**השפעת טמפרטורה, שטח חתך וזרם חשמלי על לולאות חשל בפרומגנטים**

**תקציר**

תופעת התנהגותם של פרומגנטיים תחת השפעת שדה מגנטי חיצוני היא תופעה שמרתקת חוקרים במשך שנים. בהשפעת שדה חיצוני, חומרים פרומגנטיים, מדגימים תכונות זיכרון אשר לה שימושים רבים ומגוונים, כגון בניית רכיבי זיכרון מהיר עבור מחשבים[[1]](#footnote-1). בניסוי זה, נבדקו תכונות זיכרון אלו, באמצעות חקר לולאות חשל המתקבלות מהשדה המגנטי הפנימי כתלות בשדה המגנטי החיצוני הפועל על החומר. נמדדו לולאות חשל בחומרים שונים, עם שטחי חתך שונים, עם עוצמת זרם חשמלי שונה, ובטמפרטורות שונות, כל זאת במטרה לבחון את התיאוריה המקובלת בתחום. תוצאות הניסוי מאששות את אפקט ברקהאוזן ואת התנהגות החומר בסמוך לנקודת קירי.

1. **מבוא**

פרומגנטים הינם חומרים מגנטיים אשר בהשפעת שדה מגנטי חיצוני, יוצרים שדה מגנטי פנימי גדול משמעותית מהשדה החיצוני המופעל עליהם (ביחס ל'פאראמגנטים' או 'דיאמגנטים'[[2]](#footnote-2)). חומרים אלו 'יודעים' לשמור המגנטיות שלהם גם לאחר הפסקת החשיפה לשדה החיצוני. לתכונה זו קוראים 'זיכרון מגנטי'. לפיכך, השדה המגנטי הפנימי שנוצר בחומרים אלו תלוי לא רק בשדה החיצוני המופעל עליו, אלא גם במצב הספציפי (סידור הדיפולים הספציפי) שבו החומר מצוי בכל רגע. מכאן, עקומת השדה הפנימי כתלות בשדה החיצוני, איננה חד-חד ערכית, וצורתה נקראת לולאת חשל.

**רקע תיאורטי**

**כוח מגנטי ושדה מגנטי -** שדה מגנטי זהו שדה וקטורי המתאר את ההשפעה המגנטית בנקודה מסוימת על מטענים וזרמים חשמליים. ההשפעה של השדה בנקודה זו תהיה מתוארת ע"י כוח לורנץ;



או ברמה המקרוסקופית על תיל נושא זרם בצורה:



כאשר מטען חשמלי של חלקיק נקודתי, מהירותו, השדה המגנטי, עוצמת זרם בתיל ו- אורך התיל. בלולאת זרם הכרוכה ב ליפופים של תיל נושא זרם, השדה המגנטי הפועל במרכזה במערכת מוגדר בתור:

שטף מגנטי זהו כמות השדה המגנטי העוברת ביחידת שטח ליחידת זמן.

**חומרים מגנטיים -** מגנטיות של חומר זוהי היכולת שלו לשנות את כיוון הדיפולים המגנטיים[[3]](#footnote-3) שלו בהשפעת שדה מגנטי חיצוני. מגנטיזציה של חומר מוגדרת בתור צפיפות הדיפולים המגנטיים שלו. עבור חומר סטנדרטי, גודל זה נתון ע"י:

(1.4)

כאשר מספר הדיפולים בחומר, נפח החומר ו- מייצג דיפול מגנטי בודד. שני הגדלים האופייניים לחומר המגדירים את המגנטיות שלו הינם פרמיאביליות החומר, המוגדרת בתור:

(1.5)

וסוספטיביליות החומר המוגדר בתור:

(1.6)

כאשר השדה המגנטי החיצוני, השדה הפנימי המורגש בחומר ו- המגנטיזציה. ישנם שני סוגים של חומרים שהתמקדנו בהם בניסוי זה. פרומגנטים הינם חומרים אשר, בהשפעת שדה חיצוני יוצרים שדה פנימי בעוצמה גבוהה בהרבה מן השדה החיצוני ומקביל לכיוונו, כלומר מאופיינים בפרמיאביליות גדולה (סדר גודל של בין ל-). בחומרים אלו לפיכך, כל הדיפולים בחומר מצביעים לאותו כיוון. פרימגנטים הינם חומרים אשר בדומה לפרומגנטים, תגובתם לשדה מגנטי חיצוני חזקה, ברמה המיקרוסקופית, החומר יוצר שכבות של דיפולים המצביעים לאותו כיוון, אך בין השכבות הדיפולים אינם בהכרח מצביעים אותו כיוון (תופעה המכונה דומיינים מגנטיים). לפיכך ברמה המקרוסקופית, התגובה תיראה חלשה יותר מפרומגנטים, אם בכלל.

**מעגלים מגנטיים -** במעגלים חשמליים, חוק Ohm מספק קשר בין מפל המתח במעגל, לבין ההתנגדות והזרם במעגל:

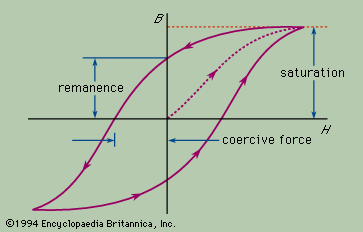
(1.7)

במעגלים מגנטיים, ההקבלה לחוק זה נותן לנו:

(1.8)

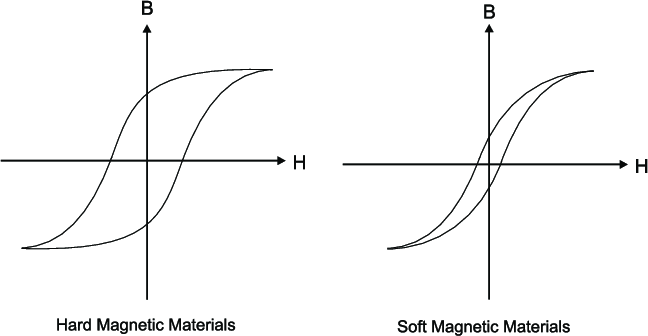
כאשר הכוח המגנטו מניע (כמ"מ), השטף המגנטי במעגל ו- ההתנגדות המגנטית במעגל.

**לולאות חשל -** בעקבות התגובה החזקה של חומרים פרומגנטים תחת השפעת שדה חיצוני, חומרים אלו נוטים לשמור על סידור הדיפולים שלהם גם בהפסקת השדה החיצוני. תכונת זיכרון זו של החומרים גורמת לכך שהשדה הפנימי המתקבל בחומר מסוים תלוי לא רק בשדה החיצוני המופעל עליו, אלא גם בסידור הדיפולים הספציפי שהחומר מצוי בו באותו רגע. לפיכך, בהוצאת גרף של השדה הפנימי כתלות בשדה החיצוני בחומר פרומגנטי, נצפה לקבל גרף שאינו חד-חד ערכי. גרף מסוג זה נקרא לולאת חשל:



*איור (1.1): הדגמה של לולאת חשל סטנדרטית בחומר פרומגנטי שרירותי. הקו המקווקו הינו ה-initial magnetization curve, הקו הרציף הינו ערכי השדה הפנימי הנמדדים כתלות בשדה החיצוני, עבור שדה חיצוני משתנה באופן מחזורי.*

עבור שדה בעוצמה מסוימת, כלל הדיפולים המגנטיים בחומר יצביעו לאותו כיוון, ונקבל מצב של רוויה מגנטית (saturation) כפי שניכר באיור. נקודות החיתוך של הגרף עם הצירים הינן השדה הפנימי המתקבל בחומר לאחר הפסקת השדה החיצוני, ועוצמת השדה החיצוני שיש להפעיל על מנת שיורגש אפס שדה פנימי. השטח הכלוא בתוך הלולאה מאפיין כמה שהחומר רך או קשה מגנטית. שטח זה מייצג את העבודה שצריך להשקיע על מנת לשנות את כיוון הדיפולים בחומר.



איור (1.2): הדגמה של השוני הלולאות החשל עבור חומר רך מגנטית לעומת חומר קשה מגנטית. מימין הלולאה המתקבלת עבור החומר רך ומשמאל עבור חומר קשה.

1. **מהלך הניסוי**

בניסוי, מדדנו תחילה לולאות חשל של חומרים כתלות בשטח החתך והזרם החשמלי ולאחר מכן חקרנו התפלגות של דומיינים מגנטיים ואת אפקט ברקהאוזן באמצעות מערכת שונה.

Diagram

Description automatically generated

*איור (2.1): מערכת הניסוי בחלק הראשון.*

**בחלק הראשון** של הניסוי מדדנו את המתח על הנגד ואת המתח על הקבל (ראו איור 2.1), אשר פרופורציוניים לשדה המגנטי החיצוני והשדה המגנטי הכולל , בהתאמה.

Graphical user interface, application, Word

Description automatically generated

*איור (2.2): תקריב של המעגל המגנטי במערכת הניסוי מאיור 2.1*

המתח על הנגד פרופורציוני לעוצמת הזרם במעגל (ראו משוואה 1.7), וכך גם שדה המגנטי החיצוני המופעל על הליבה המגנטית פרופורציוני לעוצמת הזרם (ראו משוואה XXX), ומכאן המתח על הנגד פרופורציוני לשדה המגנטי החיצוני . כמו כן, המתח על הקבל ניתן על ידי:

*אך מכך ש- (כאשר הוא שטח החתך של החומר הנבדק), נקבל בסה"כ שהמתח על הקבל פרופורציוני לשדה המגנטי הכולל . ביצענו מדידות כדלהלן:*

1. ***בדיקת השפעת שטח חתך-***

*אותו חומר, אך בעל שטח חתך משתנה: מ-0.105 סמ"ר ועד 0.84 סמ"ר, בקפיצות של 0.105 (סה"כ 8 שטחי חתך שונים). התנגדויות קבועות במעגל:*

*(כל ההתנגדויות נמדדות ב-).*

1. ***בדיקת השפעת עוצמת זרם חשמלי-***

*2 חומרים שונים, בעלי שטח חתך זהה וקבוע של סמ"ר, אך בהתנגדות משתנה של הנגד : בטווח של , בדילוגים של .*

1. ***השוואת פרמיאביליות חומרים-***

*2 חומרים שונים, בעלי שטח חתך שונה, עם התנגדויות זהות, שנבחרו לניסוי זה כיוון שגובה לולאות החשל שיצרו הוא בקירוב טוב זהה.*

מיקרוסקופ ומצלמה

מקטב 2

מקטב 1

גרנט מלופף בסליל

מקור אור

*איור (2.3): סקיצה של מערכת הניסוי בחלק ב' – חקר דומיינים מגנטיים ואפקט ברקהאוזן.*

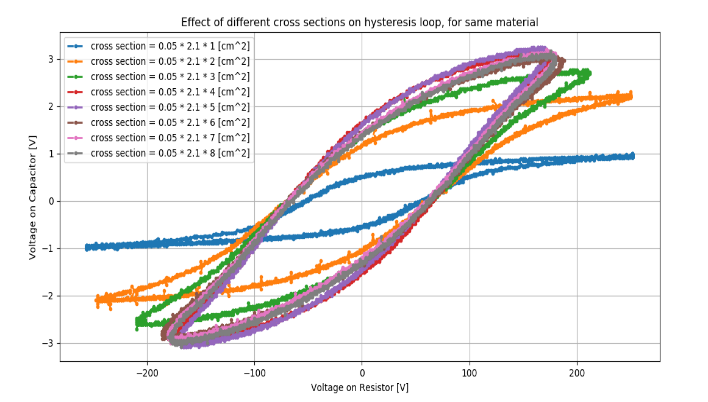
**בחלקו השני** של הניסוי, חקרנו התפלגות של דומיינים מגנטיים ואת אפקט ברקהאוזן. מערכת הניסוי (ראו איור 2.3) כללה מיקרוסקופ אופטי המחובר למצלמה, שכבה דקה של גרנט פרימגנטי שמשני צדדיו 2 מקטבים ומסביבו סליל. מהות הסליל היא לגרום לשדה מגנטי בכיוון המאונך למקטבים ולגרנט הפרימגנטי. בכל מדידה, שינינו את השדה החשמלי בסליל (כאשר כתוצאה מכך השתנה השדה החשמלי העובר דרך הגרנט), וצילמנו את התפלגות האזורים המגנטיים בחומר. השלבים העיקריים בתהליך המדידה היו –

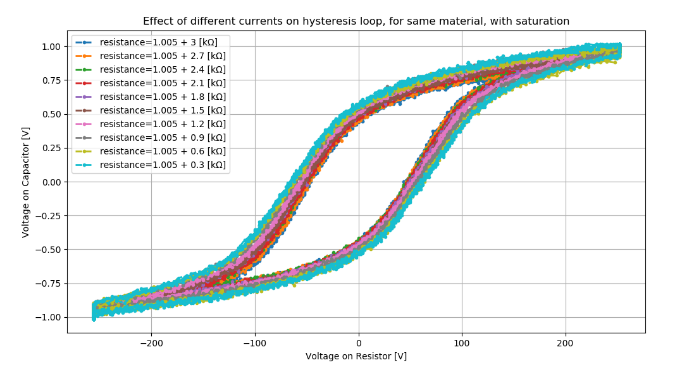
1. התחלת מדידה ממתח אפסי.
2. הגדלת המתח עד שתמונת הדומיינים המגנטיים המתקבלת מכילה צבע יחיד בקירוב טוב.
3. הורדת המתח בחזרה עד אפס.
4. החלפת כיוון המתח במעגל לצורך הדמיית המשך ירידה במתח.
5. עליה חזרה מעלה.

ביצענו שינויים של במתח בין צילום לצילום. ביצענו את כל השלבים לעיל פעמיים ברצף לכל מדידה, וביצענו סה"כ 2 מדידות, עבור כיול שונה של זום המצלמה – זאת כדי להתמודד עם 2 שכבות שונות של אזורים מגנטיים.

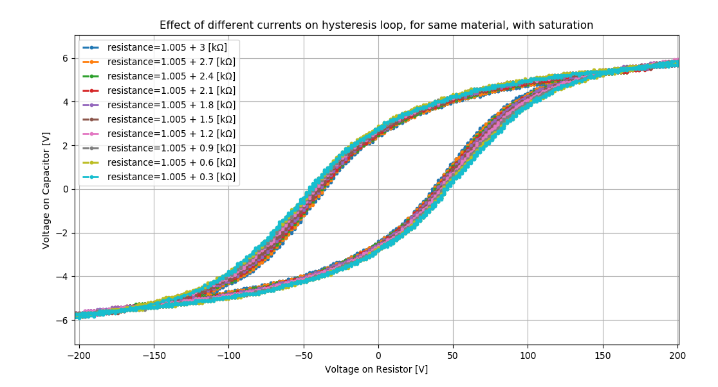
1. **תוצאות**

להלן הגרפים שהתקבלו עבור השפעת שטחי חתך שונים עבור חומר אחד על לולאות החשל שלו, ועבור מדידת סטורציה של חומרים שונים עבור זרמים שונים.

גרף (3.1): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר זהה (חומר א') עם שטח חתך שונה. כל סט נקודות מייצג את הערכים הנמדדים עבור שטח חתך זה.

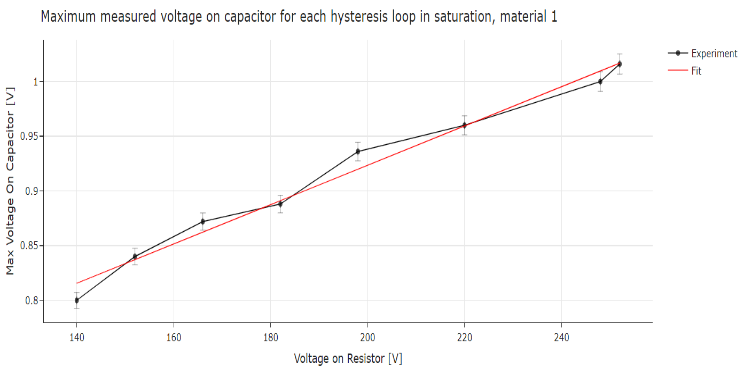


גרף (3.2): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר א' , עבור עוצמת זרם שונה במעגל. כל סט מדידות מציג את הערכים הנמדדים עבור התנגדות ספציפית המצויה במעגל.



גרף (3.3): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר ב', עבור זרמים שונים במעגל. כל סט מדידות מציג את הערכים הנמדדים עבור התנגדות ספציפית המצויה במעגל.

בגרפים (3.2) ו-(3.3), ניכר שהלולאות הגיעו לסטורציה, לפיכך, לפי משוואה (1.5) נצפה שלקיחת הערכים המקסימליים בסטורציה של כל גרף, וביצוע התאמה לינארית לנקודות אלו, תניב ישר שהשיפוע שלו הוא פרמיאביליות החומר החל מנקודה מסוימת בה הדיפולים בחומר מצביעים לאותו כיוון. גרפים עבור נקודות אלו:



גרף (3.4): ערכי המקסימום בלולאות שהתקבלו עבור סטורציה של חומר א'. הנקודות השחורות הינן הערכים הנמדדים. הקו האדום הינו התאמה לינארית תיאורטית לנקודות. השגיאות חושבו ע"י התקדמות שגיאות, עבור השגיאה בשטחי החתך שלנו ונתוני השגיאות לאוהמטר שהשתמשנו בו (ראו נספחים). ההתנגדות הנמדדת במעגל 2 הייתה גדולה בהרבה מאשר במעגל 1 ועל כן השגיאות בציר x זניחות לעומת ציר y.

Chart, line chart, scatter chart

Description automatically generated

גרף (3.5): ערכי המקסימום בלולאות שהתקבלו עבור סטורציה של חומר ב'. הנקודות השחורות הינן הערכים הנמדדים. הקו האדום הינו התאמה לינארית תיאורטית לנקודות.שגיאות חושבו כמפורט בגרף (3.4).

ניכר מן הגרפים התאמות לינאריות טובות (), ונקבל

1. **דיון**

אאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאא

1. **נספחים**

אאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאאא

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic-core_memory> [↑](#footnote-ref-1)
2. פאראמגנטים ודיאמגנטים הינם חומרים אשר תכונת המגנטיות שלהם נגרמת רק בהשפעת שדה מגנטי חיצוני, והשדה המגנטי הפנימי שנוצר בהם קרוב מאוד לשדה המגנטי החיצוני (פרמיאביליות אופיינית של קצת יותר/פחות מ-1) [↑](#footnote-ref-2)
3. מומנט דיפול מגנטי היא תכונה אשר מאפיינת כל חלקיק המרכיב חומר, הקשורה לאוריינטציה של אותו אטום, וכמו כן לספין שלו. [↑](#footnote-ref-3)