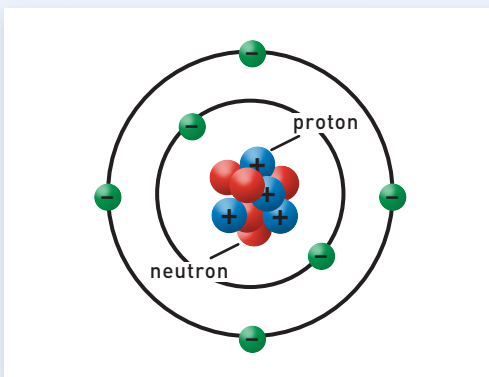


ספינטרוניקה



מאת פרופ' אורה אנטין-זולמן

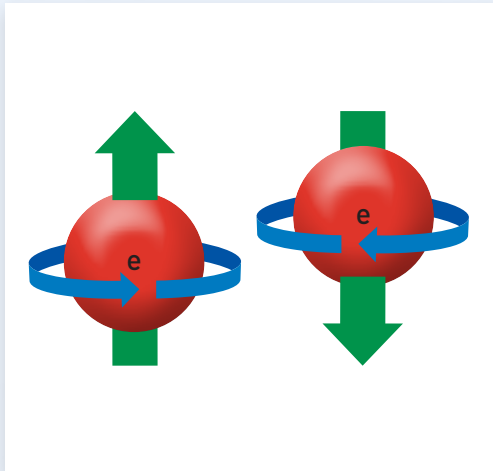
שהפרוטון גדול פי 2000 (בקירוב) מהאלקטרון. אולם למרות ההבדל העצום בגדלים, הפרוטון והאלקטרון נושאים בדיוק את אותו מטען חשמלי, אבל עם סימן הפוך: זה של הפרוטון מסומן כחיובי, וזה של האלקטרון הוא שלילי.



איור 1. סכמה של מבנה האטום המציגה את הפרוטונים המטענים חיובית (סימן +), את הנייטרונים שהם אדישים מבחינה חשמלית, ואת האלקטרונים המטענים שלילית (סימן -)

אם לצטט מפרסום של הזרוע החינוכית של מכון ויצמן למדע, שטח המחקר הקרוי "ספינטרוניקה" "עושה סיבוב" על התחום הוותיק, הוא ה"אלקטרוניקה". את שימושי האלקטרוניקה – לדוגמה במחשבים, בטלפונים סלולריים ובתנורי מיקרוגל – כולנו מכירים, ולמעשה לא נוכל לדמיין את חיינו בלעדיהם. הם מבוססים על זרם של אלקטרונים, שאותו אנו מקבלים מחברת החשמל. החומר שדרכו זרם החשמל, כמו כל חומר אחר, בנוי מאטומים. כל אטום בנוי מגרעין, שבעצמו מורכב מפרוטונים ומנייטרונים ומאלקטרונים שמסתובבים סביבו. האלקטרונים הם חלקיקים קטנטנים שהתגלו בסוף המאה התשע-עשרה, בשנת 1897.

הציוור הידוע שלפנינו, שאמור לתאר את מבנה האטום, איננו תואם את המציאות, בין השאר מפני



איור 2. סכמה המציגה את האלקטרון ככדור הסובב על צירו, כאשר אפשריים לו שני כיווני סיבוב

ננסה במקום זאת לתאר את הספין באופן ציורי, וזאת נוכל לעשות בשני אופנים. אולם קודם לכן נעיר כי תכונת הספין התגלתה רק בתחילת המאה העשרים, והתקבלה די בקושי על ידי הקהילה המדעית, אולי מפני היותה תכונה "קוונטית" (בניגוד לתכונה "קלאסית" שאותה ניתן להסביר במסגרת הפיזיקה הקלאסית, שהיא נגישה יותר לחושינו). באותן שנים התקשו פיזיקאים ידועי שם (כמו איינשטיין) להשלים עם הפיזיקה הקוונטית. מעניין לציין גם שתגלית חשובה זו לא זיכתה את הוגיה בפרס נובל.

ראשית, ניתן לתאר את הספין כאילו האלקטרון מסתובב סביב עצמו, כמו סביבון. תכונת הספין אינה מיוחדת רק לאלקטרונים – גם לחלקיקים אחרים יש ספין. אבל הספין של האלקטרון יכול לקבל רק אחד משני ערכים – שוב באופן ציורי: האלקטרון יכול להסתובב סביב צירו בכיוון השעון או נגדו, כפי שנראה באיור 2. איך נוכל לקבוע מהו הציר שסביבו סובב האלקטרון? בשאלה זו ננסה לדון בהמשך. אולם העובדה שהספין יכול להיות רק בעל אחד משני ערכים חשובה במיוחד, כפי שנראה להלן.

הניטרונים, כפי שמרמז שמם, אינם נושאים מטען חשמלי ולכן הם "ניטרלים". כיוון שמספר הפרוטונים באטום שווה למספר האלקטרונים, הסכום הכולל של מטעני הפרוטונים מקזז את זה של האלקטרונים, ולכן בסופו של דבר כל אחד מהאטומים איננו בעל מטען חשמלי. אם כן, איך זורם החשמל בחומר, למשל במתכת? מסתבר כי האלקטרונים המרוחקים יותר מהגרעין יכולים להיפרד ממנו (הם יכולים להיות מרוחקים מאוד מהגרעין: לו היה הגרעין בגודל של כדור פינג-פונג, היו אלקטרונים אלה יכולים להיות במרחק של כמאות מטרים). המוני האלקטרונים הללו שנתרמו מכל האטומים נעים בתוך החומר די בחופשיות. האלקטרונים הקטנטנים וקלי הרגליים נושאים את הזרם החשמלי. מכאן השם "אלקטרוניקה".

איך רוכבת הספינטרוניקה על כתפי האלקטרוניקה?

ובכן, בעוד האלקטרוניקה משתמשת בזרמים חשמליים, כלומר במטען החשמלי שנושאים האלקטרונים, הספינטרוניקה מתמקדת בשימוש בתכונה אחרת של האלקטרונים, שנקראת באנגלית "ספין" (*spin*), ובעברית "סחריר". המושג "ספין" הפך לאחרונה להיות די שכיח במקומותינו, במיוחד בהקשרים פוליטיים, ומובנו אז מתייחס לשימוש מניפולטיבי ("טפלולי" על פי האקדמיה ללשון העברית) בעובדות כדי להסיח את דעת הקהל מעניין חשוב יותר שאינו מאדיר, בלשון המעטה, את הפוליטיקאי יוצר הספין.

בניגוד גמור לזה, הספין של האלקטרון הוא תכונה ללא שום הקשר "שלילי". יש לתכונה זו הגדרה מדויקת בתורת הקוונטים שלא נדון בה כאן, בעיקר משום שבניגוד למטען חשמלי, אין לספין מקבילה בפיזיקה יום-יומית, זו הקרויה פיזיקה "קלאסית".



איור 3. שני זוכי פרס נובל בפיזיקה, פרופ' פאולי (משמאל) ופרופ' בוהר, מתבוננים בתנועתו של סביבון בניסיון להבין את המושג החדש "ספין". התמונה צולמה בשנת 1954.

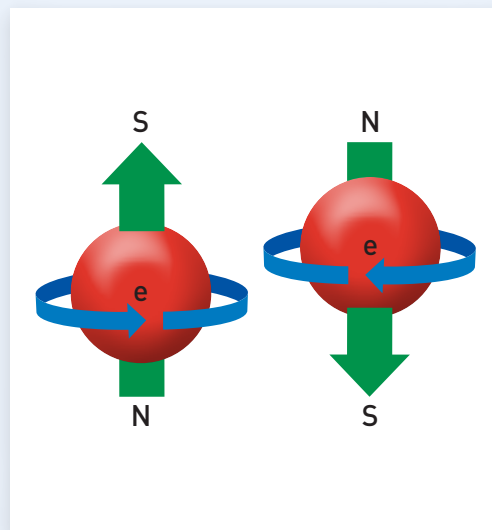
עתה לשני סוגים: אלה שהמגנט הפנימי שלהם מצביע צפונה (או מעלה), ואלה שהמגנט הפנימי שלהם מצביע דרומה (או מטה). במילים אחרות, חלק מהאלקטרונים בחומר הם בעלי מגנט (מגנטיזציה) בכיוון אחד, וחלק ממגנטים בכיוון ההפוך. אם לא נעשה עכשיו דבר, סביר להניח כי בחומר יהיה (בממוצע) מספר זהה של אלקטרונים "צפוניים" ואלקטרונים "דרומיים", ותכונת הספין לא תבוא לידי ביטוי כלל וכלל.

הספינטרוניקה שואפת להשתמש בזרמי ספין, כלומר זרמים של אלקטרונים שבעיקרם הם "צפוניים" או "דרומיים". במילים אחרות, במחקר בתחום זה מנסים להחליף זרמים חשמליים בזרמי מגנט. וכל זאת למה? משום שזרמים חשמליים גורמים להתחממות, ומכאן לאיבוד אנרגיה, ואילו באמצעות השימוש בספין של האלקטרונים אפשר להשיג זרמים שווי ערך, שגורמים להתחממות פחותה בהרבה, ועל כן מאבדים פחות אנרגיה.

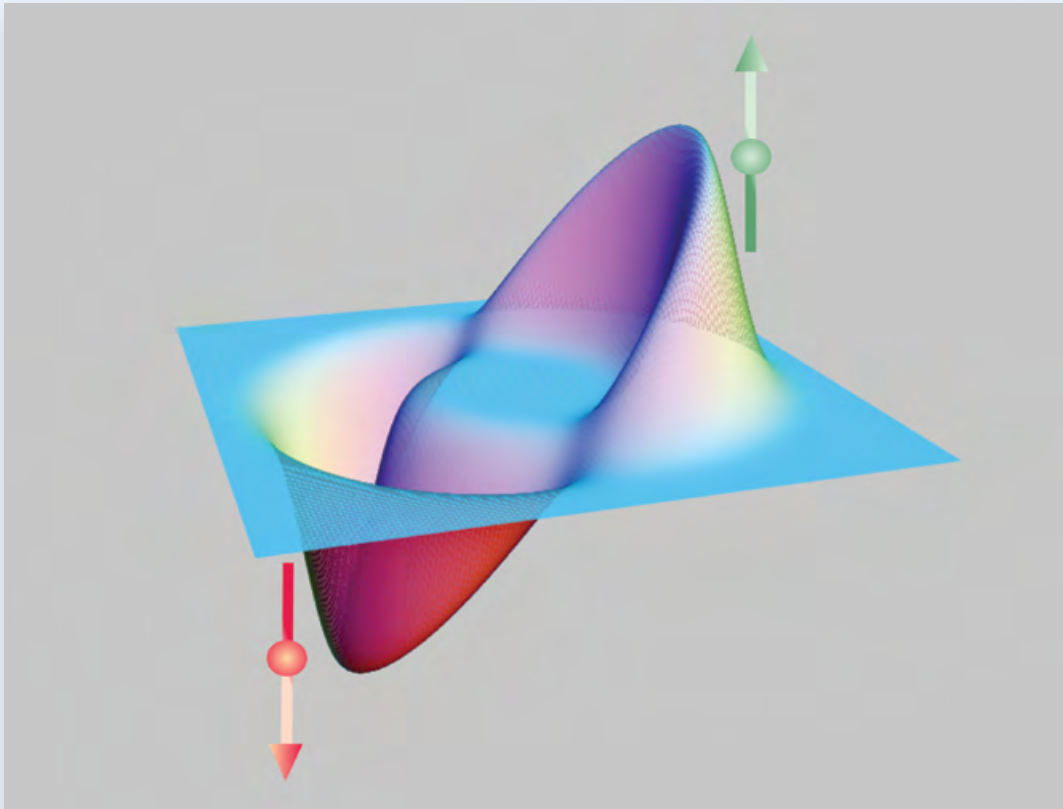
באופן אידיאלי נוכל לחשוב על מצב שבו הצלחנו לגרום לאלקטרונים הצפוניים בתיל חשמלי מסוים לנוע ימינה, ולאלקטרונים הדרומיים לנוע שמאלה. התוצאה נטו תהיה זרימת מגנט לאחד משני הכיוונים: ימינה אם ישנם יותר צפוניים מדרומיים, ולהפך. בכך נשיג זרימה של אלקטרונים שנוכל להשתמש בה בדומה לשימושי האלקטרונים, אולם המחיר שנשלם באובדן אנרגיה יהיה קטן הרבה יותר, כיוון שהזרם החשמלי שנוצר קטן הרבה יותר. הסיבה היא פשוטה: אם 50 אלקטרונים נעים ימינה ו־30 אלקטרונים נעים שמאלה, הזרם החשמלי נישא רק על ידי 20 אלקטרונים. לעומת זאת זרם המגנט נישא על ידי 80 אלקטרונים. ואכן הצליחו ליצור מצב כזה במעבדה: איור 5 להלן מראה תוצאה ניסיונית (מ־2003) שהושגה בשימוש בלייזר.

שני זוכי פרס נובל בפיזיקה, הפיזיקאי פרופ' וולפגנג פאולי, שניבא את קיום הספין באופן תאורטי בשנת 1924, והפיזיקאי פרופ' נילס בוהר, אבי מודל האטום שתואר למעלה (שזכו בפרס עבור תגליות אחרות), נראים בתמונה כשהם מתבוננים בתנועתו של סביבון בניסיון להנגיש את מושג הספין למדענים קטני-אמונה.

כפי שהוזכר לעיל, הספין של האלקטרון יכול לקבל רק אחד משני ערכים, שתוארו לעיל כסיבוב בכיוון השעון או נגדו, אבל אפשר לחשוב על שני הערכים האפשריים הללו גם אחרת – דמיינו כי האלקטרון הוא מגנט קטנטן שיכול להצביע או צפונה או דרומה, ובמילים אחרות, הוא מצביע או למעלה או למטה, וזה המינוח המקובל יותר בקהילה המדעית. אנחנו עוד צריכים לשאול איך נקבע הכיוון – "מעלה" או "מטה" – אבל קודם לכן, אם אנו מקבלים את העובדה שיש רק שני ערכים אפשריים לספין, אזי אוכלוסיית האלקטרונים המתרוצצים בחומר, שקודם היו כולם זהים זה לזה ושכולם נושאים בדיוק את אותו מטען חשמלי, מחולקת



איור 4. סכמה (אותה אחת שבאיור 2) המציגה את האלקטרון כמגנט קטנטן שיכול להצביע "צפונה" או "דרומה"



איור 5. With some quantum trickery, laser light makes spin-up electrons (green) flow one way and spin-down electrons (red) flow the other inside a semiconductor. The opposing flows produce a pure spin current without an electrical current
 Courtesy of PD Dr. Jens Hübner/Leibniz University Hannover

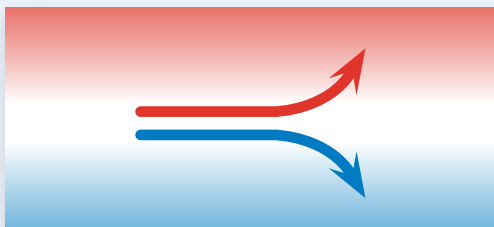
אולם יש עוד אפשרות ליצירת זרמי ספין, שמייתרת את הצורך בשימוש במגנט גדול, כלומר בהפעלת שדה מגנטי חיצוני. אפשרות זו היא לב המחקר שבו אני עוסקת בשנים האחרונות. הכותרת המקצועית של תחום מחקר זה היא "יצירת זרמי ספין על ידי הצימוד ספין-מסילה".

למה הכונה במילים "צימוד ספין-מסילה"?

מסתבר כי תורת הקוונטים ותורת היחסות מלמדות שתיהן כי כיוון המגנט הקטנטן של האלקטרון יכול להשתנות לאורך המסלול – המסילה – שבו הוא

לאמור, בסיוע של כמה "טריקים ושטיקים" של פיזיקת הקוונטים אפשר ליצור זרם מגנט, כלומר זרם של ספין, ללא זרם חשמלי.

נשאר "רק" להבין מה קובע איזה משני הערכים האפשריים של הספין יקבל אלקטרון זה או אחר. אם נחזור לאיור 4, שבו מוצג האלקטרון כמגנט קטנטן, נוכל להגיע למסקנה הזאת: נשים את החומר שלנו בתוך מגנט גדול, ובמילים מקצועיות יותר – נפעיל עליו שדה מגנטי חזק מספיק – וכל המגנטים הקטנים יתאמצו לסדר את עצמם בכיוון השדה המגנטי המופעל, בדומה למחט המצפן.



איור 6. בהשפעת האינטראקציה ספין-מסילה זרם אלקטרוני בחומר מתפצל לשניים, האלקטרוני ה"צפוניים" סומים כלפי מעלה, וה"דרומיים" כלפי מטה.

מכירים לדאבונם. אבל מה ניתן לעשות בזרם ספין? בספרות המקצועית קיימות הצעות לבניית טרנזיסטורים שפועלים על זרם ספין במקום על זרם חשמלי, אבל עדיין אין לאלה יישומים פועלים. מנגד, אולי עדיין מוקדם מדי לאבד תקווה. הטרנזיסטור החשמלי נבנה לראשונה במעבדה בשנת 1948 (בארצות הברית), אבל מכשיר הרדיו הקטן הראשון הוצג על ידי חברת סוני (ביפן) רק ב-1957, וכולנו מכירים את ההמשך. בינתיים אנו העוסקים במחקר בסיסי נהנים מחקירת נפלאות הספין. ■

נע. המידה שבה ישתנה כיוון זה נקבעת על פי חוזק הצימוד ספין-מסילה, וחוזק זה משתנה מחומר לחומר. למרבה השמחה מתברר כי לעיתים ניתן לשלוט בחוזק הצימוד באמצעות הפעלת שדות חשמליים (כלומר באמצעות מתח חשמלי). עובדה זו יצרה כר נרחב של אפשרויות, במיוחד בתחום ההתקנים הקטנים (התקני ננו). לדוגמה: נניח שאנו מזרימים זרם חשמלי דרך חומר שבו מושרה צימוד ספין-מסילה. הצימוד הזה יגרום לאלקטרוני בעלי ערך אחד של הספין להסתובב כלפי מטה (ראו להלן איור 6), ולא להעלה בעלי הערך ההפוך – להסתובב כלפי מעלה. כך התקבל מגנוט של החומר ללא הפעלת שדה מגנטי.

ועתה, לאחר שפיארתי והיללתי את הספין של האלקטרון ואת יתרונות זרם הספין על פני זרם של מטען חשמלי, נשאר רק לברר אם אכן יש לו גם שימושים מעשיים. לספין עצמו יש חשיבות רבה בתופעות מגנטיות, שאחד השימושים המודרניים שלהן הוא מכשיר ה-MRI, שאותו אחדים מאיתנו

תודות

לסיום, אני מבקשת להודות לשני אנשים שתמכו בי ועודדו אותי כאשר הייתי צעירה וחסרת ניסיון. הראשון הוא מדריכי בבית-דוקטורט, ידידי ועמיתי למחקר במשך שנים רבות, חבר האקדמיה פרופ' יוסף (ג'ו) אמרי ז"ל. השני, ייבדל לחיים ארוכים, הוא פרופ' ריימונד אורבך מהאוניברסיטה של טקסס באוסטין, שאותו הכרתי בספטמבר 1973 כאשר הגיע לאוניברסיטת תל אביב לשנת שבתון ונשאר איתנו, ועימו אשתו וילדיו, במשך המלחמה ואחריה. לא הייתי עומדת כאן לולא אמר ריי כי אם נבצר ממני, אז אם לשלושה תינוקות, לנסוע לתקופה ארוכה, הוא יאפשר לי להשלים את תקופת הבת-דוקטורט טיפין טיפין, חודשיים בכל שנה. וכך היה.