזציה בתחום השדות הגבוהים אך הרלקסציה של המגנטיזציה שנובעת ממחסומי השפה איטית מזו של הרלקסציה שמקורה במגנטיזציה של נפח הדגם. דבר זה גורם כי קצבי הרלקסציה המחושבים לפי $\frac{d \ln M}{d \ln t}$ לא יתנו את הרלקסציה של נפח הדגם המושפעת ממרכזי הלכידה אלא קצב ממוצע הכולל גם את הרלקסציה הקשורה להרפיה של מחסומי השפה [24], לכן כאשר המגנטיזציה שהיא תרומת מחסומי השפה היא זניחה יחסית למגנטיזצית נפח הדגם, נקבל קצבי רלקסציה המתארים את אנרגית האקטיבציה. אך כאשר המגנטיזציה שהיא תרומת מחסומי השפה היא מסדר גודל מגנטיזצית נפח הדגם קצבי הרלקסציה המחושבים אינם מתארים את אנרגית האקטיבציה. האזור שבו מחסומי השפה משפיעים הם כאשר הזרם הקריטי הוא נמוך וזה באזור השדות הגבוהים. באיור 26 אפשר לראות את צורת הרלקסציה כאשר הרפיית מחסומי השפה איטית.



איור 26: תמונת הפרופיל המגנטי כאשר הרפיית מחסומי השפה איטית משל מחסומי הנפח (מתוך [24])

מכיוון שמחסומי השפה הם תלויים ברוחב הדגם (אפשר לראות זאת לפי הפרש המגנטיזציה בין העלאת השדה להורדתו כבאיור 27) לכן גם תהיה לזה השפעה על קצבי הרלקסציה, בדגם צר שהוא בעל מחסומי שפה גדולים משל דגם רחב המגנטיזציה שהיא כתוצאה ממחסומי השפה תשפיע על קצבי הרלקסציה בשדות מוקדמים משל הדגם הרחב. אפקט זה נכון על שהשפעת מחסומי השפה קטנה עם הגדלה השדה המגנטי, מפני שגם הזרם הקריטי קטן עם הגדלת השדה והאפקט מתרחש כאשר הזרם הקריטי הוא סמוך לקו ההדיר ששם הוא קטן ביותר.



איור 27: ההפרש בין העלאת השדה להורדתו בדגמים La2, Ld מנורמלים לפי ה-
onset ב- 20 K

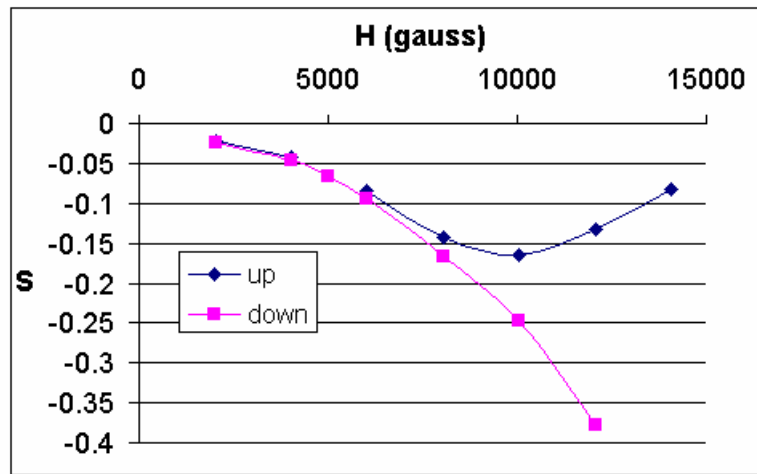
הראיות שמסייעות להסבר זה:

(1) מכיוון שקצבי הרלקסציה הפוכים לאנרגיית האקטיבציה ($s = \frac{k_B T}{U}$) ואנרגיית

האקטיבציה יורדת עם השדה המגנטי מעל השיא השני (כצפוי מאנרגיית אקטיבציה פלסטית [21],[25]), לכן אנו מצפים כי קצבי הרלקסציה רק יעלו עם השדה ולא תהיה ירידה כבתוצאות שקבלנו.

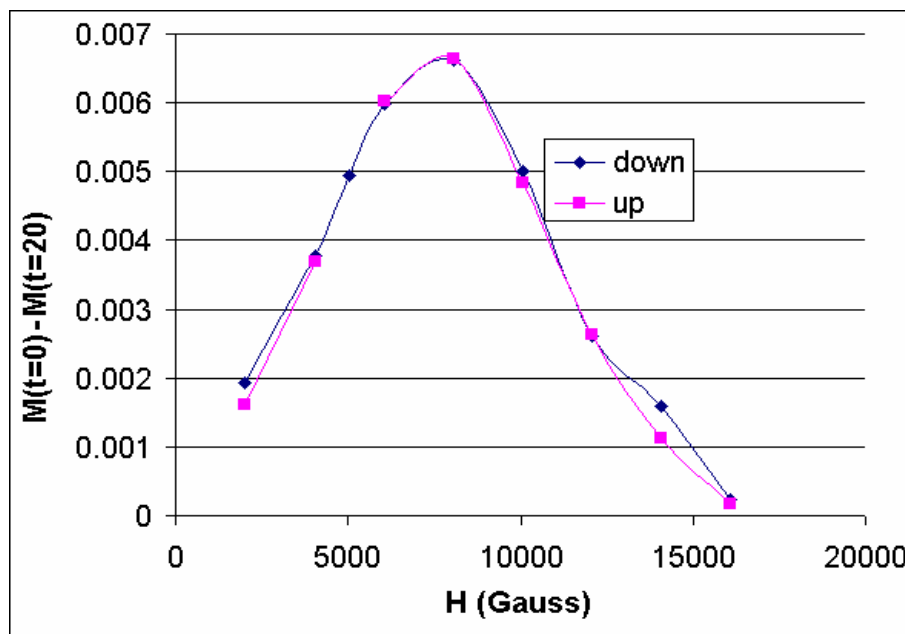
(2) מדידות של קצבי רלקסציה שבאיור 28 מראים כי בהורדת השדה המגנטי קבלנו עליה בקצבי הרלקסציה עם השדה כמצופה, לעומת זאת בהעלאת השדה קבלנו ירידה בקצבי הרלקסציה כאשר התקרבו לאזור ההדיר. את ההבדל טבעי לייחס

למחסומי שפה שהם משפיעים על כניסת הפלקסונים לדגם בהעלאת השדה ולא ביציאתם כאשר מורידים את השדה [26].



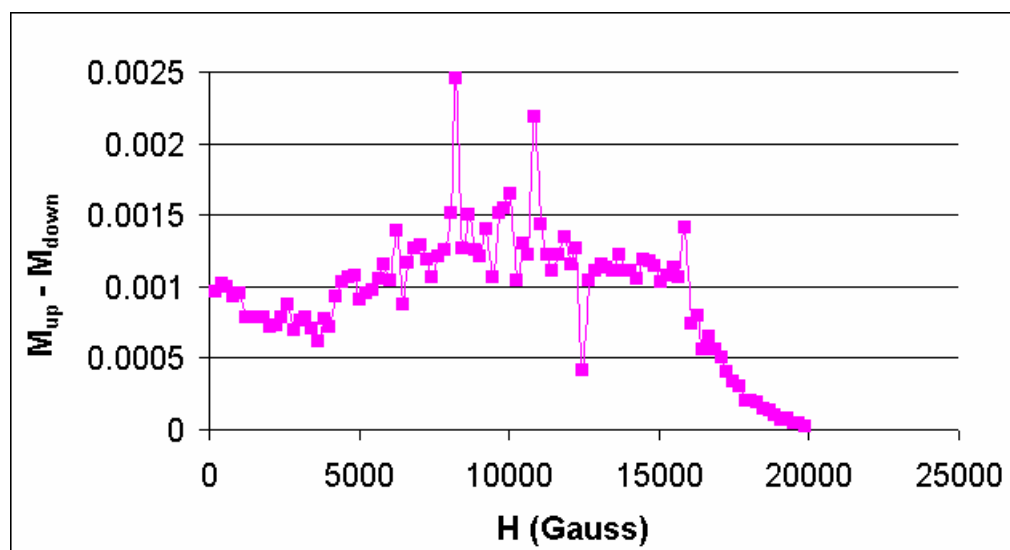
איור 28: קצבי רלקסציה של La2 בהעלאת ובהורדת השדה ב- 24 K

3) השינוי במגנטיזציה בעקבות הרלקסציות גם בהעלאת השדה וגם בהורדת השדה היה די דומה, כמתואר באיור 29, דבר המצביע כי ההבדל בקצבי הרלקסציה אינו תוצאה הנובעת בהבדל בשינוי המגנטיזציה אלא בערך המגנטיזציה עצמה.



איור 29: ההבדל במגנטיזציה בין תחילת הרלקציה לסופה בהעלאת ובהורדת השדה

4) ההבדל בין המגנטיזציה בהעלאת השדה ובין הורדת השדה שנשמר כמעט לכל אורך הלולאה כמתואר באיור 30 דבר מצביע כי מחסומי השפה אפקטיביים גם בשדות גבוהים.

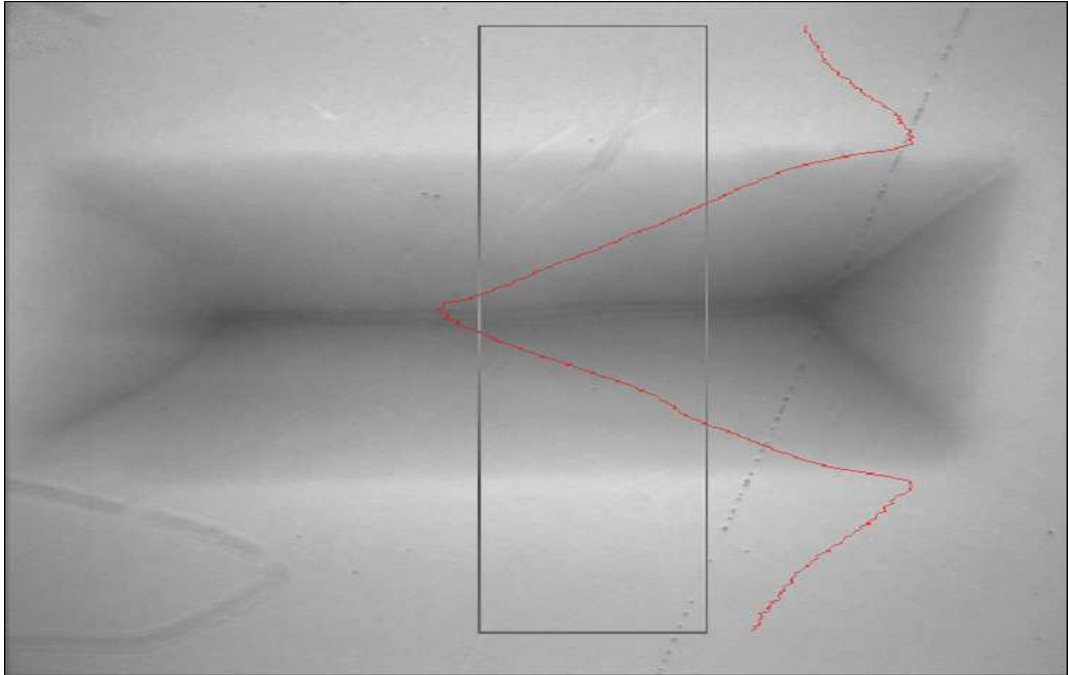


איור 30: ההבדל במגנטיזציה בלולאת המגנטיזציה בין העלאת השדה להורדתו בדגם La2 ב- 24 K

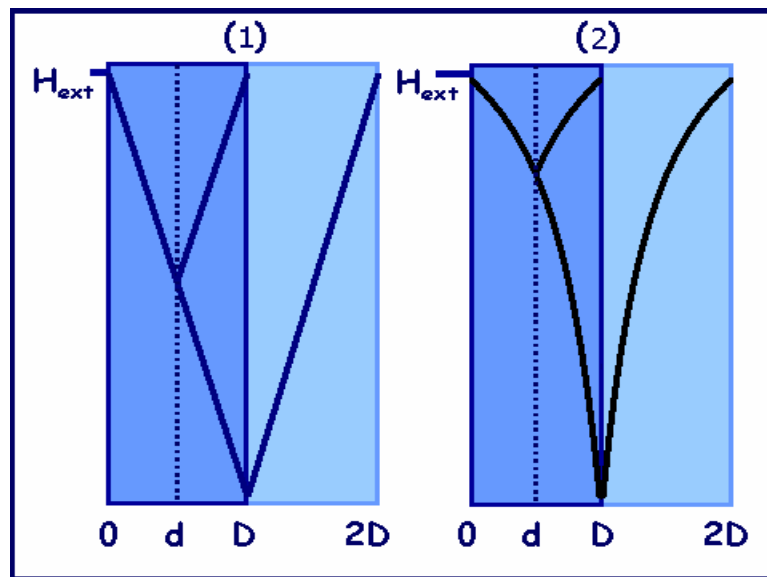
6.5 הסבר להבדלים במגנטיזציה ובקו ההדיר

ההבדל במגנטיזציה שנוצר באזור השיא השני הוא כתוצאה ממעבר של מגנוני הלכידה, שעד אזור השיא השני אנרגיית האקטיבציה היתה אלסטית ואחריה פלסטית [21]. ההבדל מתבטא בשינוי בקצבי הרלקסציה שבאזור השיא השני מתחיל לגדול עם העלאת השדה וכן בשינוי המגנטיזציה של הדגם שבנקודה זאת היא מפסיקה לגדול ומתחילה לקטון עם העלאת השדה המגנטי. הזרם הקריטי בדגם מושפע בצורה שונה ממגנונים אלו, באזור האלסטי הזרם הקריטי הוא די אחד לאורך רוחב הדגם, ולכן בהשוואת הדגמים לא נראה הבדל מכיוון שהנרמול מבוסס על כי ישנו זרם קריטי זהה לכל הדגמים. תוצאות של מדידות לוקליות במערכת מגנטו-אופטית מאששות את הטענה בתחום השדות המגנטיים הנמוכים, כבאיור 31. לעומת זאת באזור הפלסטי הזרם בדגם אינו אחד והוא מושפע מהשדה הלוקאלי, לכן אין התאמה בין הדגמים מכיוון שאי אפשר לדבר על זרם קריטי ממוצע של הדגם אלא רק על זרם לוקאלי. הסיבה שבנרמול קבלנו מגנטיזציה

גבוהה יותר עבור הדגם הרחב נובעת מכך שבדגם זה יש עדיין שדות לוקאליים נמוכים מזה של הדגם הצר ולכן יש בו זרמים קריטיים לוקאליים גבוהים משל הדגם הצר, דבר התורם להגדלת המגנטיזציה בנרמול. דוגמא לכך אפשר לראות באיור 32.



איור 31: פרופיל מגנטי ממדידות MO של La₂ ב- 22 K



איור 32: בציר (1) מתואר הזרם בשדות שמתחת לשיא השני שהוא בעל שיפוע אחיד. בציר (2) מתואר הזרם בשדות שמעל השיא השני שהוא משתנה לפי השדה הלוקלי

התלות של הזרם בשדה הלוקלי גרם לכך שהקו ההדיר עבור הדגם הרחב נמצא בשדות גבוהים יותר, מכיוון שבדגם זה במרכז הדגם ישנם שדות לוקלים נמוכים מזה של הדגם הצר ולכן עדיין יש אי הדירות בלולאה של הדגם הרחב.

6.6 מסקנה

בפרק זה הוצגה השפעה של רוחב הדגם על הרלקסציות והמגנטיזציה של הדגם בשדות מגנטיים גבוהים. בשדות גבוהים לא היתה ציפיה כי יתגלו הבדלים בין הדגמים, אך בתוצאות הניסוי להפתעתנו נמצאו הבדלים בין הדגמים, קצבי רלקסציה מהירים יותר ומגנטיזציה גבוהה יותר בדגם הרחב מזה של הדגם הצר. ההסבר להבדל בהתנהגות קצבי הרלקסציה המהירים בדגם הרחב מזה של הצר, מתבסס על אפקט של מחסומי שפה. על אף שמחסומי שפה קטנים עם הגדלת השדה המגנטי, מכיוון שזרמי מייזנר גדלים והכח המושך את הפלקסון לתוך הדגם גדל, יש להם השפעה מכיוון שבתחום זה הזרם הקריטי הוא נמוך.

השפעה נוספת לרוחב הדגם שהובחנה היתה שינוי במגנטיזציה שהוסברה בכך שבשדות מגנטיים גבוהים התלות של הזרם הממוצע ברוחב הדגם היא משמעותית, מפני שהזרם תלוי בשדה הלוקלי. תלות זו מביאה לכך שבדגם הרחב ישנם זרמים גבוהים במרכז הדגם ולכן מתקבלת מגנטיזציה גבוהה יותר עבור הדגם הרחב.

מחקר זה בדק את השפעת גודלו של הדגם על לולאות המגנטיזציה של LSCO. תוצאות המחקר הראו כי:

- א. למחסומי השפה ישנה השפעה זניחה על קו מעבר הפאזה.
- ב. לא נצפו הבדלים באזור שבין ה- onset לבין השיא השני במגנטיזציה או בקצבי הרלקסציה כתוצאה ממצבים טרנזיינטיים או מטהסטיבליים.
- ג. נצפו הבדלים בקצבי רלקסציה ובמגנטיזציה בין דגמים בעלי רוחב שונה, כאשר בדגם הרחב קצבי הרלקסציה היו מהירים והמגנטיזציה היתה גבוהה מזו של הדגם הצר.

שתי התוצאות הראשונות (א, ב) מצביעות על כך שההסבר לתופעת השיא השני ב- LSCO כתוצאה ממעבר פאזה סדר – אי סדר הוא מוטעה; ככל הנראה, האנומליה של השיא השני ב- LSCO היא תופעה דינמית. שהרי לפי ההסבר כי השיא השני הוא כתוצאה ממעבר פאזה אזי קו מעבר הפאזה היה צריך להיות אדיש לשינויים בטמפרטורה בטמפרטורות הנמוכות. בנוסף לכך, לפי הסבר מעבר הפאזה האזור בלולאת המגנטיזציה שבין ה- onset לבין השיא השני הוא במצב מטהסטיבילי שמכיל את שתי הפאזות שמושפע ממצבים טרנזיינטיים ולכן רוחב הדגם משפיע על המגנטיזציה וקצבי הרלקסציה, שחלוקת השטח שכל פאזה תופסת בדגם משתנה לפי רוחב הדגם.

הבדלי המגנטיזציה בין הדגמים שנצפו בשדות הגבוהים הוסברו בכך שבתחום זה הזרם לאורך רוחב הדגם לא היה אחיד כבשדות שמתחת לשיא השני אלא היה תלוי לוקלית לפי השדה הלוקלי בדגם. שינוי זה הוא כתוצאה משינוי במנגנוני הלכידה, מזחילה אלסטית לסוג של זחילה פלסטית, המתבטא בגלל הרלקסציה המהירה גם בצורה הלוקלית של הזרם בדגם. הסבר זה מניח כי התופעה הדינמית שיוצרת את השיא השני היא זו שתורמת להגדלת המגנטיזציה בדגמים רחבים.

אפקט נוסף שהובחן במחקר זה הוא ההאטה בקצבי הרלקסציה בשדות גבוהים, תופעה אשר התחילה בשדות נמוכים יותר עבור הדגם הצר מאשר הדגם הרחב. ההסבר המוצע לכך במחקר הוא השפעתם של מחסומי שפה שהפכו להיות משמעותיים בשדות גבוהים משום שבשדות אלו הזרם הקריטי הוא נמוך ולכן תרומת המגנטיזציה של מחסומי הנפח קטנה. לכן מחסומי השפה משפיעים על קצבי הרלקסציה וגורמים להאטת הקצבים בתחום השדות הגבוהים. לכן בדגם הצר שבו מחסומי השפה גבוהים יותר ההאטה של קצבי הרלקסציה נצפתה בשדות

נמוכים מאלו של הדגם הרחב. ידיעת השפעה זו חשובה ביותר על חישוב אנרגית הלכידה ומציאת מנגנון הלכידה שפועל בשדות אלו.

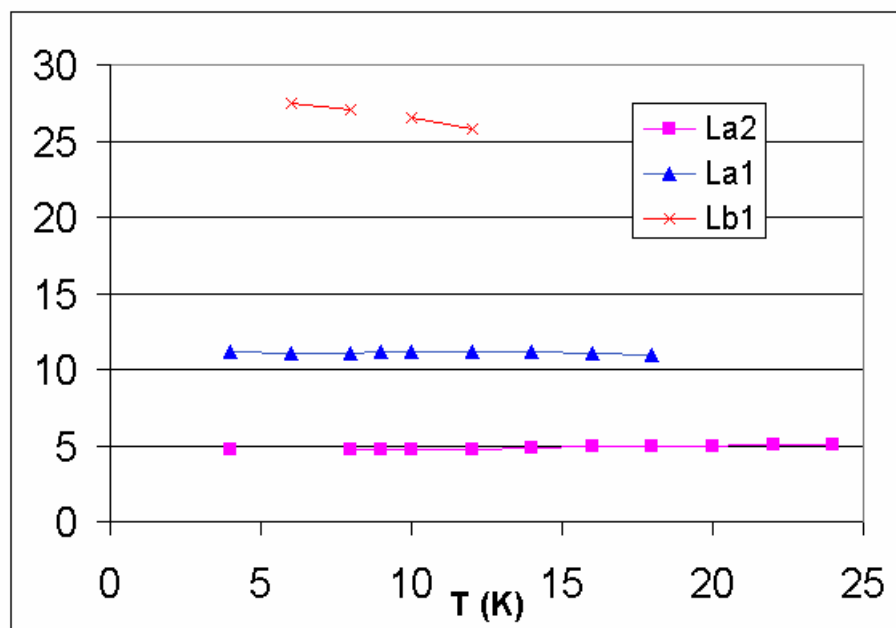
לסיכום, ממחקר זה עולה כי השיא השני הוא תופעה דינמית ולא כתוצאה ממעבר פאזה סדר – אי סדר. דבר המעלה כי תופעת השיא השני ב- LSCO שונה באופיה מזו של BSCCO. תוצאות מחקר זה מצריכות בדיקה מחודשת של המנגנון המביא לתופעת האנומליה של לולאת המגנטיזציה בשאר מוליכי העל בטמפרטורות גבוהות, הדומים הם ל- LSCO או ל- BSCCO ?

נספח א': פקטור הנרמול

הבסיס להנחה כי יש פקטור שבעזרתו אפשר לנרמל את עקומות המגנטיזציה הוא שלכל הדגמים יש זרם קריטי זהה. לכן הפקטור תלוי רק במימדי הדגם ואין הוא תלוי בטמפרטורה. לפי הנחה זו ניתן להתייחס אל אחד ממאפייני הלולאה ולהשוות את המגנטיזציה של המאפיין בין הדגמים השונים וכך למצוא את הפקטור שבין הדגמים.

להלן נבחון את ה- onset כמאפיין לנרמול. מתוך ההנחה כי התלות בטמפרטורה של הזרם הקריטי זהה בין הדגמים השונים נבדוק את היחס של ה- onset של Ld עם שאר הדגמים.

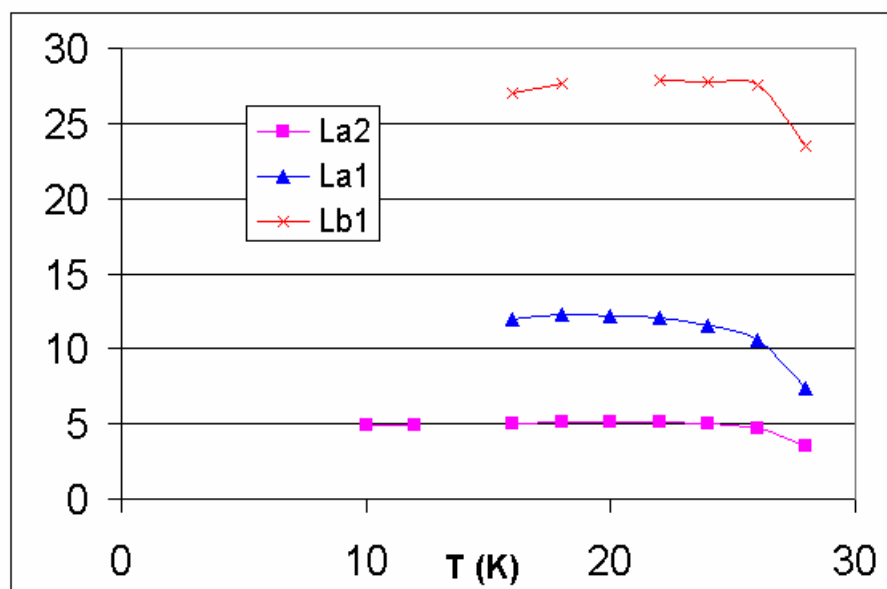
להלן באיור 33 אפשר לראות את היחס המתקבל בטמפרטורות שונות.



איור 33: היחס בין ה- onset של הדגמים השונים לזה של Ld

אנו רואים שהיחס עבור הדגמים La1, La2 הוא קבוע כמצופה. אך עבור Lb1 קבלנו שהיחס גדל כשזורדים עם הטמפרטורה. ההסבר לכך הוא שבדגם זה שהוא בעל מחסומי שפה גדולים, ישנה השפעה של המחסומים על המגנטיזציה של ה- onset בדומה לאפקט שראה de Andrade, לכן דבר זה משפיע על היחס.

כעת נבחון גם את השיא השני כמאפיין שאפשר לקבל ממנו את הפקטור לנרמול. להלן באיור 34 מוצגים היחסים של המגנטיזציה של השיא השני של הדגמים La1, La2, Lb1 עם זה של הדגם Ld.



איור 34: היחס בין השיא השני של הדגמים השונים לזה של Ld

אנו רואים שיש בקירוב יחס קבוע כמצופה, אך שמתקרבים לטמפרטורת המעבר ירידה בערך של היחס. ההסבר לכך שבטמפרטורות אלו הרלקסציות משמעותיות יותר ולכן ישנה ירידה ביחס בטמפרטורות אלו עבור הדגמים הרחבים יותר, שבדגמים אלו הרלקסציה מהירה יותר.

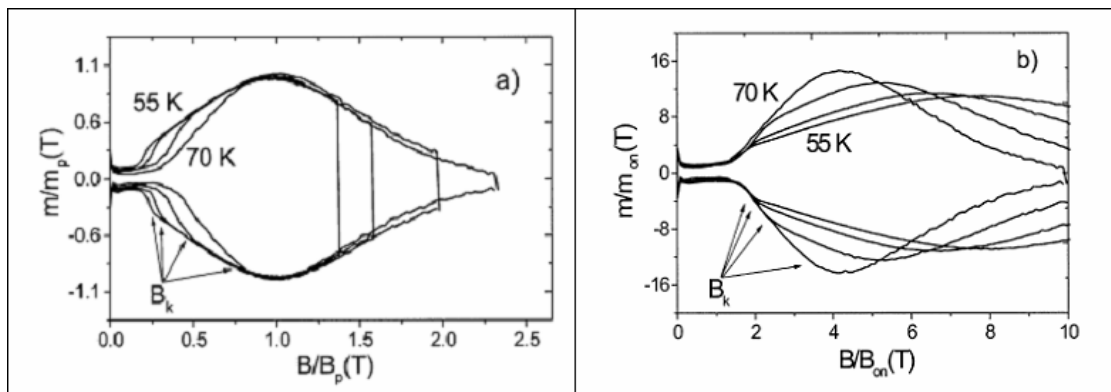
להלן השוואה בין הערכים השונים המתבלים לפי השיא השני וה- onset:

	La2	La1	Lb1
onset	4.8	11.1	27
peak	5	12	27.5

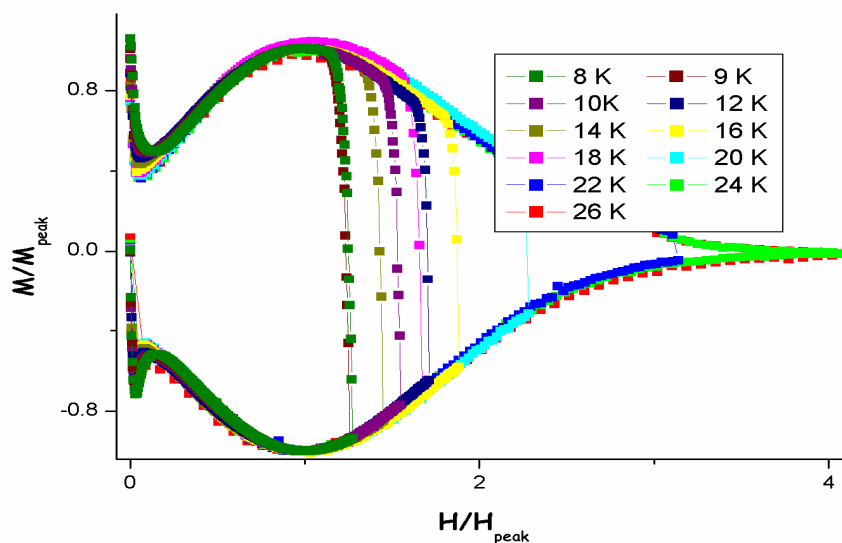
היחסים שמתקבלים מה- onset ומהשיא השני הינן דומים. הסיבה שבחרנו ב- onset כמאפיין ולא בשיא השני נבעה משתי סיבות: הראשונה, ההתאמה של העקומות באזור שבין ה- onset לשיא השני, דבר שהושג באיכות פחותה בעזרת הנרמול לפי השיא השני, והשנייה חוסר ההתאמה של הקו ההדיר בין הדגמים, דבר שמעיד כי באזור שקרוב לאזור ההדיר ישנו הבדל בין הדגמים.

נספח ב': נרמול לולאות המגנטיזציה בטמפרטורות שונות

אחת הדרכים להדגים מעבר פאזה של המצבים הפלקסוניים היא על ידי 'נרמול' הלולאה המגנטית [27]. מנרמול הלולאה לטמפרטורות שונות ב-YBCO אנו מקבלים שני אזורים בלולאה, שלכל אחד מהם ישנה תלות שונה בטמפרטורה. האזור הראשון שבלולאה מתאים לשדה ומגנטיזציה ה-onset עבור השדות שמתחת לשדה ה-kink והאזור השני הוא בשדות שמעל ה-kink והם תואמים את התלות בטמפ' של השיא השני, כמתואר באיור 35. דבר זה מעיד כי ישנם שתי פאזות שונות בלולאת המגנטיזציה, שהרי לכל פאזה יש אנרגיה המתנהגת בצורה שונה ולכן סביר שלכל פאזה תהיה תלות שונה בטמפרטורה.



איור 35: לולאות מגנטיזציה של YBCO מנורמלות בטמפרטורות שבין 55-70 K לפי ה-onset (b) ולפי השיא השני (a) [27].



איור 36: לולאות המגנטיזציה של Ld מנורמלות לפי השיא השני.

לעומת זאת, ב-LSCO אנו רואים באיור 36 כי הנרמול לפי השיא השני בלבד מספיק לכל לולאת המגנטיזציה בטמפרטורות השונות. תכונה זו של תלות הנרמול במאפיין אחד של הלולאה הינה סימן לכך כי לכל אורך הלולאה אין מצב מטהסטבילי, אלא בכל העקומה הפאזה היא אחידה, שהרי אם היתה פאזה שונה הייתי מצפה כי תהיה לה תלות שונה בטמפרטורה.

הערה: לתוצאות אלו של הנרמול ישנה חוסר התאמה עבור טמפרטורות הקרובות לקו המעבר באזור שאחרי השיא השני. שינוי זה הוא תוצאה מהרלקסציה שהינה משמעותית בטמפרטורות גבוהות. בחוסר ההתאמה הזה של הנרמול בא לידי ביטוי גם רוחב הדגם.

-
1. C. P. Bean, Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962).
 2. G. Blatter *et al.*, Rev. Mod. Phys. **66**, 4 (1994).
 3. E. Zeldov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1428 (1994).
 4. M. Benkraouda and John R. Clem, Phys. Rev. B **53**, 5716 (1996).
 5. C. P. Bean and J. D. Livingston, Phys. Rev. Lett. **12**, 14 (1964).
 6. Y. M. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **65**, 184506 (2002).
 7. J. G. Bednorz and K. A. Müller, Z. Physics B **189** (1986).
 8. E. Zeldov *et al.*, Nature **375**, 373 (1995).
 9. B. Khaykovich *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 2555 (1996).
 10. G. W. Crabtree and D. R. Nelson, Physics Today, P. 41, April (1997).
 11. D. Giller *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 2542 (1997).
 12. V. Vinokur *et al.*, Physica C **295**, 209 (1998).
 13. T. Giamarchi and P. Le Doussal, Phys. Rev. B **55**, 6577 (1997).
 14. Y. Radzyner, A. Shaulov, Y. Yeshurun, Phys. Rev. B **65**,100513 (2002).
 15. M. C. de Andrade *et al.*, Phys. Rev. B **65**,100513 (2002).
 16. D. Ertas and D. R. Nelson, Physica C **272**, 79 (1996).
 17. B. Kalisky, Ph. D. Thesis, Bar-Ilan University (2004).
 18. Y. Flegler, M. SC. Thesis, Bar-Ilan University (2004).
 19. R. A. Doyle *et al.*, Physica C **308**, 123 (1998).
 20. H. P. Wiesinger, F. M. Sauerzopf and H. W. Weber, Physica C **203**, 121 (1992).
 21. Y. Kodama *et al.*, Phys. Rev. B **56**, 6265 (1997).
 22. T. Kobayashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **62**, 1830 (1993).
 23. M. Okuya *et al.*, Physica C **271**, 265 (1996).
 24. L. Burlachkov, Phys. Rev. B **47**, 8056 (1993).
 25. Y. Abulafia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 1596 (1996).
 26. E. Brandt, Phys. Rev. B **60**, 11939 (1999).
 27. D. Giller *et al.*, Physica B **284-8**, 697 (2000).