

התנגדות אפקטיבית ב מוליצי על בתנאי גרדיאנט שדה מגנטי חיצוני

דן וקסלר ונעם גביש, בהנחיית חן אלפרון,andan cahn

30 במאי 2016

תקציר

מוליצי על התגלו לראשונה המאה ה-20 וניתן להם הסבר תיאורטי עד אמצע המאה (תורת BCS). יש להם ישומים חשובים, כמו במכשורי MRI ומאנטי להקיקים, אך יישומים מוגבלים בשל הדרישת לטמפרטורות נמוכות. מאז שנות ה-80 של המאה ה-20 התחילו להתגלות מוליצי על בטמפרטורת "גבוהות" ($K \sim 100$) שעבורם אין תורה מלאה והם מהווים נושא וכלי ניסוי חשוב בפיזיקה המודרנית.

בניסוי זה חקרנו דוגמא $BSCCO$ שהוא על מוליך חם, סוג 2, בתכורה של אבקה דחוסה (מגורענת), ולא $single-crystal$. תחילה, השתמשנו במידות $Transport$ בשיביל למצוא את T_c ובשביל לנתח את השפעת השדה המגנטי על הזרה של החומר. הצענו מודל שבו שפת מוליך העל נמצאת במצב רגיל ומוליכה זרם ופסלנו אותו. למרות זאת, ההתאמנה הפרמטרית למודל זה ולמודל נוסף נתנו הערכה של H_{C1} וחסם על H_{C2} בדיאגרמת הפאזות של החומר.

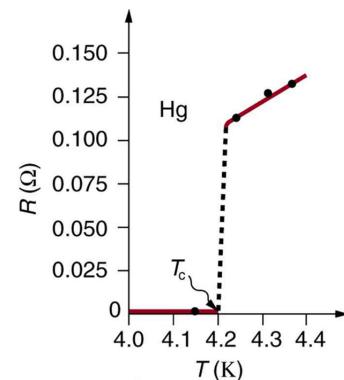
בשלב השני, חקרנו את הדיסיפציה בגל זרימות המערבות על מוליך סוג 2. על מנת להפריד את השפעת הזרם בפני עצמו, לגרדיינט השדה המגנטי שהוא מרשה, תכננו והקנו התקן לשוריית גרדיאנט שדה באופן חיצוני. בניסוי הראנו שנגרדיינט השדה החיצוני אכן משפיע על הדיסיפציה בדוגמא. על מנת להבחין בין מודלים שונים שיכולים להסביר את החשיפה זו, ביצענו סימולציה ומורית של השדות המגנטיים המעורבים במערכת, עם התוצאות לפוטיפילים אפשריים שונים של זרם בתוך הדוגמא. הראנו שמקור התופעה הינו זרם פנימי שמוסלג בערזים דקים המכסים משמעותית פחות מ-0.0001 משטח החתך, או בגרדיינט שדה היטלי, שמוסב לצורה לא סימטרית סביב הדוגמא.

הצלחת ההתקן פותחת פתח לניסויים נוספים של המערה בטמפרטורות אדרמיים שונים, שיכולים להרחיב את הבנת מבנה הדיסיפציה ולהשווים למודל *Bardeen – Stephen*.

רקע תיאורטי

מוליכות על

מוליכות על הינה תופעה שבה חומר הוא מוליך מושלם (התנגדות חשמלית 0), וגם דיамגנטי מושלם (דוחה באופן מלא שדה מגנטי, תופעה הנקראת אפקט מייזנר). הדייאמגנטיות נוצרת ע"י זרמי שפה במוליך השומרים על שדה מגנטי 0 בתוך המוליך. תוכנה זו מתאפשרת למשל, במתכוות קרות מאוד: עופרת ($k=7^\circ$), אלומיניום ($k=4^\circ$). כМОון שההטופה לא מאפשרת התנגדות לשדה מגנטי אינסופי, ולא מאפשרת התפתחות זרמים אינסופיים: כלומר, שדה חיצוני H חזק דיו, או זרם חזק דיו $I_{transport}$ דרך החומר מפסיק את המצב העל מוליך.



איור 1: גרף המציג את ההתנגדות (R) עבור מוליך על. עבור טמפרטורות גבוהות דין, ההתנגדות לינארית, כפוי במצב מוליך רגיל. עבור טמפרטורות נמוכות יחסית התלות היא חזקית, ומתחת לטמפרטורה קריטית T_c ההתנגדות צונחת ל-0

ישנם מאפיינים שונים של מוליצי על. מוליצי על מסוג 1 ומסוג 2 מגיבים לשדה חיצוני H באופן שונה, כפי ש谟וחש באיר הבאה:

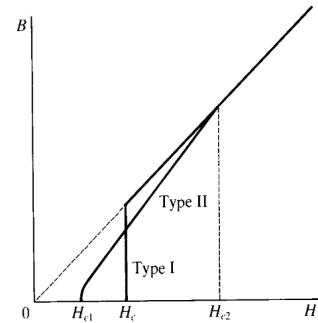
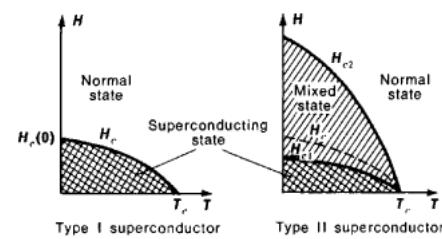


FIGURE 1.5

איור 2: עקרונות מגינוט של על מוליצים מסוג 1 ומסוג 2. על מוליך מסוג 1 שומר על דיאמגנטיות עד שדה חיצוני קריטי H_c ומעלהו "נכנע" וועבר מגינוט בקפיצה. היא לינארית כמו ברוב החומראים הניטניים למיגנות. על מוליך מסוג 2 מתנגד למיגנות עד שדה $H_c(H)$, מקיים קשר לינארי של $B(H)$ מעל H_c וביניהם עובר מגינוט באופן רציף.



איור 3: דיאגרמת פאוזות של מוליך על חם (מסוג 2). ערכי השדה הקריטי H_{C1} ו- H_{C2} משתנים עם הטמפרטורה ומתקבלות עקרונות המפרידות בין הפאוזות השונות

מוליצי על קררים הם חומראים שעוברים במצב מוליך על בטמפרטורות נמוכות מטמפרטורת הרתיחה של חנקן נזלי ($77^\circ K$), ולכן צריכים אמצעי קירור מורכבים. על המוליצים הראשונים שהיו מוכרים היו מתחות, לרוב טהורות ולא סגסוגות עם טמפרטורות מעבר של $20^\circ K$ – $1^\circ K$. ב-1986 התחליו להתגלות מוליצים קרמיים מבוססי נחושת (Cuprates), רוביים מוליציים על "חמים" עם טמפרטורות מעבר של $150^\circ K$ – $90^\circ K$.

מודל פונומנולוגי לתיאור על מוליצות לנדון

במודלים שונים של מוליצות על, מתראים נושאינו מטען על שאינם חווים התנגדות, בمسה m^* , מטען e^* . הצפיפות המקומית שלהם היא n_s , וצפיפות האזרם שלהם היא J_s . מודל זה כולל שתי משוואות המתארות את זרם העל והקשר שלו לשדה החשמלי והמנגי הילוקאליים. הראשונה היא מעין גרסה של חוק א Ohm עבור זרם על ומתרarta זרם שתחתה מתח DC מתפוץ לאינסוף:

$$\frac{d(\Lambda \vec{J}_s)}{dt} = \vec{E}$$

$$-c \cdot \vec{\nabla} \times (\Lambda \vec{J}_s) = \vec{h}$$

כאשר \vec{J}_s צפיפות זרם על, \vec{h} השדה המגנטי הילוקאלי, $\Lambda = \frac{4\pi\lambda^2}{c^2} = \frac{m^*}{n_s(e^*)^2}$ Lambda הוא פרמטר סקלרי פונומנולוגי (תוקן הנחת $n_s = Const$). משוואת לנדון השנייה, יחד עם משוואת מקסואל $\vec{J} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}_s$ גוררות שהשדה המגנטי \vec{h} דועך אקספוננציאלית משפט העל מוליך עם סקלה אופיינית λ (עומק חדרה), דבר שמתאים לאפקט מייזר. עומק החדרה λ משתנה כתלות בטמפרטורה, ובטמפרטורה הקריטית T_c נקבל $\infty \rightarrow \lambda$, עובדה המותאמת להריסת מוליצות העל ב- T_c .

תורת גינזבורג לנדאו

תורת גינזבורג לנדאו מטפלת במקהה $n_s \neq Const$, אך n משתנה רק מעט מרחבית. בתורה מציגים פונקציית התפלגות מרוכבת (*pseodu-wavefunction*) $\psi = |\psi| \cdot \exp(i\psi)$, ומפתחים את האנרגיה החופשית f בסדרים של ψ ¹:

$$f = f_{normal-state} + \alpha|\psi|^2 + \frac{1}{2}\beta|\psi|^4 + \frac{1}{2m^*}(\frac{\hbar}{i}\vec{\nabla} - \frac{e^*}{c}\vec{A})\psi + \frac{\hbar^2}{8\pi}$$

המצב הייציב אנרגטי מתקיים במינימום האנרגיה החופשית, שnitnu לinitiation באמצעות ווארייציה על ψ . בהעדר שדה מגנטי חיצוני, ותנאי שפה שכופים זרים בדוגמה, מינימום האנרגיה יתקיים עבור $\psi_\infty = Const$. במרקם אחרים איפוס הווארייציה מתאפשר ע"י²:

$$\vec{J}_s = e^* \vec{v}_s |\psi|^2 = \frac{e^*}{m^*} |\psi|^2 (\hbar \vec{\nabla} \phi - \frac{e^*}{c} \vec{A})$$

מהמשמעות הדיפרנציאלית של איפוס הווארייציה, עולה סקלה אופיינית לשינוי ψ שהיא:

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m^* |\alpha|}}$$

בפרט, זו סקאלת האורך האופיינית לדעיכה של המצב העל מוליך, למשל לקראת שפת החומר.

קוונטייזציה השטף המגנטי בעל מוליך

³

כעת ננתח על מוליך הנמצא בשדה מגנטי חיצוני H , אך ללא מתח חיצוני. נחשב את השטף המגנטי מבعد למשטח מסוים S , תחת כמה הנחות: המשטח הנמצא בעומק העל מוליך רוחק מזרמי שפה כלומר $\vec{J}_s = 0$, $|\psi|^2 = n_s \approx Const$; נקבל (תוך שימוש במשפט סטוקס):

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_{\partial S} \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

עם שימוש בפיטרון בעיית הווארייציה וההנחה $\vec{J}_s = 0$ נקבל:

$$\Phi = \frac{\hbar}{e^*} \oint_{\partial S} \vec{\nabla} \phi \cdot d\vec{l} = \frac{\hbar}{e^*} \cdot 2\pi n = \Phi_0 \cdot n$$

כאשר n שלם (איןטרול מסלולי סגור של פונקציה קשורה במספר הקטבים מסדר ראשון שיש לה בתחום S) כלומר, השטף המגנטי נהיה מקוונט ב深刻的ות של $\frac{\hbar}{e^*} 2\pi = \frac{\hbar}{e^*}$. ניתוח זה מסתדר עם העבודה שבעל מוליך מסוג 2, חידרת שדה מגנטי מותבצעת במערבות של זרם על, שבתוכן עבר שטף מגנטי, בקונוטות של Φ_0 .

ההבדל בין על מוליכים מסוג 1 לעל מוליכים מסוג 2 טמון ביחס בין עומק החידרה ואורך הקוורנטיות שמסומן λ . עבור ערכי λ גדולים מספיק $\left(< \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ מטאפרת חידרה של שטף מגנטי במנות כמותא לעיל. זהה תוצאה של עדיפות אנרגטית ליצירת אзор שפה בין החומר העל מוליך וליבת נורמלית, שלא קיימת במוליכים מסוג 1. קווי השטף המגנטי חודרים לעל מוליך מסוג 2, כאשר מסביב כל אחד מהם מערבות של זרם, המensus את שאר החומר מהשדה המגנטי כמו שזרמי שפה ממשיכים את תוך החומר משדה חיצוני). מערכות הזרם מגיבות לכוחות שונים, ותנוועה שלחן יוצרת דיסיפציה של אנרגיה () . כלומר, מתקבלת התוצאות אפקטיבית (שאיתנה אהמית!) בחומר.

Tinkham – 4.1¹
Tinkham – 4.14a²
M. Suzuki – p.11 – 12 עפ"י³

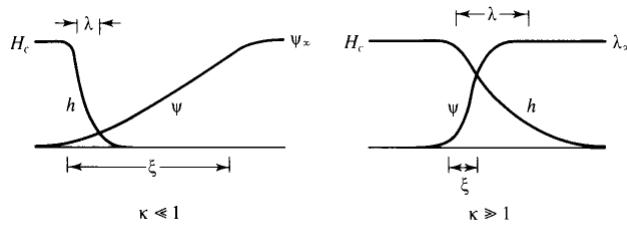
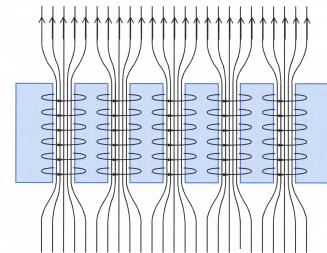


FIGURE 4.3

איור 4: התנהגות השדה המגנטי וצפיפות נושאי מטען העל $|\psi|^2$ בשפת על מוליך מסוג 1 ו-2. בעל מוליך מסוג 1 ישנו תשלום אנרגטי על השפה, כאשר יש אייזר (בערך בגודל λ – ξ) שגדה המגנטי מוחזק לו וגם מוחזק באנרגיה גבואה מזו של המצב המעווב.



איור 5: מערבולות זרם על בחומר על מוליך

כוחות הפעילים על מערבולות

1. בורות פוטנציאלי: בהעדר שדה חיצוני, המצב האנרגטי העדיף של ψ הוא ללא מערבולות. ליד פגמים בגיבש $0 \approx \psi$ ולכן ה"זק" האנרגטי ביצירת מערבולות עקב השפעת שדה חיצוני H קטן יותר אם היא נוצרת על הפgem זהה. ככלומר, מערבולות "ימשות" לפגמים בגיבש. כיוון שאנרגיה תרמית יכולה לעזור למערבולות לצאת מבורות הפוטנציאלי הללו, הם אפקטיבית יותר עמוקים ככל שהטמפרטורה נמוכה יותר.

2. גרדיאנט שדה מגנטי: שדה מגנטי מקביל לכיוון המערבולות, מפעיל כוח לורץ על נושאי מטען העל (היות והוא מאונך לכיוון התנועה שלהם). אם השדה המגנטי אחד במרחב, אז נושאי מטען שנמצאים בצדדים שונים של המערבולות ירגשו כוח זהה, והכוח נתו על המערבולות יהיה 0. לעומת זאת, אם ישנו גרדיאנט בשדה, אז המערבולות תרגיש כוח נתו במעלה ההשדה (עם הגרדיינט).

3. כוח בין מערבולות: מערבולות שדה מפעילות כוח או על זו, כוח שמנסה להרחיק אותן. מקרה פשוטי ברור משיקולים אנרגטיים: האנרגיה המגנטית הולכת כמו B^2 ולאחר אם יש שתי מערבולות זרם חופפות אז יש לחן אנרגיה מגנטית כוללת $E \propto (2B)^2 = 4B^2 = 2B^2 + B^2$ ואם הן מרוחקות, אז יש להן אנרגיה כוללת מלבילה, אךן הקוונטייזציה היא למנות שטף בודדות של Φ_0 , ולא כפולות שלו.

סידור מערבולות, עיגון מערבולות, תנועת מערבולות

סידור המערבולות תלוי בצפיפות המערבולות. כאשר יש מיעוט מערבולות הן פשוט נמצאות במרחקים גדולים זו מזו ואין אינטראקציה. כאשר יש ריבוי מערבולות, אנרגיית האינטראקציה של מערבולות מינימלית כאשר הן מסודרות בשraig משולש: *Abrikosov – Lattice*: הכוח בין המערבולות מאוזן ע"י השדה המגנטי שיצר את המערבולות מלכתחילה, שהוא חזק יותר מוחזק על מוליך, ולכן משאיר אותן בתוך החומר. כאשר יש הרבה מאוד מערבולות, והן קרובות זו לזו יותר מאשר מ- $\lambda \approx$ המבנה נשרב והמערבולות חופפות זו את זו.

כאשר זרם זרם דרך על מוליך, הוא משרה שדה מגנטי שיש לו רכיב מקביל למערבולות הזרם, המשתנה לרוחב החומר. ככלומר, יוצר גרדיאנט של שדה מגנטי המפעיל כוח על מערבולות.

אם הכוח הזה חלש יותר מכוחות העיגון (*pinning*) של בורות הפוטנציאלי, אז המערבולות נשארות סטטיות והחומר עדין מוליך מושלם.

אם הכוח הזה חזק מספיק, מתקבלת תנועה לכידה של מערבולות (*flux – flow*): מערבולות נעות בפסים במעלה השדה המגנטי שיוצר הזרם, נוצרות בשפת החומר עליה השדה גבוהה, ונעלמות בשפת החומר עליה השדה נמוכה.

אם הכוח הזה חזק יותר מחלק מכוחות העיגון, בד"כ לא יזוז מערכות בודדות בגלל הדחיה ההדדיות ביניהם. אבל קבוצות גדולות של מערכות יכולות לנוע יחד בהשפעת הכוח. הכוח על מערכות נסכם על פני שטח הקבוצה, ולחית המערכות נסכם לאורך היקף הקבוצה (גדלים כמספר המערכות בקבוצה וכשורש מספר המערכות בקבוצה בהתאם), ולכן יתכן שעבור קבוצה גדולה יותר מספיק תנועה בטמפרטורה גבוהה מספיק, אפיו עם כח מגנטי חלש (הנובע מזרים חלש), אנרגיה תרמית יכולה לאפשר למערכות "לקפוץ" מתוך בור פוטנציאלי. המרכיב תמיין עד שתיליך בבור אחר, ותצא ממנו שוב בגלל אנרגיה תרמית (*flux – creep*)

כפי שהזכר לעיל, תנועה רוחבית של מערכות (כלומר, בניצבת כלפיו הזרם $I_{transport}$) יוצרת דיסיפציה. באופן בסיסי לפי חוק פאראדי, תנועה של מערכות (שהיא שינוי בשטוף המגנטי) משרה כ.א.מ. ויצירת שדה חשמלי \vec{E} בדוגמה.⁴ דבר זה יוצר הספק דיסיפציה לפי $\vec{J} \cdot \vec{E}$. $W_{dissipation} = Bardeen - Stephen$ המודל המתוך זאת הוא מודל במודל זה מניחים באופן פשוטני:

1. תנועת המערכות איטית, ולכן מניחים שנייה להנחה שהכוח הכלול הפועל עליו בציר הרוחבי הוא לנארטי שף. כלומר, במצב העמיד מערכות מגיעות למחריות שיטו.

2. שהמערכות מרכיבת מליבה גלילית מושלמת במצב נורמלי (ושאר החומר הינו על מוליך). הנחה זו מאפשרת לנתח את השדה החשמלי מחוץ ליבוט באמצעות מושוואות לונדון, ובתוך הליבוט ע"ס תנאי שפה המתקבלים מהפתרון מחוץ ליבוט.

בתנאים אלו נוצר הספק של $W_{dissipation} = 2 \cdot \frac{v^2 \Phi_0^2}{4\pi a^2 c^2 \rho_n} \cdot [sample - height] \cdot [N_{vortices}]$ (כאשר ρ_n התנדות סגולית של החומר בפaza הנורמלית)

חומר מגrown

"יצור" גבישים בגדים מקרוסקופיים (מ"מ) של מוליכי על חמים (*Cuprates*) הינו קשה. אפשרות אחת לקבל דוגמא בגודל מקרוסקופי הינה לדחוס אבקה (גבישים קטנים) של החומר הרצוי. בהתאם זה מתקבלים הרבה גבישים קטנים עם כיווניות לא אחידה וגם חללים ביןיהם. הדוגמא אינה נעשה כל הניסויים להלן הינה צו ולכן יתכונו הבדלים בין התוצאות שהתקבלו לתוצאות אותן או רואים בדוגמה המורכבת מביש אחד מושלם. התיעחשות מלאה יותר למבנה החומר הייתה דורשת תיאור שלו באמצעות שונים המצוידים על ידי צמתי ג'יספסון⁵ מפאת סיוכיות הזנהנו זאת בניתו.

מערכת הניסוי

מערכת הניסוי מיועדת למדוד את המתח של דוגמא של על מוליך תוך שליטה בפרמטרים של זרם *Transport* טמפרטורה ושדה מגנטי:

1. החומר: דוגמא של על מוליך מסווג $BiPbSrCaCuO$ ב מידות $2.1 \times 3.2 \times 20.1 mm$ עליה מולחים 4 מגעים, ונמצאת בתוך צינור עם רכיבים שייתוארו להלן.

2. מדידת זרם ומתח: המדידה מתבצעת בקוניגורצת *probe – probe*: שני המגעים הפנימיים מיועדים למדידת מתח באמצעות וולטמטר, שני המגעים החיצוניים מיועדים להזנת זרם ע"י ספק זרם. בצד זה, מקבלים מדידה אמינה של זרם דרך והמתח על קטע העל מוליך שבין שני הבדיקות הפנימיים.

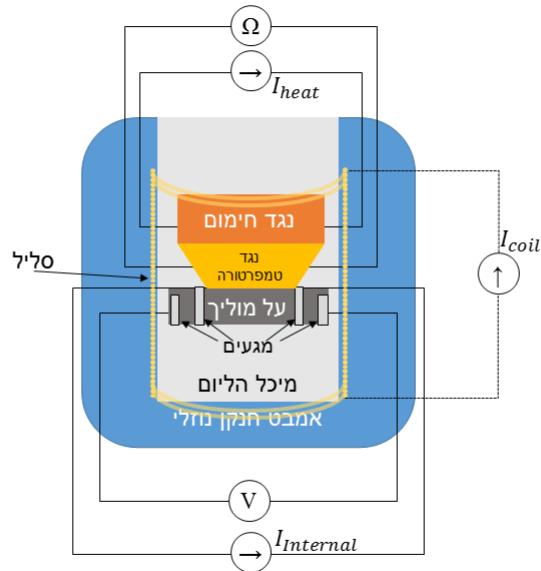
3. מדידת טמפרטורה: מעל הדוגמא נגד מסווג $Pt - 100$ למדידת טמפרטורה, הנגד מחובר למד התנדות ולפי ההתנדות מחשבים את הטמפרטורה.

4. שליטה בטמפרטורה: הדוגמא נמצאת בתוך צינור המוכנס לאmbט של חנקן נוזלי בטמפרטורת הרתיחה שלו $77 K$. כמו כן, מעל הנגד למדידת טמפרטורה נמצא נגד הספק, בעזרתו ניתן לחמם את המערכת לטמפרטורה מעל $77 K$.

5. שליטה בשדה מגנטי: סבב הצינור עם הדוגמא ישנו סליל נחושת המחבר לשפק זרם, ומשרה שדה מגנטי קבוע בקרוב בסביבת הדוגמא.

6. בחלק מהניסויי השליטה במכשירי המדידה נעשתה באמצעות סקריפט מטלב ייעודי המצורף בנספח.

Tinkham : 167 – 169⁴
Tinkham : 6.6 p234⁵



איור 6: תרשימים של מערכת הניסוי: ניתן לראותות (מלמטה מלמעלה) בתוך הציור (מיכל הליום) נמצא הדוגמא, המחברת בתוצאות $Pt - 4$, נגד טמפ' 100 – המחבר למד התוצאות ולבסוף נגד חימום המחבר לשפק זרם. מקייף את הציור סליל שימושה שדה מגנטי קבוע ~ באורך הדוגמא.

מגבילות מערכת המדידה

בקרת טמפרטורה

1. זמני תרמילייזציה: עם שינויי ההספק של נגד החימום, נדרשו מעל ל-5 דקות להתייצבות הטמפרטורה של המערכת (نمמד זמן מחצית חיים לתרמילייזציה של כ-90 שניות). לפני כל מדידה וידיאנו את התהייצבות הטמפרטורה עד סקאללה של $\pm 0.05^\circ K$.

2. שגיאה שיטית במדידת הטמפרטורה: נגד המדידה לא היה צמוד לדוגמא, והוא היה קרוב יותר לנגד החימום. ככלומר, הוא הצבע על טמפרטורה מעט יותר גבוהה מהטמפרטורה של הדוגמא, בתהליכי חיים וקירור.

3. אפקטים לא רצויים של חיים: ברוב הניסויים בדוגמא עצמה מתפתח הספק מזער, אבל בתיעלי הנחשות המוביילים אליה, ובמגע הבודדים אליה יכול להתרחב הספק שמשנה את הטמפרטורה של הדוגמא, ולכן את התגובה שלה לזרם, שדה וכו'. יתר על כן, השינוי הזה בטמפרטורה לא משתקף במדידת הטמפרטורה, שכן החיים נעשה צמוד מאוד לדוגמא. הפיתרון לסוגיה היה להזרים לסיירgin זרים למקטעי זמן קצרים של עשריות שנייה בודדות, ולהמתין להתקררות חוזרת של הדוגמא על פני שנים בודדות.

ציוד המדידה

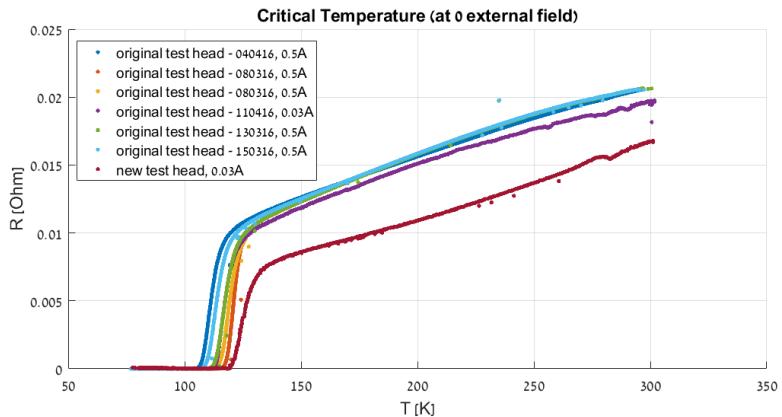
1. למד המתח היה *Drift*: הסטה קטנה רציפה של המתח בין ההדקים בסקאללה של $V \mu 5$. במדידות שבחן זו הייתה סקאללה משמעותית, מددנו גם מדידות כיוול שבחן לא הזרם *Transport* ותיקנו את מדידת המתח לפיהן.

2. לאחר כל שינוי של הזרם, היה צריך להמתין 0.2sec כדי להימנע מקפיצת מתח שנובעת מהשראות פרזיטית במערכת.

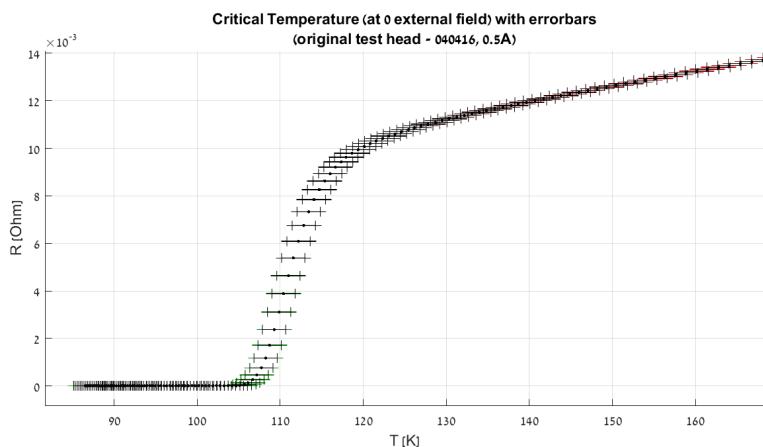
ניסוי ראשון: מדידת פרופיל התנגדות כתלות בטמפרטורה, ומציאת תחום הטמפרטורה הクリיטית

נתנו למערכת להתקין מטמפרטורת החדר לטמפרטורה של חנקן נוזלי באופן רציף. במהלך ההתקרכרות, הזרמנו בדגם א זרם $I_{transport}$ של $0.5Amp$ או $0.03Amp$ (תלי בברכה) ומדדנו את המתח V על הדוגמא. מהם חישבנו את $R(T)$

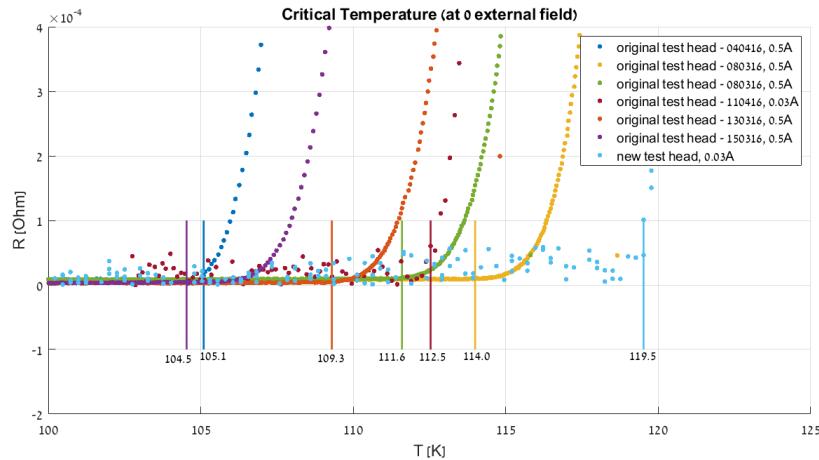
תוצאות



איור 7: חזרות שונות של מדידת $R(T)$, ללא ציון אי וודאות של $K \pm 1.4^\circ K$ במדידת הטמפרטורה.



איור 8: מדידה ייחודית של $R(T)$, עם ציון אי הוודאות.



איור 9: חזרות שונות על מדידת (T_c , $R(T)$, עם התמקדות על

כפי שנitinן לראות באירועים, חזרות שונות על המדידה הצבעו על טמפרטורות קריטיות T_c שונות בטוחה – $104.5 \pm 2.5[^\circ K]$ עבור הדוגמא הראונה ו- $114.0 \pm 2.5[^\circ K]$ עבור ראש השני.

דיון

לפי התיאוריה ההתנגדות נופלת לא-0 באופן חד ב- T_c , ואילו בניסוי יש תחום מסוים שבו מתבצעת הירידה האו. סיבות אפשריות לתופעה זו:

מגבליות ניסוי: באופן אידיאלי, צריך למדוד את ההתנגדות של הדוגמא בטמפרטורה נתונה כאשר היא נמצאת בה זמן רב, כדי להתמודד עם אפקטים של זמן תרמילייזה בתוך הדוגמא. במקרה זה המדידה הייתה בזמן התקරרות וזה יוצר שגיאה מסוימת: חלק מהדוגמא יכול כבר להיות במצב על מוליכה וחלק עדין לא.

תכונות של החומר: הדוגמא אינה *single-crystal* אלא בנוי מחרבנה גבישים קטנים באוריינטציות שונות. עם הירידה בטמפרטורה, יתכן שכל הגבישים יהיה כבר במצב על מוליך, אבל הפאזה של צפיפות מוליצי העל ψ יכולה להיות לא מתואמת, ורק עם ירידה נוספת בטמפרטורה חל תיאום פאות וצנחת ההתנגדות.

בחזרות שונות על הניסוי מודדים טמפרטורות קריטיות שונות זו מזו בטוחה של $15^\circ K$, אין לנו הסבר מדוע הטווות גדול כ"ב.

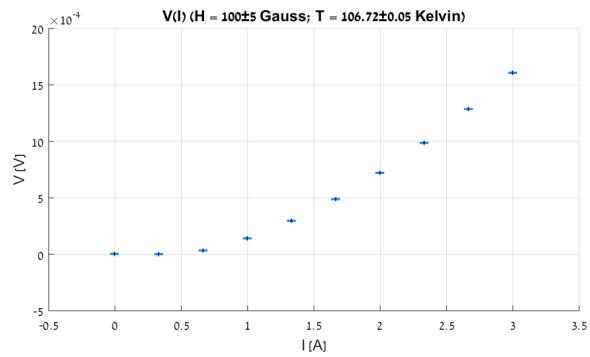
ניסוי שני: איפיון דיאגרמת הפאות – $H - T$

במוליצי על מסוג 2, שדה מגנטי חזק דיו יכול לחדר לעל מוליך בצורה של מערכות זרמי על. זרם פנימי $I_{transport}$ יוצר שדה מגנטי שמאז את המערבולות. תנועת המערבולות מטילה מתח על העל מוליך, ככלומר, יוצרת "התנגדות אפקטיבית". בניסוי זה מדדנו את עקוות המתח (V) בטמפרטורות K $102 - 117^\circ K$ וشدות מגנטיים $\sim 0 - 400 Gauss$ מדידות אלו מאפיינות חלק מדיאגרמת הפאות $H - T$ של העל מוליך.

הקפדנו למדוד רק כאשר הטמפרטורה כבר התייצה, וסידרנו את המדידות בכל טמפרטורה כך שהשدة החיצוני H עלה, אחרת היו יכולות להישאר בדוגמא מערכות שלא הספיקו להיעלם (היסטרזיס של על מוליצים מסוג 2, תופעה בה אנו לא דנים).

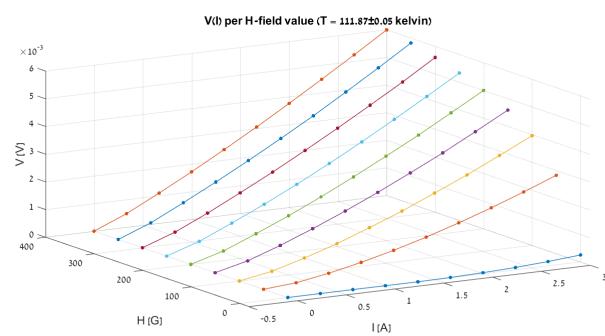
תוצאות

גרף אופייני של המתח על העל מוליך כפונקציה של הזרם דרכו:



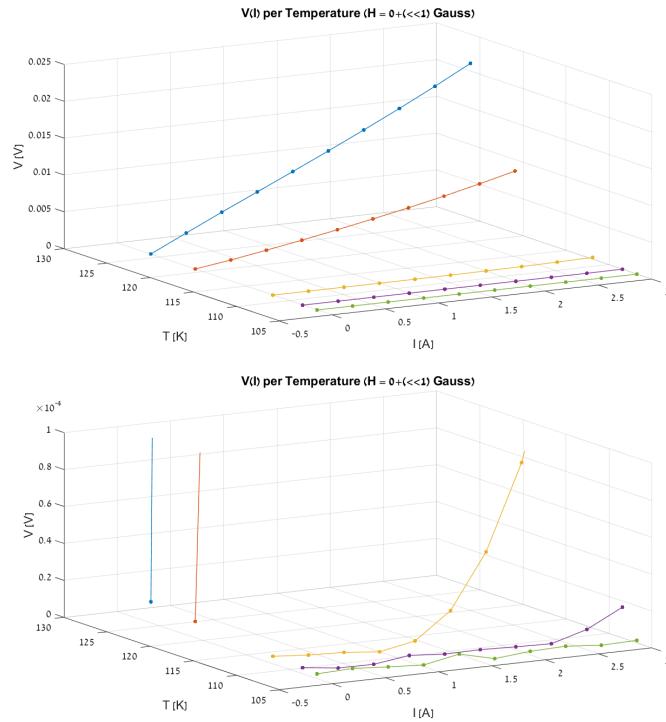
איור 10: מדידה: המתח על הדוגמא כפונקציה של הזרם בטמפרטורה נתונה. ניתן לראות שההתנהגות אינה "אוומית" – תלות לא לינארית

ניתן לראות והשתנות של התנהגות עם השינוי בשדה המגנטי:



איור 11: מדידה: המתח על הדוגמא כפונקציה של הזרם והשדה המגנטי החיצוני בטמפרטורה נתונה. כל עוקמה היא גראף בשדה קבוע (כמו ב-10). ניתן לראות התנהגות איקווטית שונה בערכי שדה מגנטי שונה

גם בוחtex של טמפרטורות שונות בשדה קבוע ניתן לראות שינוי:



איור 12: מדידה: המתח על הדוגמא כפונקציה של הזרם והטמפרטורה בשדה מגנטי נתון. כאמור, העקומות הן גרפים שווי טמפרטורה (ושדה).

הצעת מודל לתלות $V(I)$

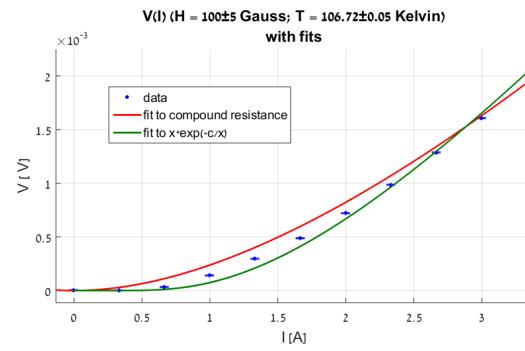
לאחר שראינו את הגדרים המתקבלים הצענו מודל משלנו: על מוליכות בחומר ומוליכות רגילה על השפה, בגלל אפקטים של חימצון ושפה לא על מוליכה (במצב נורמלי בכלל אורך קוהרנטיות).
בפנים הדוגמא, תלות ההנחה של התפלגות אחידה של "עומק" בורות (pinning sites) עבור המערבות, קיבלנו תלותRibועית של המתח בזרם - תלות לינארית של מספר המערבות הזמיןות ושל הכח על מערבות בזרים. $V = \beta I^2$
התנגדות הכוללת של הדוגמא תהיה לפי חיבור במקביל של הפנים, עם התנגדות I , $R_{effective} = \beta I + R_b$, והחוץ, עם התנגדות אוחמיית סטנדרטית $:R_b$

$$R_{tot} = \frac{I}{R_b + \beta I} \Rightarrow V = R_b \cdot \frac{I^2}{\frac{R_b}{\beta} + I}$$

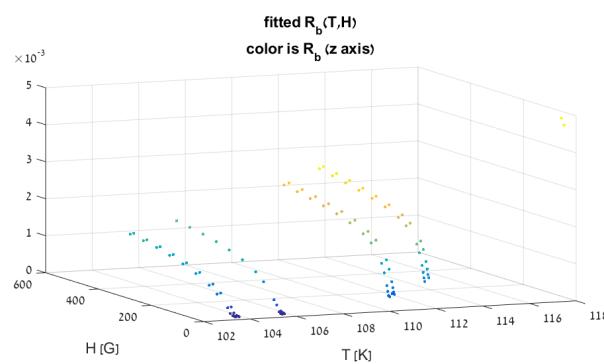
בנוסף, יותר ביטחון, ביצעו התאמה לפונקציה בעלת זמיון איקוטי ל吒וצאות כדי לקבל מדד "אוחמיות" או הידרה (לינאריות) של העקומה:

$$V = C \cdot I \cdot e^{-\frac{\alpha}{T}}$$

התאמת עקומות לדוגמא:



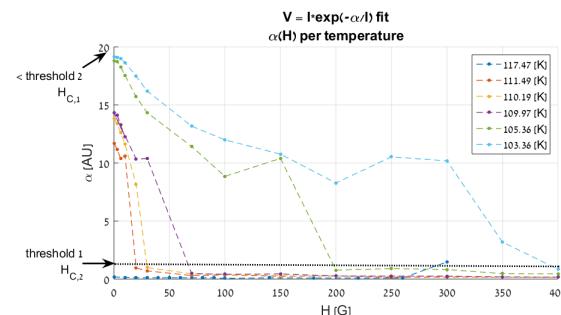
איור 13: התאמת עוקמה: המתח על הדוגמא כפונקציה של הזרם בטמפרטורה מסוימת. התאמת לשני המודלים המתווך התאמות כנ"ל גזרנו ערכי R_b לאוסף המדידות. הערכים שהתקבלו הם:



איור 14: ערכי R_b שהותאמו, ניתן לראות שהערכים הינם מסדר גודל של אלפיות אוחם ומראים תלות בשדה המגנטי.

כפי שניתן לראות ב-14 ערכי ההתנגדות שהתקבלו לשפת המוליך (עפ"י המודל) תלויים בעוצמת השדה המגנטי, מה שלא צפוי להתנגדות אוחמית סטנדרטית. בסופו, מכיוון שניתן לקחת את ההתנגדות לפני המעבר למוליך בתור חסם להתנגדות השפה (כפי השימוש השילילי של ההתנגדות האוחמית בಗל'ירידת הטמפרטורה בודאי זינית לעומת השימוש החיובי בغال'יקת השטח החתק, שתלי בארוך הקוורנטיות) הרי שהערך המצוופה צריך להיות גדול ממאורות אוחם, ולא אלפיות אוחם כפי שהתקבל.

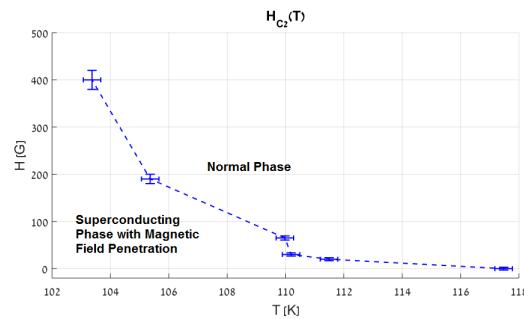
לאחר שפנסנו את המודל שהצינו עברנו להתאמה השנייה כדי לקבל מדד לפחות של החומר בכל ערך שדה וטמפרטורה.



איור 15: הפרמטר α של התאמאה השירוטית. ניתן לראות מינימוניות בטמפרטורה - גראפים "חמים" מתחת לגרפים "קרים". לפרמטר השירוטי נלקחו ספירים שרירוטיים, עפ"י התקבצות ערכים, כאשר התיכון מתאים ל- H_{c2} והשני, שהתקבל עבורי רק חסם תחתון, מתאים ל- H_{c1}

עפ"י הספירים (השרירוטיים) שניתנו לראות ב-15 התאמנו לכל טמפרטורה ערך H_{c2} בנקודתה בה בגרף שלה "חוצה"

את הספ. מהתאמאה ניתן גם להסיק שהערך של H_{c1} קטן מערך ה-”0” שלנו, שיחסו על ידי ערך השדה המקסימלי שהוזרם בדוגמא מייצר (או סכומו עם שדה אחר במערכת הניסוי שלא נלקח בחשבון) בתחום הטמפרטורות הנ”ל.



איור 16: ערך H_{c2} כפי חושב עפ”י חציית הסף השרירוני

לא מצאנו נתונים בספרות להשוות אליהם את הגרפ האחרון, אך לפי⁶, העקרונות החשובים בסביבת T_c תואמת את הצפי התיאורי.

דיון

כזכור, רובות מהמדידות של (I) V אינן לינאריות, ככלומר, אין במקורה זה התנגדות אוחמתית. המודל שהצענו נפסל כפי שהזכר לעיל. אבל התאמת פרמטרית שכימתה את הצורך של הפונקציה הצלילה לאפיין בדיאגרמת הפאות של החומר. H_{C2}

ניסוי שלישי: מדידה עם שדה חיצוני

מטריבציה

זרם $I_{transport}$ בעל מוליך משירה שדה מגנטי שיכל ליצור מערבולות זרם, וגם להסיע מערבולות שנוצרו ע”י שדה חיצוני H . הסעת המערבולות מתח על העל מוליך. בניסוי זה, אנחנו ”מחקим” את ההשפעה של $I_{transport}$ ע”י הזרמת זרם חיצוני לדוגמא I_{ext} . מטרות הניסוי:

1. להוכיח בדרך נוספת שהמתוח על העל מוליך לא נובע מהתנגדות אוחמתית.
2. לאפיין את ההתנגדות האפקטיבית תוך הפרדה של גרדיאנט שדה מגנטי מהתפעות האחורות של זרם $I_{transport}$.

תוספות למערכת הניסוי

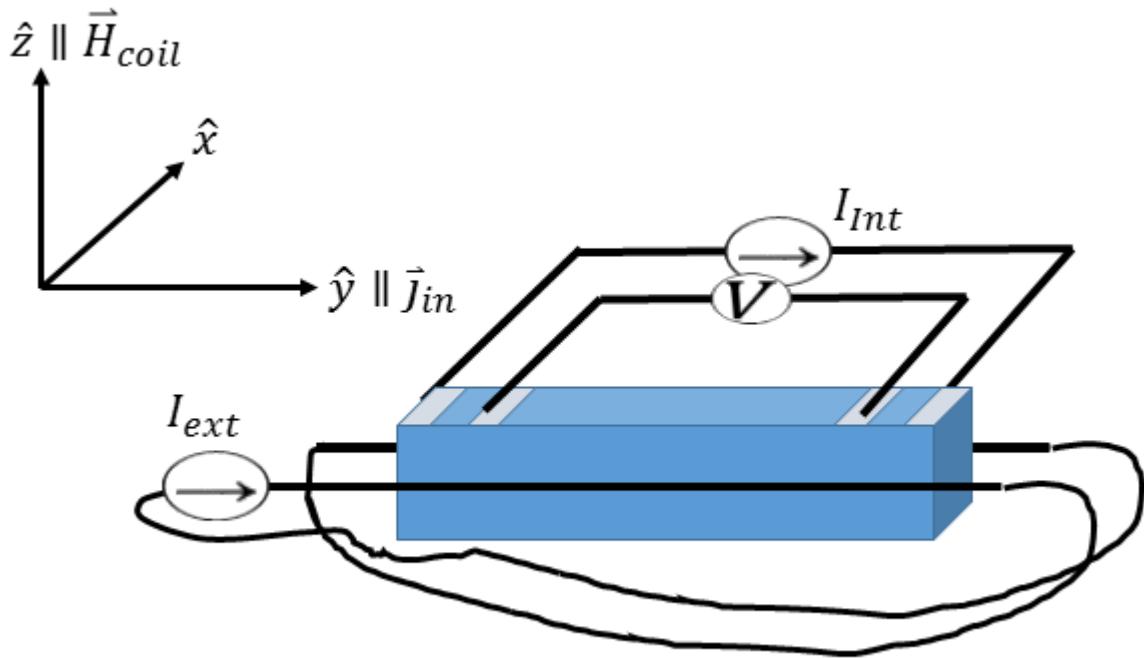
הכוונים במערכת:

למעלה: ציר z , הכוון של השדה המגנטי.
קדימה: ציר y הכוון של $I_{int} \equiv I_{transport}$.
הצד/לרוחב: ציר x , בניצב לזרם ולשדה.

התקנים חדשים

לצורך הניסוי בנו שני התקנים: התקן ראשון (שימוש לבדיקת היתכנות) שבו עבר תיל מעל הדוגמא, והתקן שני (עליו נערך הניסוי) שבו תילים עוביים בצד הדוגמא:

Hiroshi – Maeda : p68⁶



אייר 17: התקן שני: תיילים בצדדי הדוגמא. הזרם בתיילים השונים של הדוגמא הוא באותו כיוון, והתיילים מתחברים זה לזה במרקח כמו ס"מ מהדוגמא (אפקטיבית באינסוף). בתמונה נראה מעבר בודד של התיל בכל צד של הדוגמא אך בפועל התיל עבר 5 פעמים מצד אחד ו-6 מצד שני

מגבליות מערכת הניסוי

1. לאורך רוב הניסוי לא יהיה ספק זרם זמין בשבייל נגד ההספק, ולכן יהיה אילוץ $T = 77^\circ K$
2. מגבליות ספק הזרם: $I_{ext} \leq 4[Amp]$.

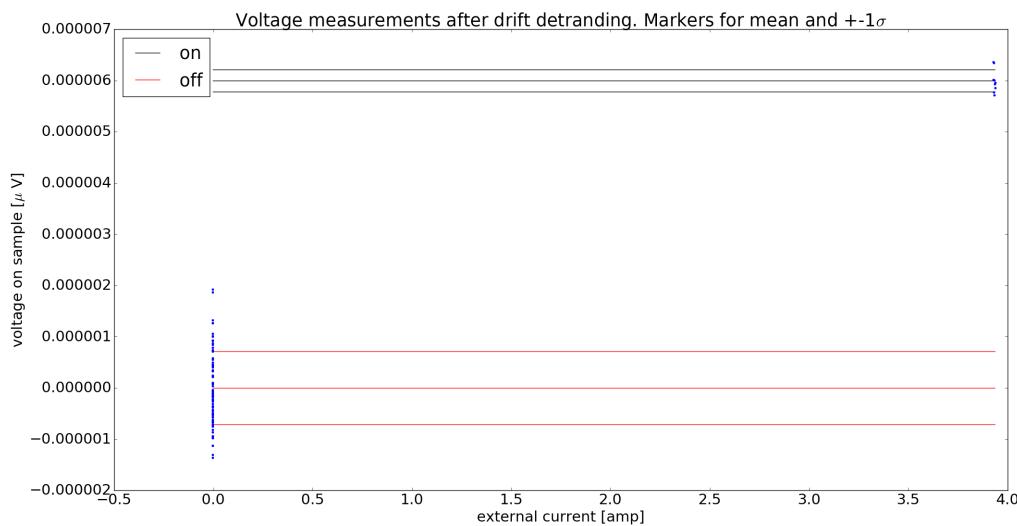
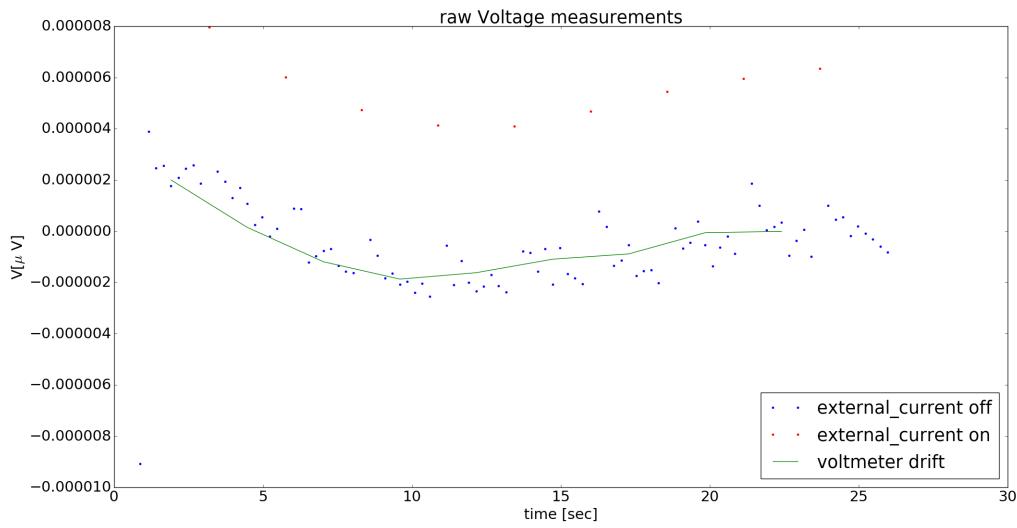
מהלך הניסוי

1. כדי לשנות באופן מיטבי בטמפרטורה, קיררכנו את הדוגמא לטמפרטורה של חנקן נוזלי, כלומר, לא הפעלנו את נגד ההספק (גם כי לא יהיה ספק זרם זמין בשבייל נגד ההספק).
2. לאורך הניסוי השתמשנו בשדה חייזרי מקסימלי שיכלנו ליצור: $H = 700 \pm 35 Gauss$.
3. מדדנו פרופיל (V) ואיהנו את הזרם הקריטי $I_{crit} = 1.75 \pm 0.25 Amp$.
4. במקביל לקביעת זרם פנימי הקריטי או מעט מעליו, הזרמו $I_{ext} = 4 Amp$ שהוא הזרם המקסימלי שניתן ספק הזרם, או 0 בשבייל למבודד את ההשתה בתמיה בין המקרים. הקפדנו על פולסים קצרים של זרם כדי למנוע אפקטים של חימום.
5. חזרנו על המדידות הנ"ל עבור שני הקיטובים (כיוון הזרמת זרם) האפשריים של I_{ext} ו- $I_{transport}$.

תוצאות

במדידות שלנו, ללא זרם פנימי $I_{transport}$ לא נמדד מתח על הדוגמא

איור 18: מדידות מתח גולמיות עם $drift$, $I_{ext} = 3.94 \pm 0.02[\text{Amp}]$ ו- $I_{ext} = 0$ ניתן לראות את ה- $drift$ בvoltmeter, וגם שאכן יש הסחה במתח כתוצאה מהזרם I_{ext}



איור 19: מדידות מתח עם $drift$, $I_{ext} = 3.94 \pm 0.02[\text{Amp}]$ ו- $I_{ext} = 0$ לאחר תיקון ה- $drift$, עם סימונו של ממוצע וסטיית תקן למעלה ולמטה לכל זרם

תוצאות ההסחות במתח לכל הזרמים $I_{transport}$ ולכל הקיטובים של הזרמים:

$sign(I_{transport}) \setminus sign(I_{ext})$	+	-
$I_{transport} = 1.5[Amp]$		
+	4.8 ± 0.6	2.9 ± 0.5
-	3.6 ± 0.7	-1.0 ± 0.9
$I_{transport} = 1.75[Amp]$		
+	5.0 ± 1.1	1.8 ± 0.8
-	3.3 ± 0.8	-1.5 ± 0.7
$I_{transport} = 2.0[Amp]$		
+	6.0 ± 0.7	2.6 ± 0.7
-	3.6 ± 1.1	-2.4 ± 0.8

איור 20: תוצאות סופיות של מדידת הסטוט המתח בין $I_{ext} = 0$ לבין $I_{ext} = 3.94 \pm 0.02[Amp]$ ביחסות של V . המדידות נעשו בשלישה זרמי $I_{crit} = 1.75 \pm 0.25[Amp]$ שונים כאשר $Transport$ הוא כרך נלקח בחשבון השגיאה המוצגת בטבלאות. תוצאות הניסוי הראו שהוא בתחום $0.5 - 1(\mu V)$, והוא כבר נלקח בחשבון השגיאה המוצגת בטבלאות. השפעה מובהקת של I_{ext} על המתח הנמדד על הדוגמא

במדידות שלנו, עם זרם חיצוני של $I_{ext} = 3[Amp]$ נמדד מתח על הדוגמא בססקלה קטנה יותר של $\approx V$ $1.5 \pm 0.5\mu V$

דיוון

הניסוי הראה אפקט מובהק של $I_{ext} = 4[Amp]$ על המתח V כאשר $I_{transport} \approx I_{crit}$, ולכן הראה באופן נסס שנפליטת המתח לא נובעת מהתנודות אורה. משטר תנעوت המערבות הרלבנטי אינו ידוע בסדרת ניסוי זה, והמסקנות אין מתיחסות אליו. ניתן לבצע מדידות מדויקות (עם *Hall Probe/SQUID*) של השדה המגנטי לקביעת צפיפות המערבות ולפיה את משטר התנועה.

נחיות $I_{transport}$ לקיום דיסיפציה

במדידות שלנו, לא זרם פנימי $I_{transport}$ לא נמדד מתח על הדוגמא. ניתן כי בולדיו, מערבות יכולות לזרום לרוחב הדוגמא בהשפעת השדה החיצוני, ולהטילזמן קצר מתח על הדוגמא, שמאזן ע"י הצבורות מטען. בהעדר מגעים בקצוות הדוגמא, הצבורות המטען תישאר. בהעדר זרם, יתקבל $0 = \vec{E} \cdot \vec{J}$.

מודלים שונים שיכולים להסביר את שינוי המתח V בעקבות הזרם I_{ext}

מבט: זרם חיצוני יוצר כוח על מערבות

1. זרם חיצוני חזק שלא מצליח להוציא מערבות מתוך הבורות, וזרם פנימי שמסוגל להוציא אותו (ולא משנה באיזה כיוון הוא).

2. זרם פנימי שנמצא על הסף של האזת מערבות מתוך הבורות, וזרם חיצוני שמעביר אותו את הסף.

מבט: זרם חיצוני יוצר מערבות נוספות נוספת:

1. האזרם החיצוני יוצר עוד מערבות נוספות מתוך הרדודים יותר. הזרימה שלחן מטילה מתח על הדוגמא.

2. האזרם החיצוני לא יוצר עוד מערבות נוספות מתוך הרדודים יותר. הזרימה שלחן מטילה מתח על העודפות באחד הצדדים מאלכסות את הבורות הרדודים יותר, וזרימה שלחן יוצר מתח על הדוגמא.

ניתוח: H , המושרים ע"י $I_{ext}, I_{transport}$ וע"י הזרם בסליל

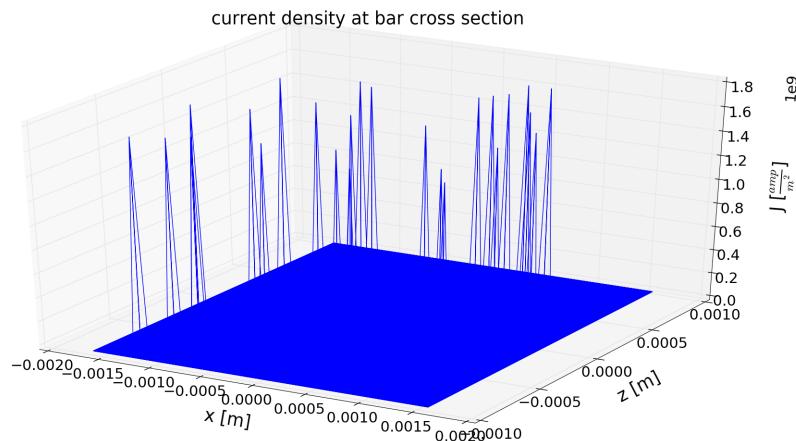
על מנת להפריד בין המודלים הללו, נדרש ניתוח כמותי של השדות המגנטיים במערכת: $H_{coil}, H_{transport}, H_{ext}$ כל שדה מגנטי משפיע על המערכת בשתי צורות: תוספת שדה מגנטי מוקומי משנה את צפיפות המערבות המקומית (והמערבבות מאכלסות אטרוי pinning בעצמות שונות). גרדיאנט שדה מגנטי $\frac{d}{dx} H_z$ מפעיל כוח על המערבות. למעשה, כיוון שהמערבבות הם בכיוון ציר z , צריך למצع את האפקטים הללו לאורץ ציר z : $< H >_z < H >_z < H >$.

כדי לבדוק את המודלים השונים לעיל ביצעו סימולציה נומרית של השדה שמזרים זרמים I_{ext} , $I_{transport}$, H_z של תיל בודד בתווך פונקציית גראן. רגולציה

הסימולציה הייתה $2\lambda \approx 28[\mu m]$ או גסה יותר, כאשר לא נדרשה רזולוציה כה עדינה (וכן $I_{transport}$ עבר בדקו כמה התפלגויות זרמיים שונות):

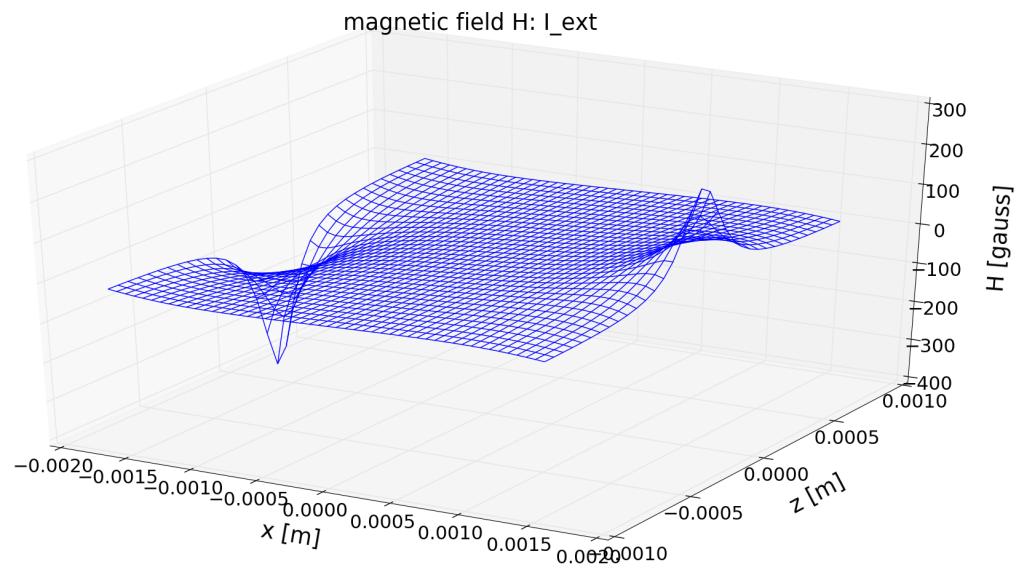
.1. מודל "קירוב 0" שהוא התפלגות קבועה.

.2. מודל והטפלגות הזרם בערכאים ממוקדים המכxisים חלק קטן מתוך שטח החתך באופן אקראי (עבור יחסים של 0.01, 0.001, 0.0001). בהעדר התנגדות אין מניעה לאורמים חד ממדיים, וזה המודל פשוט ביותר בויתר שבו גרדיאנטים חדים בשדה. למשל:

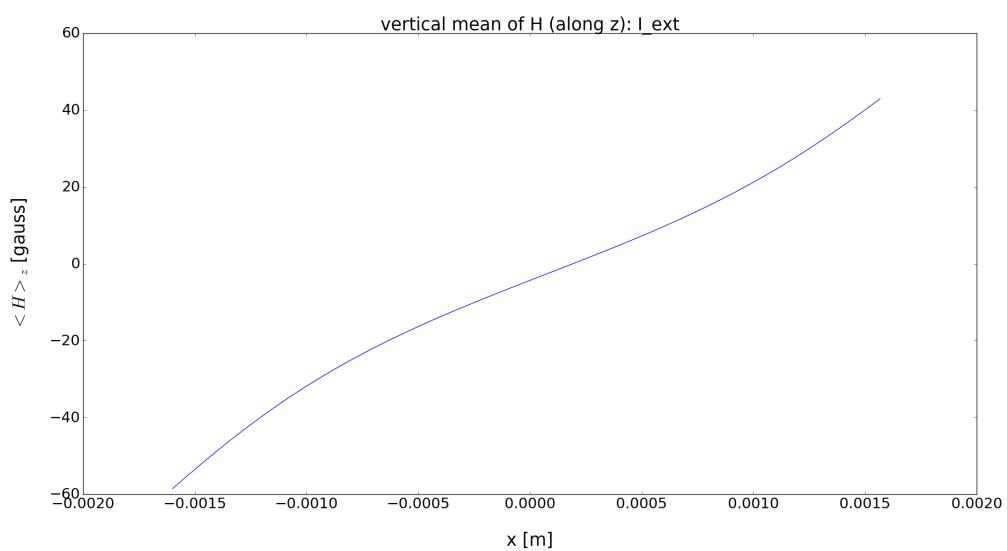


איור 21: מודל צפיפות הזרם בהטפלגות אקראית על פני 0.0001 משטח החתך

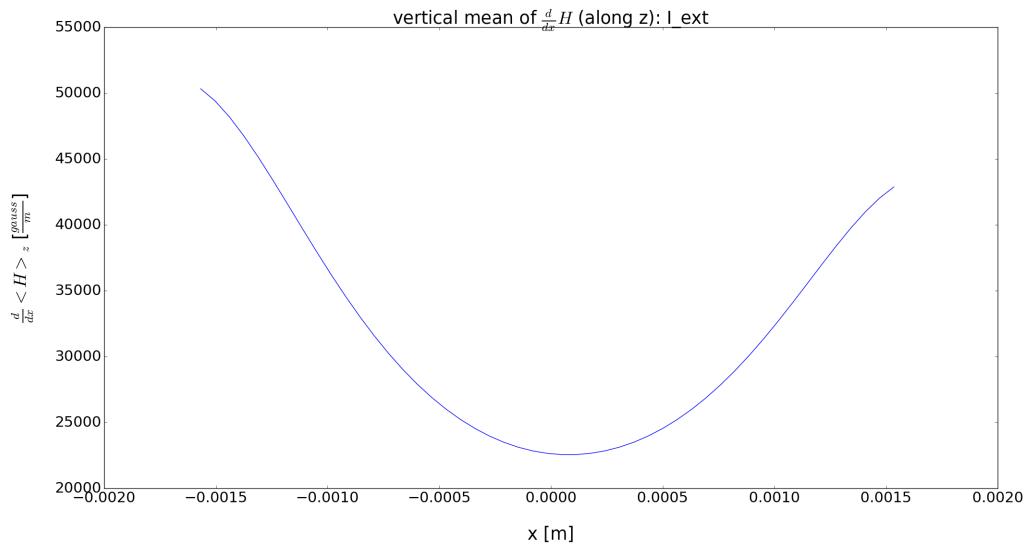
הסליל משירה שדה קבוע $H = 700[gauss]$, וכמוון ללא נזורת משמעותית. הזרם החיצוני I_{ext} משירה:



איור 22: השדה המגנטי שמשרה I_{ext}

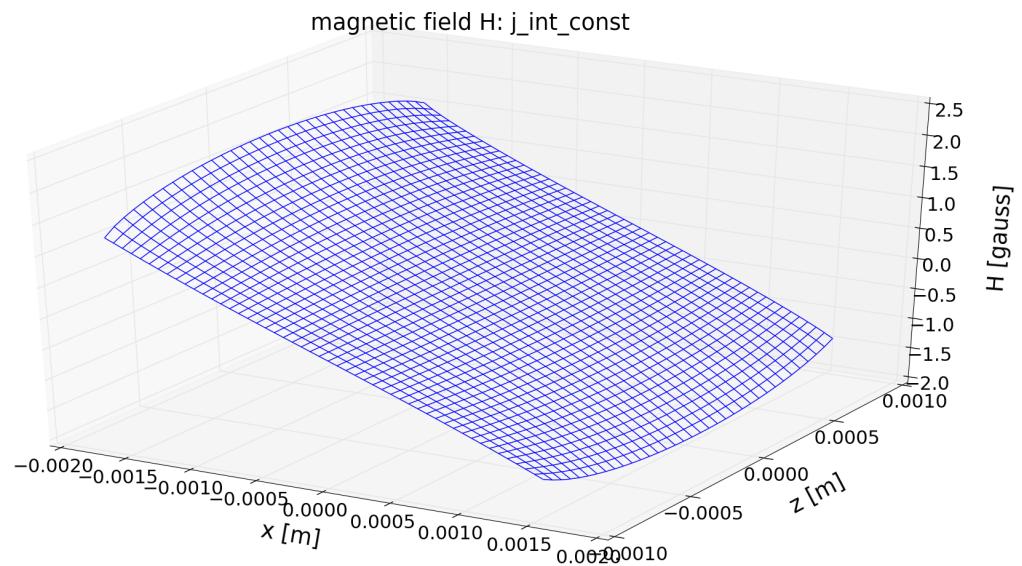


איור 23: השדה המגנטי שמשרה I_{ext} , ממוצע לאורך ציר z

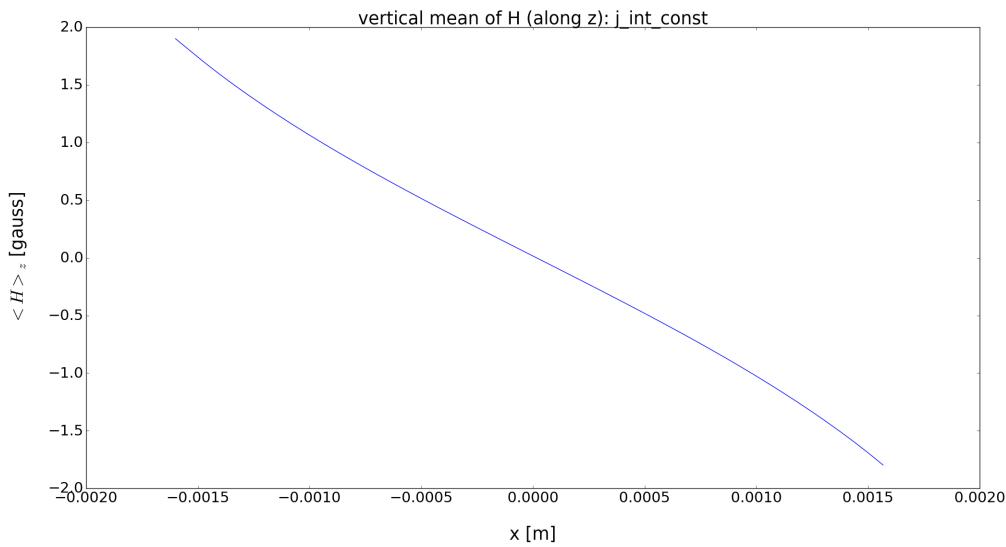


איור 24: נזירת השדה המגנטי שמשרה I_{ext} , ממוצע לאורך ציר z

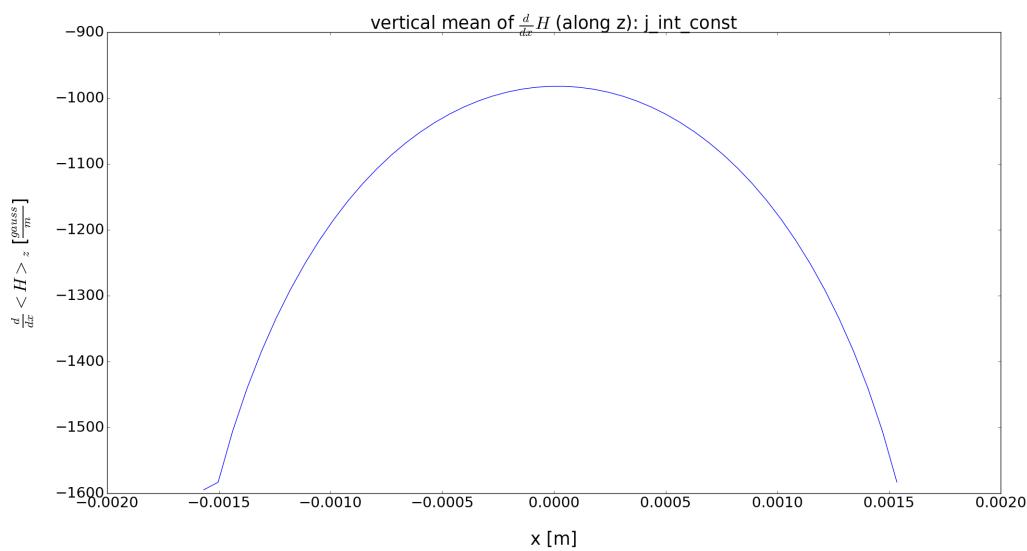
הזרם הפנימי $I_{transport}$ משירה שדה שתלי בהתפלגות הזרם לאורך חתך המוליך.
בנהנחת התפלגות זרם אחידה:



איור 25: השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$

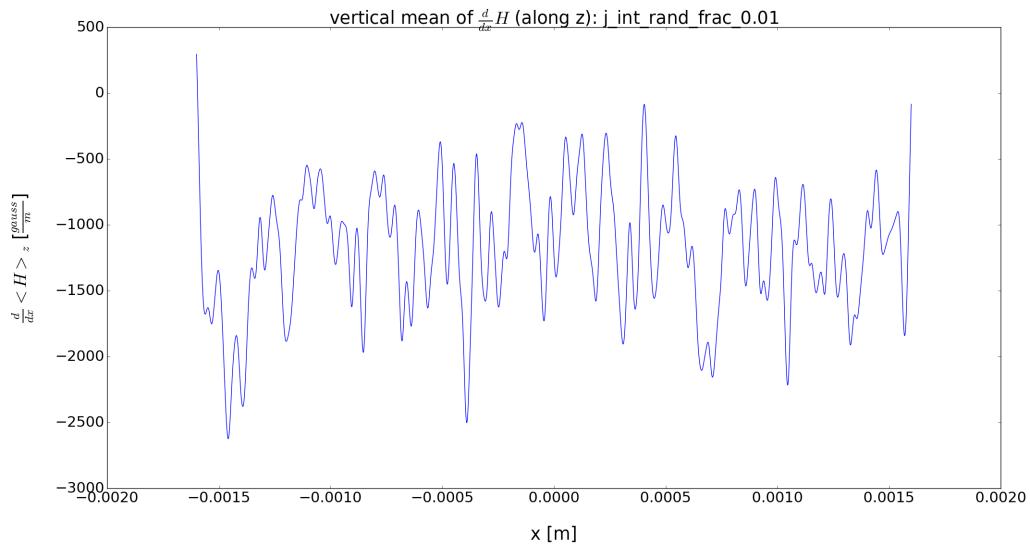


איור 26: השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$, ממוצע לאורך ציר z



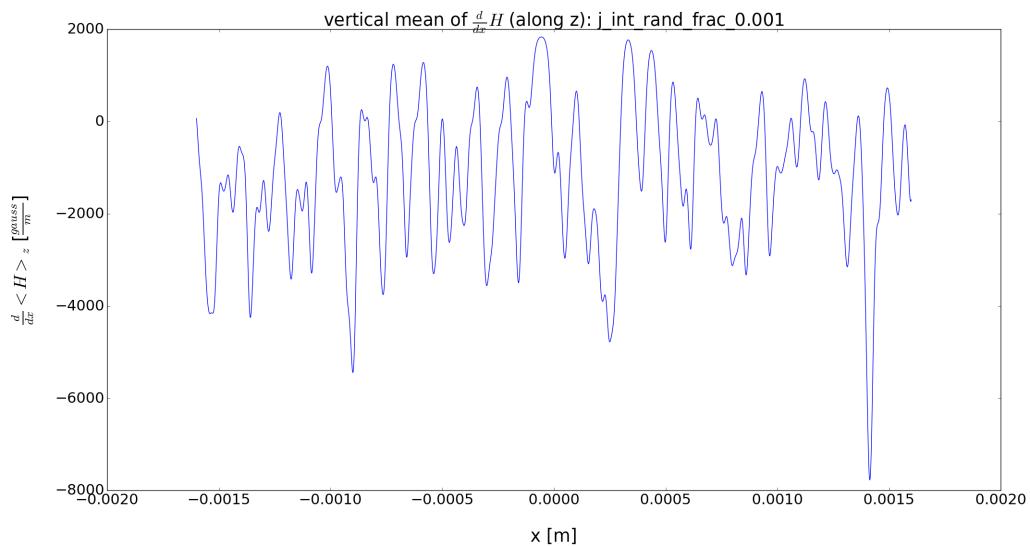
איור 27: נגזרת השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$, ממוצע לאורך ציר z

אם הזרם מתפלג בערווצים, נוצרות פלקטואציות קטנות בשדה שהוא ממוצע זרם מתפלג אחד, וההבדל המשמעותי הוא בנגזרת השדה.
בහנחת שהזרם מתפלג על 0.01 אקראי מתחם השטח:



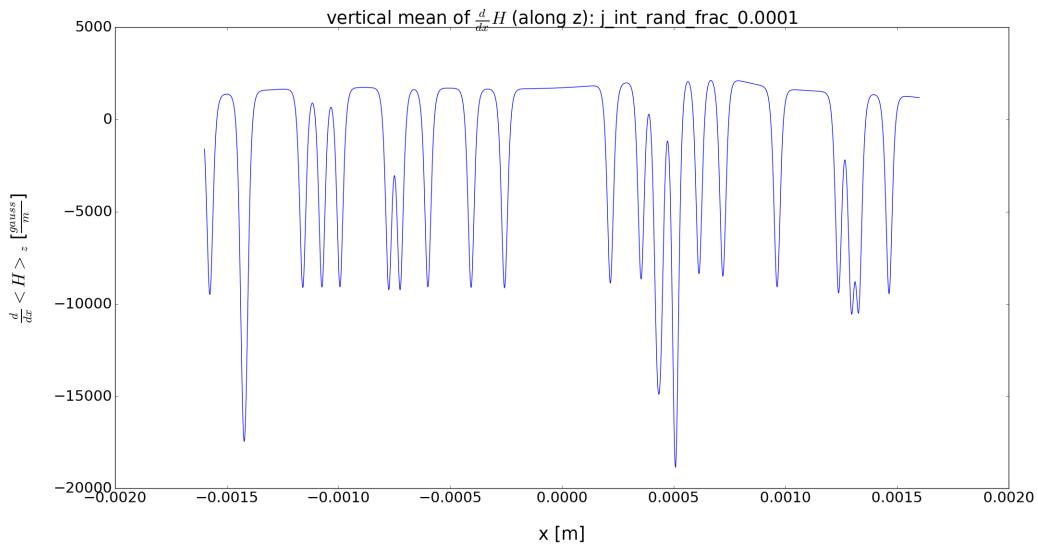
אייר 28: נגזרת השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$, ממוצע לאורך ציר z , בהתקלויות זרם בערוצים על פני 0.01 משטח החתך

בහנחת שהזרם מהתפלג על 0.001 אקראי מותוך השיטה:



אייר 29: נגזרת השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$, ממוצע לאורך ציר z , בהתקלויות זרם בערוצים על פני 0.001 משטח החתך

בහנחת שהזרם מהתפלג על 0.0001 אקראי מותוך השיטה:



איור 30: נגזרת השדה המגנטי שמשרה $I_{transport}$, מכווץ לאורך ציר z , בהתפלגות זרם בעורוצים על פני 0.0001 משטח החתך

סיכום התוצאות של סדרי גודל של השדות ונגורותם:

מקור השדה	$\langle H \rangle_z [gauss]$	סקאלת $\langle H \rangle_z [gauss]$	$\frac{d}{dx} \langle H \rangle_z [gauss]$
סליל	700	???	
I_{ext}	40	40000	
$J_{transport} = Const$	2	1000	
0.01	2	2000	
0.001	2	4000	
0.0001	2	10000	

איור 31: סיכום התוצאות של סדרי גודל של השדות ונגורותם

גרדיינט השדה שנוצר ע"י הסליל יוצר כיון מועדף במערכת

במדיות ניכר שהיפוך הכוון של האורך הפנימי והחיצוני יחד משנה את המדייה, כלומר, יש כיון מועדף למערכת. החשור המידי הוא השדה המגנטי H_{coil} . לרוב הចער הרבה לאחר המדיידות, על ספקות בנוגע לגודל התרומה של השינוי בשדה ה"קבוע" של הסליל. מכיוון שהסליל אחראי לשדה חזק מאוד, גם ההוריאציות העדויות כתצאה מסוימת קטנה ממרכז הסליל יכולות לתרום גרדיינט שדה בר השוואה לזה של I_{ext} : $14000 \frac{gauss}{m}$ לפי הערכת אצבע מסויימת. איזשהו חלק מהגרדיינט זה נופל על ציר x (לרוחב הדוגמא) כתלות בזווית. אפקט זה אולי מסביר את שבירת הסימטריה במערכת, כפי שמשמעותה בutable 20. עדיין, כיון שכל המדיידות נעשו בלי הזוזת הסליל והדוגמא, ההטייה זהה בכלו.

מסקנות מניתוח השדות המגנטיים ונגורותם, לגבי המודלים האפשריים (תווך הזנתה הדיוון על גראדיינט שדה הסליל)

- מבט: זרם חיצוני יוצר כוח על מערכות
 1. זרם חיצוני חזק שלא מצליח להוציא מערכות מתוך הבורות, וזרם פנימי שמסוגל להוציא אותן (ולא משנה באיזה כיון הוא).
 ע"ס הסימולציה הנומրית, זה יתכן רק במקרים מתחום זרם בתפלגות זרם בעורוצים מעטים ודקים על פני משטחות פחות מ- 0.0001 משטח הדוגמא.
 2. זרם פנימי שנמצא על הסף של הזוזת מערכות מתוך הבורות, וזרם חיצוני שעביר אותו את הסף. לא יתכן כיון שככל הכוונים של הזרמים הפנימי והחיצוני נוצר אפקט במתה.

מבט: זרם חיצוני יוצר מערכות נוספות

1. הזרם החיצוני יוצר עוד מערבולות נטו שמקלסין את הבורות הרדודים יותר. הזרימה שלחן מטילה מתח על הדוגמא.

לא סביר, כיון שתרומת השדה של הזרם החיצוני בהשוואה לסליל מצערית (10% במקסימום).

2. הזרם החיצוני לא יוצר עוד מערבולות נטו, אבל מעביר מערבולות בין שני הצדדים לרוחב הדוגמא. המערבולות העודפות באחד הצדדים מקלסין את הבורות הרדודים יותר, וזרימה שלהם יוצר מתח על הדוגמא.

לא סביר, כיון שתרומת השדה של הזרם החיצוני בהשוואה לסליל מצערית (10% במקסימום).

ניסויים שאפשר לעשות כדי להבחין בין המודלים השונים, וניסויי המשך לאיפיוון התופעה

1. למדוד מדידות זהות עבור זרים נוספים $I_{transport} < I_{crit}$ כולל $I_{transport}$, כדי לקבל תמונה רחבה יותר.

2. למדוד גם בטמפרטורות גבוהות יותר. **ספקטיבית:** האם בטטרוורה גבוהה מספיק **ייפול** מתח על הדוגמא גם כאשר $0 = I_{transport}$

3. לבצע את המדידה תוך בקרה על הסטייה הרדיאלית ממרכז הסליל, ועל האיזיות שלו.

4. להפוך את קיטוב / עצמת השדה החיצוני ולראות את ההשפעה.

5. לבנות התקן עם ליפופים רק לצד אחד (imbalance בין יצירה נטו להעברת מצד אחד)

6. אנחנו מניחים שהగברת השדה החיצוני בעיקר יוצרת מערבולות, והגברת הזרם הפנימי בעיקר מסיעת מערבולות. לשמש מדידות $V(T, H, I = I_{crit}, I_{ext})$, $V(T, H, I = 0, I_{ext})$, $V(T, H, I)$, $V(I)$ מיצגות תלות במספר מערבולות. העקומות $V(I)$ מיצגות את התלות באזרם החיצוני, וניתן להשווות אותה לעקומות הללו. אם היא דומה מאוד לאחת מהן, מצאנו אפקט דומיננטי, אם לא, אולי ניתן לעשות איכשהו סופר פוזיציה. אולי לא.

7. אפשר גם לבדוק את התלות של העקומות הללו בטמפרטורות שונות, כדי לקבל הבנה יותר טובה.

הפניות

• https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_vortex

INTRODUCTION TO SUPERCONDUCTIVITY - Second Edition, Michael Tinkham, McGraw-Hill Inc., 1996 •

Lecture Note on Solid State Physics - Ginzburg-Landau Theory for Superconductivity, Masatsugu Suzuki and Itsuko S. Suzuki, 2007 - p. 11-12

Bismuth-Based High-Temperature Superconductors, Hiroshi Maeda, CRC Press, 1996 - p. 68 •

מקורות תמונות

• איור 1 - <figure.boundless-cdn.com/11749/large/figure-21-03-02a> Tinkham .12

• איור 2 - img.tfd.com/ggse/6a/gsed_0001_0023_0_img6948 Tinkham .121

• איור 3 - upload.wikimedia.org/wikipedia/en/5/57/Flux_lines_in_a_superconductor01

תודות

תודה לעוזד אגס ולדרור אורגד על עזרתם בהבנת החומר התיאורטי ודיוון על התוצאות.
תודה לשיא ובנבר מבית המלאכה שבנו את התקן המגנטי.

נספח

קוד מטלב מערכת הניסוי

<https://github.com/noamg/sc/tree/master/matlabio>

קוד מטלב ופייתון ניתוח נתונים

<https://github.com/noamg/sc/tree/master/analysis>

מחברת מעבדה מצורפת בדואר חלזונות