



מצבי הצבירה של החומר. מתוך אתר פרס נובל

פיזיקאים ברחבי העולם, תיאורטיקנים ונסיינים כאחד, מחפשים טכניקות חדשות לגלות ולתאר תופעות לא ידועות בטבע, ביניהם מצבי צבירה חדשים. במעבדה של פרופ' רונן רפפורט, ראש החוג במכון רקח לפיזיקה ושותף במרכז לאינפורמציה קוונטית באוניברסיטה העברית, יחד עם חוקרים נוספים מאוסטריה וגרמניה, הראו שבעזרת אקסטינונים (סוג של דמויי חלקיקים) באינטראקציה חזקה ניתן לחקור מערכות רב גופיות ובעזרתם לחזות בעתיד במצבי צבירה חדשים. מאמר בנושא פורסם לאחרונה בכתב העת "Physical Review X".

מלבד ארבעת מצבי הצבירה הידועים (גז, נוזל, מוצק ופלזמה) מופיעים בטבע תחת תנאים קיצוניים בטמפרטורות נמוכות מצבי צבירה נוספים כמו על-נוזל ועל-מוליך. אלו תופעות שהתגלו בעבר בזכות תורת הקוונטים ונחזו במעבדות רבות בעולם. מצבי ה"על" ייחודיים משום שהם נוצרים בטמפרטורות נמוכות מאוד (קרוב לאפס המוחלט, -273 מעלות צלזיוס) ומאפשרים לאנרגיה לזרום דרכם ללא אובדן. על-מוליך, למשל, משמש במגוון טכנולוגיות כמו ב-MRI, במערכות חישה ובמאיצים גדולים בעולם.

המחקר של פרופ' רפפורט ושותפיו הראה שניתן לגרום לאלקטרונים הנעים בתוך מבנה שכבתי של חומר, כל שכבה בעובי של אטומים בודדים בלבד, ליצר תגובה הדדית לא טריוויאלית: בעוד שאלקטרונים הם כולם בעלי מטען שלילי ולכן תמיד דוחים זה את זה חשמלית, במערכת החדשה הצליחו החוקרים להראות שאפשר לגרום לאלקטרונים גם למשוך אחד את השני, בניגוד לאינטואיציה הרגילה. שילוב כזה של כוחות משיכה ודחייה בין האלקטרונים עשויה בעתיד לסייע ביצירת על-מוצק אלקטרוני. עדויות לקיום על-מוצק נצפו ניסיונית רק לאחרונה במעבדות באיטליה וגרמניה בניסויים מורכבים בגזים של אטומים קרים קרוב לאפס המוחלט. מצב הצבירה על-מוצק נחשב מצב אקזוטי מאוד מכיוון שהחלקיקים המרכיבים אותו מסודרים במבנה מחזורי יציב מצד אחד אבל יכולים לזרום ממקום למקום בתוך החומר כמו על-נוזל. בדומה למצבי צבירה ממשפחת ה"על", אנרגיה לא אובדת בעל-נוזל משום שהוא חסר צמיגות. לשם המחשה, אם זרימת מערבולת תיווצר בתוכו, היא תימשך לעולם. הדרך החדשה של פרופ' רונן רפפורט ושותפיו מבטיחה כיוון שהיא תאפשר לחוקרים ולמהנדסים ליצור את ה"על-מוצק" בתוך שבבים המשמשים כיום בטכנולוגיות העילית במקום במערכות מסובכות של גזים אטומיים, ובטמפרטורות גבוהות בהרבה ממה שהחוקרים

שקדמו להם עבדו עמן (פי מיליון לפחות). בעתיד מצבי ה"על" יאפשרו חיסכון באנרגיה חשמלית, יאפשרו בניית סוללות חזקות וימנעו זיהום אוויר מיותר.

פרופ' רפפורט מצוין בהקשר זה כי: "כחוקר, העבודה הזאת מרגשת אותי מאוד. זהו פרויקט שהתחיל כרעיון תיאורטי שלנו שלא היינו בטוחים שהוא ישים כלל, ולאחר כמה שנים הצלחנו לחזות בתופעה חדשה שכבר עכשיו איננו מבינים אותה תיאורטית עד הסוף. אני מאמין שזו רק התחלה לגילוי עושר של תופעות אקזוטיות שעדיין 'מתחבאות' בחומר זה".

על-מוצק שנוצר לזמן קצר

רפפורט: "יש לנו את התשתית הלא טריוויאלית לחלוטין להתחיל להסתכל על תופעות אקזוטיות במערכות מרובות חלקיקים. לפני מספר שנים היו כבר מדענים שגילו לכאורה את התופעה בהליום נוזלי בטמפרטורה הקרובה לאפס המוחלט אבל אז הסתבר שזו היתה תופעה אחרת. "

"השנה יש כבר עדויות אודות על-מוצק שנוצר לזמן קצר, במערכת אטומית, אך בטמפרטורות קרות מאוד מאוד. אחת התכונות הנדרשות מהמצבים הקוונטים של על-מוצק היא שחלקיקים יוצרים אינטראקציות לא איזוטרופיות הכוללות גם משיכה וגם דחייה. זוהי פאזה מאוד מעניינת, ואנחנו עשינו צעד משמעותי בכיוון של בניית מערכת מלאכותית שבה ניתן יהיה להגיע למצב זה. מדובר בשבב מוליך למחצה, אותם חומרים שבונים איתם לייזרים, דיודות ורכיבים אופטיים ואלקטרוניים אחרים. בשבב אנחנו מייצרים "אטומים מלאכותיים" – אלו למעשה אלקטרונים מעוררים. אנחנו מזרימים אנרגיה לתוך השבב והאנרגיה הזו מעוררת את האלקטרונים ממצב היסוד שלהם למצב יותר מעורר, ובמסגרת המצב הזה הם מייצרים מעין קוואזי אטומים המכונים אקזיטונים (Excitons) – מהמילה אקזיטציה (עירור)."

"המערכת המתקבלת מכונה מצב קוואזי חלקיקי, כלומר – עירור רב חלקיקי של הרבה אלקטרונים, אך הוא מתנהג באופן מעשי כמו אטום. זה לא אטום אמיתי, אלא אלקטרונים של אטומים שנמצאים בתוך החומר אבל למעשה נוצר ענן של חלקיקים אלקטרונים כשכל אחד מהם מתנהג כמו אטום. למערכת זו הבדלים משמעותיים בהשוואה לאטומים אמיתיים כי החלקיקים בה הרבה יותר קלים – המסה הרבה יותר קטנה, מה שאומר שהם גם הרבה יותר גדולים. הגודל שלהם הוא בערך פי מאה מגודל אטום רגיל והמסה שלהם קטנה פי כמה אלפים. הם מגיעים למצב על-נוזלי – כלומר, עיבוי בטמפרטורות יותר גבוהות. במקום להגיע לטווח טמפרטורות של ננו קלווין אנחנו מסוגלים להגיע לטמפרטורה של 1-2 מעלות קלווין. זו עדיין טמפרטורה נמוכה מאוד, אבל הרבה פחות מאשר שברי מעלה מעל האפס המוחלט. אני מעריך שיהיה צורך לנסות חומרים שונים, ואולי יהיו כאלה שיוכלו להפגין את התופעה אפילו בטמפרטורת החדר."

"זה עדיין בסדר גודל יותר חמים, יחסית, והרבה יותר פשוט מאטומים אמתיים – האינטראקציות הרבה יותר חזקות, ובנוסף, אנחנו גם מסוגלים לדחוס אותם במידה רבה, מצב שבו מתחילות להתגלות תופעות שאי אפשר לראות עם אטומים."

פאזה אקזוטית

"על-מוצק זו פאזה אקזוטית. בדרך כלל אנחנו רגילים לפאזה של חומר גבישי, כלומר האטומים מסודרים. אם אני יודע איפה נמצא אטום אחד אני יכול לדעת איפה כל האחרים והחלקיקים מסודרים בסימטריה מסוימת. מצד שני, יש לנו עוד פאזה שהיא הפאזה העל-נוזלית. חלקיקים על-נוזליים נמצאים במצב הפוך – כאשר מקררים את הגז הליום לטמפרטורה נמוכה מקבלים על-נוזל. החלקיקים מאבדים את הסידור המרחבי המדויק שלהם ומתקבל חומר אחיד – החלקיקים יכולים לזרום כמו נוזל. קוראים לזה על-נוזל כי הוא יכול לזרום ללא חיכוך, מה שלא קיים במצב נוזלי רגיל."

"על-מוצק – זו פאזה לא אינטואיטיבית כי זה שילוב של שניהם ביחד. מצד אחד היא שוברת את הסימטריה ומסתדרת במעין גביש, אבל בגביש על פניו שום דבר לא זורם – זה חומר מוצק והחלקיקים בתוכו לא זזים."

"האטומים מסתדרים במרחב, אבל מצד שני יש זרימה בתוך המוצק. לדוגמה, אם יש פגמים במוצק, למשל אם במקום מסוים (עמדה 157, לדוגמה) חסר אטום, אזי אנו מקבלים שריג שבתוכו יש פגמים. בעל-מוצק הפגמים הללו יכולים לנוע בתוך הגביש כמו חלקיק שזורם מאחר והפגמים הללו אינם נתקלים בכל התנגדות (חיכוך). כאשר פגם עובר מעמדה 157 לעמדה 158 זה אומר שאטום שהיה בעמדה ה-158 זז לעמדה ה-157. המצב הזה שבו הפגמים יכולים לנוע ללא חיכוך משמעותו שיש אטומים במוצק הזה שיכולים לנוע ללא כל התנגדות. האטומים שזזים מתקדמים כמו בנוזל ומקבלים חומר שהוא מסודר ושובר את הסימטריה, מצב שאינו מתקיים בנוזל רגיל, אבל עדיין יש חוסר אחידות מבחינת המיקום."

"מה שהצלחנו לעשות זה לייצר את האטומים המלאכותיים הללו ולהראות שיש לנו את התנאים הבסיסיים שיכולים לאפשר בעתיד – בשנים הקרובות – תצפיות בתופעות קוונטיות כמו על-מוצקים. רצינו שתהיה אינטראקציה לא טריוויאלית, הכוללת גם דחייה וגם משיכה, בין החלקיקים, ואת זה הצלחנו לעשות באמצעות שכבות דקות של אלקטרונים שיש בהם יחסי-גומלין חשמליים."

{loadposition content-related}