

איך מכניקת הקוונטים יכולה להשפיע על ניקיון הקרקע?

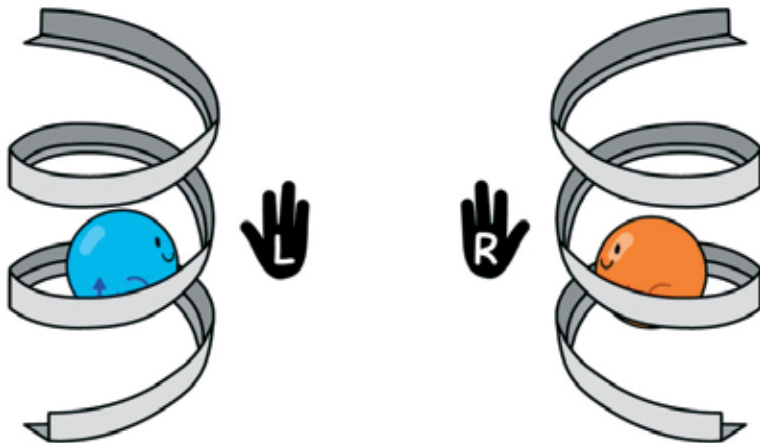
פרופ' רון נעמן, המחלקה לפיזיקה כימית, מכון ויצמן למדע, רחובות

תורת הקוונטים נוצרה בגלל הצורך להסביר תופעות שהתגלו בעקבות ההתפתחות הטכנולוגית והמדעית בסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20. בתקופה זו כבר היו האלקטרונים תופעה מוכרת, ואפילו החלו לעשות בהם שימוש. מודל האטום לפי בוהר שפותח ב-1913 אפשר להבין את הטבלה המחזורית. אולם כבר אז היה ברור שישנן בעיות במודל האטום, למשל, בשאלה כיצד שני אלקטרונים יכולים להיות באותו מסלול. הרי צפוי שהם ידחו זה את זה בגלל מטענם החשמלי הזהה, ולכן לא ייתכן שכל אחד מהם ינוע במסלול כאילו האלקטרון השני אינו קיים. למרבה הפלא עבר יותר מעשור עד שנמצא פתרון לבעיה, וגם פתרון זה לא נמצא בלי ויכוחים. רמז ראשון לפתרון נמצא למעשה על ידי שני מדענים צעירים מליידן בהולנד. המדענים הם סמואל גודסמיט (Samuel Goudsmit) וג'ורג' הולנברג (George Uhlenbeck) שעבדו כסטודנטים תחת הדרכתו של הרנספסט (Paul Ehrenfest). הם הבינו שלאלקטרון חייב להיות תנע זוויתי-ספין, וזאת על מנת להסביר את ספקטרום הבלעיה של אטום המימן. זה קרה ב-1925. התנע הזוויתי יכול להיות בעל סימן חיובי או שלילי. התנע הזוויתי מלווה בשדה מגנטי שפונה לכיוון אחד או לכיוון הפוך לפי כיוון הספין. ב-1928 הבין דירק (Dirac) שהספין הוא דרגת חופש נוספת של האלקטרון שנובעת ממשוואה המשלבת בין תורת הקוונטים ובין תורת היחסות. משוואת דירק שילבה סופית את ה"ספין" בתורת הקוונטים.

למרות "כניסתו" המאוחרת של הספין לזירה הקוונטית, התרומה שלו מכרעת להבנת עולמנו. מבנה האטומים, הקשר הכימי ומגנטיות - כולם מבוססים על קיום הספין. שני אלקטרונים יכולים לאכלס אותו מצב קוונטי רק בגלל שיש להם ספינים הפוכים (עיקרון פאולי). מעניין שפאולי לא אהב כלל את רעיון הספין בתחילת דרכו... לצורך ענייננו חשוב להדגיש את חשיבותו הרבה של עיקרון פאולי, כדי שיווצר קשר כימי, שני האלקטרונים המעורבים בקשר חייבים להיות עם ספינים הפוכים. כיוון שהספין של האלקטרון גורם לו להיות בעל תכונות מגנטיות, הרי חומר שבו אלקטרונים רבים מסודרים כך שהספינים שלהם פונים לאותו כיוון, הוא חומר מגנטי.

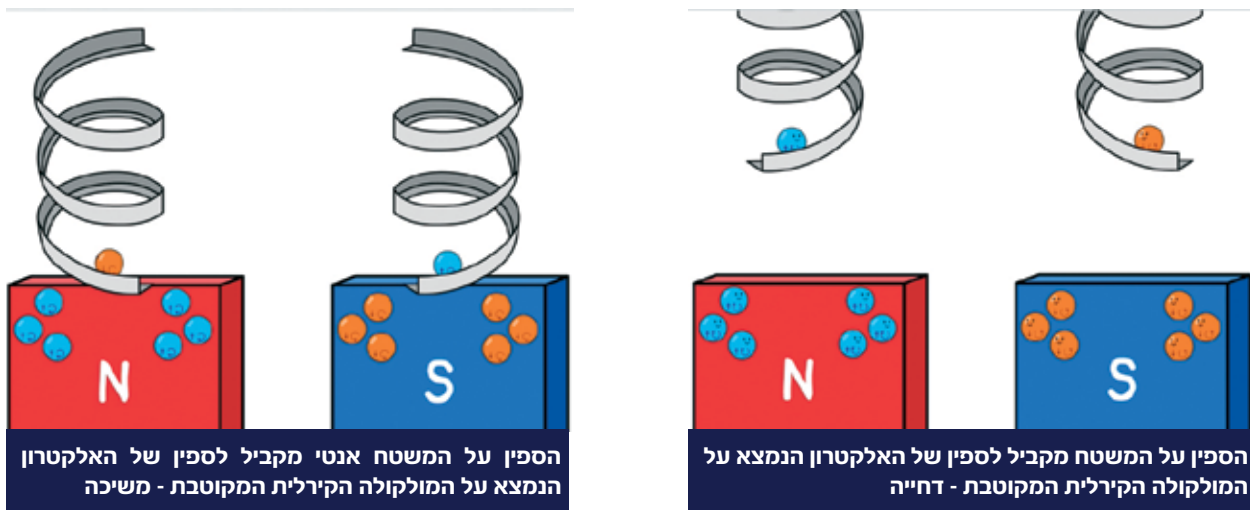
לפני כשני עשורים גילינו תופעה לא צפויה. ראינו שהמעבר של אלקטרון דרך מולקולה קירלית תלוי בספין של האלקטרון. מולקולות קירליות הן מולקולות ללא סימטריה של ראי. בדומה לסימטריה של יד או בדומה לסליל שיכול להיות סליל ימני או שמאלי. כך גם מולקולות קירליות קיימות או עם סימטריה של יד ימין או של יד שמאל. תכונה זו חשובה כיוון שהתברר שבטבע מולקולות חשובות כמו DNA וחלבונים מופיעות תמיד עם סימטריה קירלית אחת. כיוון שבטבע מולקולות הן בעלות סימטריה מסוימת, חשוב שלתרופות תהיה אותה סימטריה על מנת שהתרופה תגיב נכון עם החומרים שבגוף. הבעיה היא שבייצור תרופות נוצרות מולקולות עם שתי תכונות הסימטריה, ולכן יש צורך להפרידן. כך גם כשמדובר בחומרי הדברה. החומר בעל הקירליות הלא נכונה אינו נספג בצמח ולכן נשאר בקרקע ומזהם אותה. התברר לנו שכאשר האלקטרון נע דרך מולקולה קירלית, הוא מרגיש כאילו פועל עליו מגנט, וכתוצאה מכך כיוון של ספין אחד עדיף על הכיוון השני. איזה כיוון עדיף תלוי בקירליות (שמאלית או ימנית) ובכיוון מעבר האלקטרון. החלטנו להשתמש בתכונה זו על מנת להפריד תערובת של מולקולות קירליות ועל מנת לקבל מולקולה קירלית מסוג אחד.

כאשר מולקולה מתקרבת למשטח, האלקטרונים בתוכה מתארגנים מחדש כך שנוצר דיפול חשמלי. נוכחנו שכאשר המולקולה היא קירלית, הדיפול החשמלי מלווה בכך שבכל אחד מקטביו יש אלקטרון עם ספין לכיוון מסוים, כך שלכל קוטב יש ספין אחר. איזה ספין נמצא לידי כל קוטב תלוי בקירליות של המולקולה, כלומר, אם היא דומה לסליל ימני או לסליל שמאלי. אם המשטח שאליו מתקרבת המולקולה הוא מגנטי, כך שהאלקטרונים בו מכוונים כולם לכיוון אחד, אזי תיתכנה שתי אפשרויות: הספין של האלקטרון הנמצא על המולקולה וקרוב לשטח הוא מקביל לספינים של המשטח, או שהספין הוא אנטי מקביל. במקרה הראשון האינטראקציה עם המשטח תהיה חלשה יותר מאשר במקרה השני.



כאשר אלקטרון עובר במולקולה קירלית, קיימת העדפה לאלקטרון בעל ספין מסוים על פני אלקטרון בעל ספין הפוך

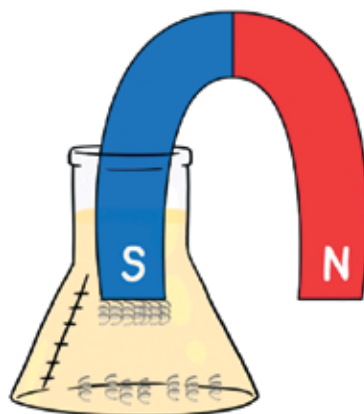
* הסרטון והתמונות באדיבות פרופ' רון נעמן



הספין על המשטח אנטי מקביל לספין של האלקטרון הנמצא על המולקולה הקירלית המקוטבת - משיכה

הספין על המשטח מקביל לספין של האלקטרון הנמצא על המולקולה הקירלית המקוטבת - דחייה

כיוון שכיוון הספין נקבע על ידי הקירליות של המולקולה, הרי ניתן להפריד בין מולקולות עם קירליות ימנית או שמאלית בעזרת משטח מגנטי. כך ניתן לייצר תרופות וחומרי הדברה עם קירליות שמתאימה למערכות ביולוגיות.



אם תמיסה מכילה שני אננטיומרים של חומר קירלי מסוים, אפשר להפרידם בעזרת משטח מגנטי שמושך רק את אחד האננטיומרים

החשיבות של תרופות בעלות קירליות מוגדרת היא בכך שהקירליות ההפוכה עשויה לגרום לתופעות לוואי, חלקן קשות ביותר. גם ניקיון קירלי של חומרי הדברה הוא בעל חשיבות כיוון שחומרים בעלי קירליות אחת נספגים על ידי הצמח בעוד שחומרים עם הקירליות ההפוכה נשארים בקרקע ומזהמים אותה.

כך ניתן לראות איך שימוש במכניקת הקוונטים יכול לשפר תרופות ולסייע בשמירה על הסביבה.

תוכלו לראות את ההסבר על מחקר זה גם [בסרטון האנימציה](https://www.youtube.com/watch?v=...)¹ שממנו נלקחו האיורים למאמר זה. כדי לראות את הסרטון יש להקליד את הסיסמה CISS.

ביבליוגרפיה

1. <http://science.sciencemag.org/content/early/2018/05/09/science.aar4265>
2. <https://www.hayadan.org.il/1105189-createing-pure-medicines-with-fewer-side-effects>
3. <https://cen.acs.org/analytical-chemistry/separations/Magnetic-fields-fish-enantiomers/96/i20>

¹ <https://vimeo.com/257954972>