

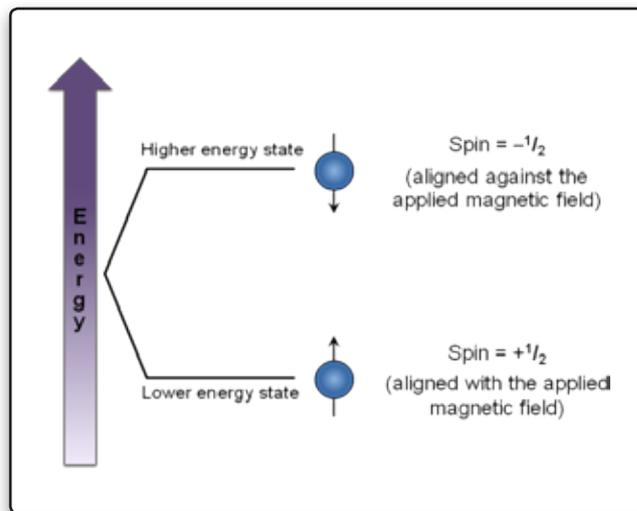
ספינטרוניקה: העתיד כבר כאן

הילה עינתי, נירית קנטור-אוריאל ופרופ' רון נעמן*

שדות מגנטיים חיצוניים משפיעים על ציר הסיבוב של האלקטרון וגורמים לו להסתובב בכיוון מסוים: כאשר האלקטרון לא נמצא תחת השפעה של שדה מגנטי, רמת האנרגיה של הספין מנוונת, כלומר, האנרגיה היא זהה עבור שני ערכי הספין. עם הפעלת שדה מגנטי הסימטריה נשברת, הניוון מוסר, ורמות האנרגיה של מצבי הספין מתפצלות בשל האינטראקציה השונה בין השדה המגנטי ובין המומנט המגנטי של האלקטרון. כתוצאה מהפיצול נוצר הפרש אנרגטי בין הרמות, ואכלוס המצבים ברמות האנרגיה משתנה מאחר שיש העדפה לאיכלוס רמת האנרגיה הנמוכה. רמת אנרגיה גבוהה מתייחסת אל אלקטרונים שכיוון הסיבוב שלהם יוצר שדה מגנטי המתנגד לכיוון השדה המגנטי החיצוני ("ספין מטה").

תחום הספינטרוניקה מקבל בשנים האחרונות תשומת לב רבה בשל הפוטנציאל הטמון בו הן בפיתוח של רכיבים אלקטרוניים מתקדמים והן להבנה של תהליכים ביולוגיים מורכבים. בתחום של אחסון נתונים, ספינטרוניקה כבר הפכה למציאות; אפקט "ההתנגדות המגנטית הענקית" שעל גילויו קיבלו Grünberg ו-Fert פרס נובל ב-2008, משמש בהתקני זיכרון מודרניים. כיום חוקרים רבים עובדים על מערכות שבהן מבנים מגנטיים קטנים משמשים לעיצוב רכיבי ספינטרוניקה מלאים. מחקר אינטנסיבי מתמקד גם ב"ספינטרוניקה אורגנית", כאשר מולקולות אורגניות משמשות כחלק מהרכיב הספינטרוני. העברת אלקטרונים סלקטיבית (רק מעבר של "ספין מעלה" או רק מעבר של "ספין מטה") מזוהה עם חומרים מגנטיים. שימוש בחומרים אלו מהווה אתגר טכנולוגי בשל הקושי לשלב את החומרים במעגלים אלקטרוניים קטנים מאוד ובשל הצורך בהפעלת שדה מגנטי חיצוני.

אלקטרונים משמשים להעברת מידע, לשמירתו ולחישוב. בדרך כלל מנצלים לשם כך את המטען החשמלי של האלקטרונים. אולם לאלקטרונים תכונה נוספת הנקראת ספין והניתנת לתיאור כסיבוב של האלקטרון בדומה לסיבוב. ניתן לחשוב על סיבוב עם כיוון השעון או כנגדו ולתארם כשני מצבי הספין. ספינטרוניקה הנו תחום בננואלקטרוניקה שבו מנסים לבצע את כל הפעולות הנעשות עם מטען האלקטרון וגם עם הספין שלו. הסיבה לכך היא בדרך כלל שכדי למדוד ספין דרושה אנרגיה נמוכה בהרבה מזו הנדרשת למדידת מטען חשמלי. המונח "ספין" (Spin) מגיע ממכניקה קוונטית ומתייחס לתגובה של חלקיק לשדה מגנטי. הספין של האלקטרון הנו בעל ערך של $\pm \frac{1}{2}$. הפיזיקה הקלאסית מגדירה את שני המצבים האלו כ"ספין מעלה" ($+\frac{1}{2}$) ו"ספין מטה" ($-\frac{1}{2}$).



איור 1. פיצול רמות האנרגיה של הספינים בהשפעת שדה מגנטי. ספין הנמצא ברמת אנרגיה נמוכה נקרא "ספין מעלה" ומקבל את הערך $(+\frac{1}{2})$, ואילו ספין בעל אנרגיה גבוהה יותר נקרא "ספין מטה" ומקבל את הערך $(-\frac{1}{2})$.

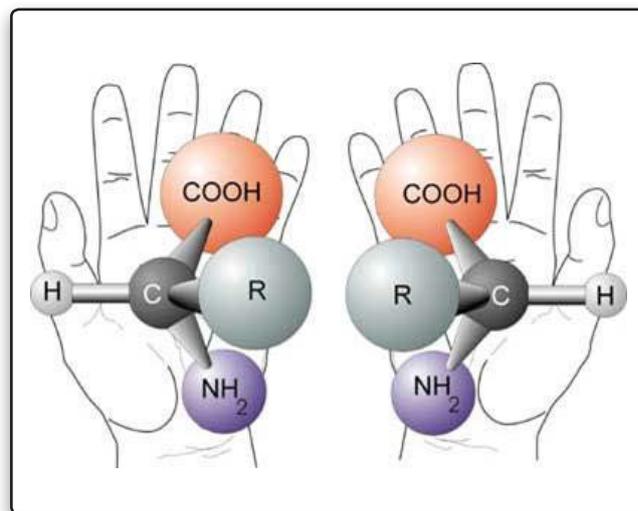
* ד"ר הילה עינתי, נירית קנטור-אוריאל ופרופ' רון נעמן, המחלקה לפיזיקה כימית במכון ויצמן למדע.



בתחום זה התרחשה בשנת 2011 כאשר חוקרים ממכון ויצמן בשיתוף עם קבוצת מחקר במינסטר הראו שמולקולות כיראליות המסודרות על פני משטח יכולות לשמש כסניי ספין בעילות גבוהה מאוד.¹ בעבודה זו אף נקבע המונח סלקטיביות לספין מסוים הנוצרת בעקבות המבנה הכיראלי של המולקולה. אפקט ה-CISS (chiral-induced spin selectivity) effect, כלומר, סלקטיביות לספין מסוים הנוצרת בעקבות המבנה הכיראלי של המולקולה. אפקט ה-CISS מתאר את תנועת האלקטרון לאורך המולקולה הכיראלית. אלקטרון הנע לאורך מולקולה כיראלית חווה את הפוטנציאל האלקטרוסטטי של המולקולה. פוטנציאל זה עוקב אחר המבנה הכיראלי. בעת תנועתו מרגיש האלקטרון שדה מגנטי B^- הפרופורציוני למהירותו. כזכור, מהירות האלקטרון מתארת לא רק את הגודל אלא גם את כיוון התקדמות האלקטרון לאורך המולקולה הכיראלית. איור מס' 3 מתאר את תנועתו של מטען q בעל מצב ספין σ הנע לאורך מולקולה כיראלית. העיגולים הכחולים מתארים את נקודות הפוטנציאל האלקטרוסטטי הכיראלי. ΔZ הנו המרחק לאורך ציר Z בין שתי נקודות פוטנציאל, b הוא המרחק בין שני סיבובים - a -i helical pitch הוא הרדיוס של המולקולה הכיראלית.

כדי להוכיח את תאוריית ה-CISS יש למדוד את מעבר הספין דרך מולקולות כיראליות. ניתן לעשות זאת בעזרת שימוש באור מקוטב מעגלית או בעזרת שדות מגנטיים²⁻⁴. לעתים משתמשים בשילוב של השניים. לאחרונה חקרנו את תכונות העברת הספין של חלבון הבקטריורודופסין, חלבון היושב בתוך ממברנה ומהווה כ-10% ממנה. הבקטריורודופסין מורכב משבעה סלילים בעלי מבנה הליקאלי (helix), שהם כמובן כיראליים. בעת הארת החלבון באור ירוק מתחילה שרשרת תגובות, ובמהלכה משתנה חלוקת המטען ומתרחש מעבר אלקטרוני דרך הבקטריורודופסין. כדי לבחון אם האלקטרוני עוברים עם ספין מסוים, השתמשנו במדידות אלקטרוכימיות בתנאי הארה ובהשפעה של שדה מגנטי הפועל על אלקטרודת ניקל וממגנט אותה. שימוש במגנט משנה את אכלוס המצבים בניקל ומאפשר קבלה או העברה של ספין מסוים. חלקי ממברנה המכילים את הבקטריורודופסין נספחו על ניקל והוכנסו לתא אלקטרוכימי בתמיסה מימית (ראו איור 4). המדידה החשמלית מתבצעת כך שהמתח

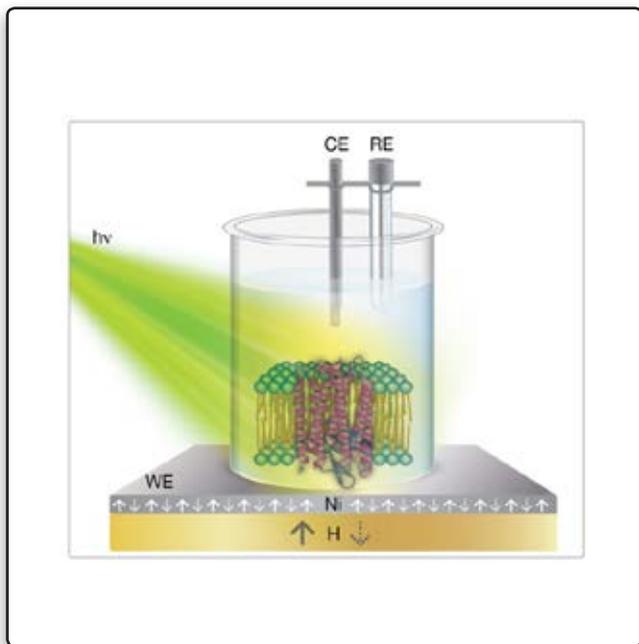
פתרון אפשרי לבעייתיות בשימוש בחומרים מגנטיים הוא השימוש במולקולות אורגניות כיראליות היכולות לשמש כמסנני ספין. מולקולה כיראלית היא מולקולה אשר לא ניתן ליצור חפיפה בינה ובין תמונת הראי שלה באמצעות סיבוב במרחב בשל היעדר סימטריית שיקוף פנימית. שתי מולקולות המהוות תמונת ראי זו של זו, מכונות אננטיומרים. לאננטיומרים תכונות פיזיקליות זהות כגון צפיפות (ראו איור 2), טמפרטורת רתיחה והתכה, וזאת כיוון שהקריטריונים הקובעים את התכונות הפיזיקליות הם זהים (לדוגמה: הקשרים הכימיים, אורכם, מיקומם והזוויות ביניהם). למרות זאת ניתן להבדיל בין שני אננטיומרים באמצעות הפעילות האופטית שלהם. שני אננטיומרים שונים מסיטים את כיוון הקיטוב של האור באותה הזווית בדיוק, אך בכיוון ההפוך. מכיוון שמולקולות ביולוגיות רבות הן כיראליות, ובתהליכים ביולוגיים רבים מעורבות מולקולות כיראליות, מושקע מאמץ רב בהבנה של מעברי המטען והספין דרך מולקולות אלו.



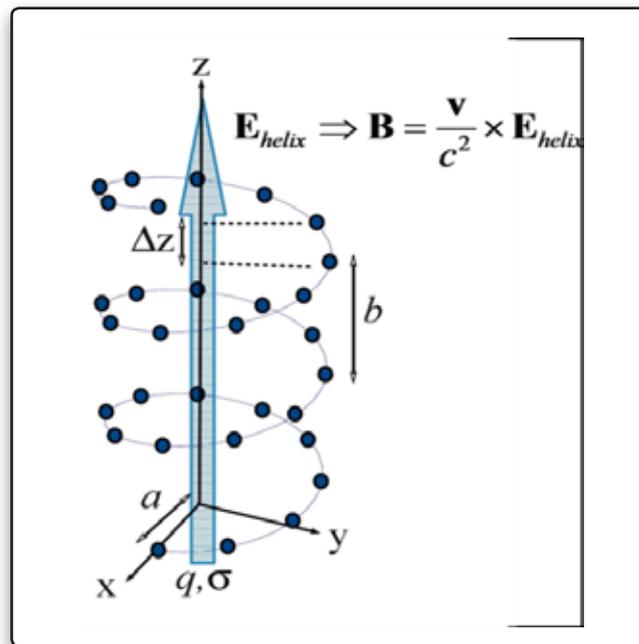
איור 2. שני אננטיומרים של מולקולה כיראלית אשר לא ניתן ליצור חפיפה ביניהן באמצעות סיבוב במרחב.

אפקט ה-CISS

הכיראליות היא דרישה הכרחית ליצירת סלקטיביות של ספין מסוים ללא שדה מגנטי חיצוני. האפקט התגלה כבר ב-1999 על ידי חוקרים במכון ויצמן. אולם פריצת דרך משמעותית



איור 4. תיאור סכמטי של תא אלקטרוכימי המשמש למדידה של מעברי ספין דרך מולקולות בקטריורודופסין.



איור 3. תנועתו של מטען q בעל מצב ספין σ הנע לאורך מולקולה כיראלית. העיגולים הכחולים מתארים את נקודות הפוטנציאל האלקטרוסטטי הכיראלי. Δz הנו המרחק לאורך ציר Z בין שתי נקודות פוטנציאל, b הוא ה- helical pitch a - i הוא הרדיוס של המולקולה הכיראלית.

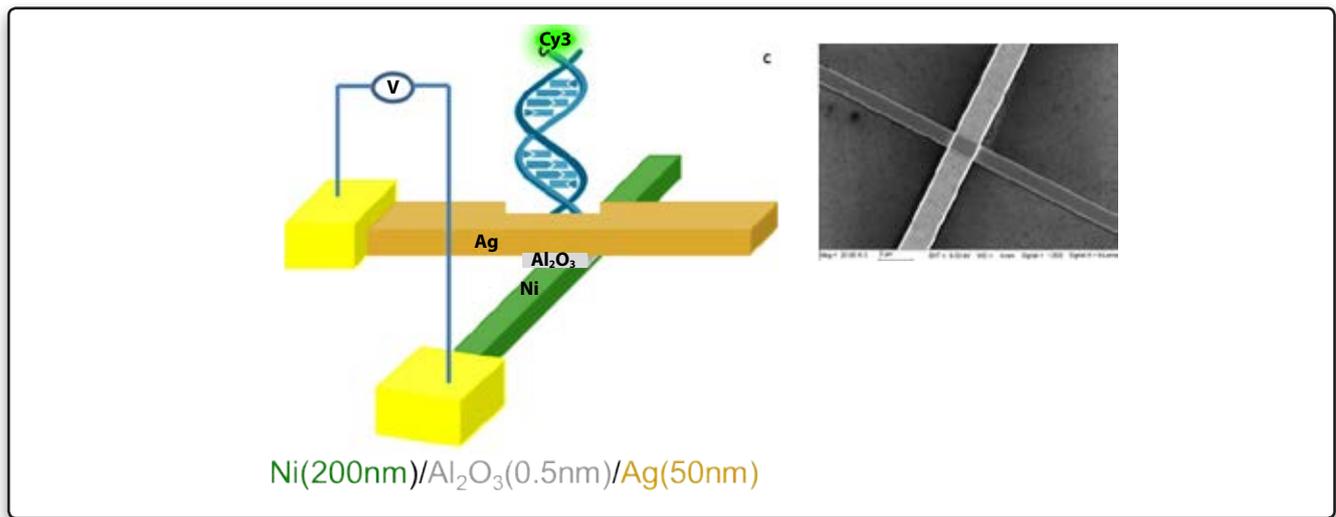
נוספת בעלת צימוד מסלול-ספין נמוך (כסף). על הכסף נספחו מולקולות דנ"א שהן מולקולות כיראליות. על המולקולות הכיראליות נספחו מולקולות צבע (dye) מסוג cy3. כאשר מאירים את מולקולות הצבע באור לייזר, משתחרר אקסיטון (זוג אלקטרון-חור). האלקטרון עובר דרך המולקולות הכיראליות אל הכסף ומשם עובר בתהליך מנהור אל אלקטרודת הניקל. הניסוי התבצע בהשפעה של שדה מגנטי. כלומר, לאחר ההארה, אלקטרון נע מאלקטרודת הכסף דרך הדנ"א אל מולקולת הצבע הנמצאת במצב מעורר. מכיוון שהאלקטרון עובר דרך הדנ"א בעל המבנה הכיראלי, רק ספין אחד עובר ומשאיר אחריו חור בעל ספין מסוים. כעת אלקטרון יעבור מהניקל אל הכסף כדי למלא את מקומו של האלקטרון שעזב, אך הוא יוכל לעבור רק אם ישתחרר מהניקל עם הספין המתאים למילוי החור בכסף. במצב זה ניתן למדוד את המתח הנוצר בין אלקטרודת הניקל לאלקטרודת הכסף.

נסרק והזרם נמדד הלוך וחזור (cyclic voltammetry) בתנאים של חושך והארה ובשני הכיוונים של השדה המגנטי. התוצאות הצפויות מהמדידות האלקטרוכימיות הן שינוי של הזרם המתקבל כתלות בשדה המגנטי וכתלות בהארה. לאחר מדידת הזרם המתקבל בהשפעת השדה המגנטי בכיוונים שונים ניתן לחשב את היכולת של הבקטריורודופסין להעביר ספין מסוים. הסלקטיביות של הספין, S , מתוארת על ידי הנוסחה הבאה:

$$s = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

כאשר I_+ ו- I_- הן הזרמים המתקבלים כאשר הספין נמצא במקביל או לא-במקביל למהירות האלקטרון, בהתאמה.

דוגמה נוספת ניתן למצוא במאמר שפורסם לאחרונה⁵. בעבודה זו פותח התקן המורכב משכבה מגנטית (ניקל), שכבה מבודדת דקה מאוד (אלומינה) ושכבה מתכתית



איור 5. תיאור סכמטי של רכיב אלקטרוני המשמש למדידת מעבר ספין דרך מולקולות דנ"א⁵.

3. Buckley, B. B.; Fuchs, G. D.; Bassett, L. C.; Awschalom, D. D. *Science* 2010, 330, 1212-1215.

4. Kuemmeth, F.; Churchill, H. O. H.; Herring, P. K.; Marcus, C. M. *Mater. Today* 2010, 13, 18-26.

5. Kumar, K. S.; Kantor-Uriel, N.; Mathew, S. P.; Guliamov, R.; Naaman, R. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013, 15, 18357-18362.

לסיכום, ניתן לראות כי אפקט ה-CISS גילה תכונות חדשות של המולקולות הכיראליות ופתח אפשרויות מדעיות וטכנולוגיות רבות הן להבנה בסיסית של תהליכים פיזיקליים וביולוגיים והן לשילובן של מולקולות אלו בהתקנים אלקטרוניים מתקדמים.

מקורות

1. Göhler, B.; Hamelbeck, V.; Markus, T. Z.; Kettner, M.; Hanne, G. F.; Vager, Z.; Naaman, R.; Zacharias, H. *Science* 2011, 331, 894-897.

2. Berezovsky, J.; Mikkelsen, M. H.; Stoltz, N. G.; Coldren, L. a; Awschalom, D. D. *Science* 2008, 320, 349-352.