

נועם גרוס ולב חייקוביץ
תצלומים: נועם גרוס

המקום הקר ביותר ביקום

עם קרן לייזר - כמעט עד האפס המוחלט

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

מהי טמפרטורה?

מה יקרה אם נכניס לחדר אחד חפצים בעלי טמפרטורות שונות? מניסיון אנו יודעים, שהחפצים החמים יותר יתקררו והקרים יתחממו עד שיווצר שיווי משקל – קרי: עד שהטמפרטורות שלהם ישתוו. טמפרטורת הגופים מצביעה על כיוון זרימת החום ביניהם, מהגוף החם לגוף הקר. אך מהי משמעות הטמפרטורה בגז חלקיקים ברמה המיקרוסקופית? במילים אחרות, מה ההבדל בין חלקיקים חמים לחלקיקים קרים? התשובה בקצרה – מהירות התנועה שלהם שונה. חלקיקים חמים נעים מהר יותר מחלקיקים קרים, ולכן האנרגיה הקינטית שלהם (האנרגיה שיש להם מתוקף היותם בתנועה) תהיה גדולה יותר. כדי לסבר את האוזן, הנה מעט מספרים: מולקולות חנקן, N_2 , המהוות את המרכיב העיקרי באוויר, נעות בטמפרטורת החדר ($25^{\circ}C$) במהירות ממוצעת של כ-500 מטרים לשנייה. יותר ממהירות הקול! באנטארקטיקה הטמפרטורות צונחות בחורף עד לכדי $70^{\circ}C$ -. שם נעות מולקולות החנקן במהירות ממוצעת של כ-200 מטרים לשנייה בלבד.

טמפרטורה היא גודל מאקרוסקופי, כלומר, היא אינה מוגדרת עבור חלקיק בודד, אלא רק עבור מספר רב של חלקיקים. המדחום בחדר מראה $25^{\circ}C$, אך מהירות המולקולות המרכיבות את האוויר רחוקה מלהיות אחידה: המולקולות נעות לכיוונים שונים ובמהירויות שונות. לרוב, ההתייחסות למהירות הממוצעת של החלקיקים כמדד לטמפרטורה תהיה נכונה. עם זאת, לא תמיד יהיה אומדן זה מתאים. למשל: תארו בדמיונכם שולחן ביליארד שעליו נעים כדורים בלא חיכוך במהירויות שונות, ומתנגשים בלא הרף זה בזה ובדפנות. תנועת הכדורים על השולחן היא דו-ממדית, אך מבחינתנו זהו מודל טוב לגז אטומים, כאשר כל כדור מייצג אטום.

השנה היא 1924. קיץ. אלברט איינשטיין, חתן פרס נובל לפיזיקה ואישיות ידועה כבר באותם הימים, מקבל מכתב, חריג בתוכנו, מאת חוקר הודי אלמוני בשם סטיינדרה נת בוזא (Satyendra Nath Bose). "מצורף למכתב מאמר פרי עטי", הוא כותב ומבקש, "קרא אותו, ואם אתה מסכים עם התיאוריה המפורטת בו, פרסמו!". לטענת בוזא, הוא לא הצליח לשכנע את עורכי המגזין המדעי שאליו פנה בצדקת התיאוריה. אמונתו בה היתה כה רבה, עד שלא היסס לפנות לפיזיקאי המפורסם.

איינשטיין קרא, התרשם מאוד וניצל את השפעתו כדי לפרסם את המאמר. אך הוא לא עצר כאן, ופרסם מיד עוד שני מאמרים המרחיבים את התיאוריה וחוזים את היווצרותה של תופעה אשר לימים תיחשב לגביע הקדוש של הפיזיקה המודרנית. תופעה זו תיקרא על שם שני החוקרים "Bose-Einstein Condensation" – "עיבוי בוזא-איינשטיין". בחיפושם אחריה, יצאו פיזיקאים ברחבי העולם למירוץ עיקש, שבו ניסו לקרר גז אטומים לטמפרטורה הנמוכה ביותר. המירוץ הסתיים רק 70 שנה מאוחר יותר, ב-1995.

תחום האטומים הקרים הולך ומתפתח, והיה לנדבך חשוב במחקרים המשתמשים במדידות מדויקות של זמן (שעונים אטומיים) וקבועי טבע. יתרה מזו, אטומים קרים משמשים כמצע מצויין לבדיקת תופעות פיזיקליות הצפויות לפי מכניקת הקוונטים. אטומים כגון רובידיום, נתרן, ליתיום ועוד כבר הפכו למושא מחקר במעבדות רבות בעולם. ארבע מהמעבדות ממוקמות בישראל: בטכניון, במכון ויצמן למדע, באוניברסיטת בן-גוריון בנגב והמעבדה שלנו – באוניברסיטת בר-אילן.

במאמר זה נסקור בקצרה את התחום ונספר על הנעשה במעבדתנו.

1. אטומים אלה שייכים כולם לקבוצת היסודות האלקליים; מכיוון שמבנה רמות האנרגיה שלהם פשוט יחסית, בזכות האלקטרון הבודד בקליפה החיצונית, קל יחסית לבצע בהם קירור על-ידי לייזר, המתבסס על המעברים בין הרמות השונות. אך כיום כבר מקררים גם אטומים שאינם אלקליים, כגון כרום.



קירור באמצעות לייזר – היסטוריה

בשנת 1905 זעזע איינשטיין את עולם הפיזיקה כאשר העלה מחדש טיעון ישן, כי האור מורכב מחלקיקים. הרעיון עורר התנגדות רבה מאוד בקהילה המדעית, ובמידה של צדק: ניסויים רבים, כגון התאבכות ועקיפה, כבר ביססו את התיאוריה שהאור הוא גל אלקטרומגנטי. הטענה החדשה עמדה כביכול בסתירה למה שהיה ידוע עד אז. אך לא לדעת איינשטיין. הוא הסביר כי האור יכול להיות גם חלקיק וגם גל בו-זמנית. העולם היה צריך כמה שנים כדי לעכל את הטענה המהפכנית, אך זיכה על כך את הפיזיקאי בפרס נובל ב-1921. היום, כל תלמיד פיזיקה מתחיל מכיר את עיקרון השניות (דואליות) גל/חלקיק, העומד במרכזה של מכניקת הקוונטים.

חלקיקי האור, הנקראים פוטונים, הם חסרי מסה, אך יש להם תנע (גודל פיזיקלי המצייין כי נדרש כוח על מנת לעצור את החלקיק). לכל פוטון יש גם אנרגיה התלויה בתדר הגל האלקטרומגנטי שהוא חלק ממנו. מבלבל? בצדק. נחזור על כך שוב: הפוטון הוא גם חלקיק בעל אנרגיה ותנע מסוימים, וגם חלק מגל, ולכן מוגדר על-ידי התדר שלו. ככל שתדר הגל גבוה יותר, אנרגיית הפוטון והתנע שלו גדולים יותר. נראה שבאמת היה צריך מדען מסדר הגודל של איינשטיין על מנת להעלות רעיון כה מהפכני.

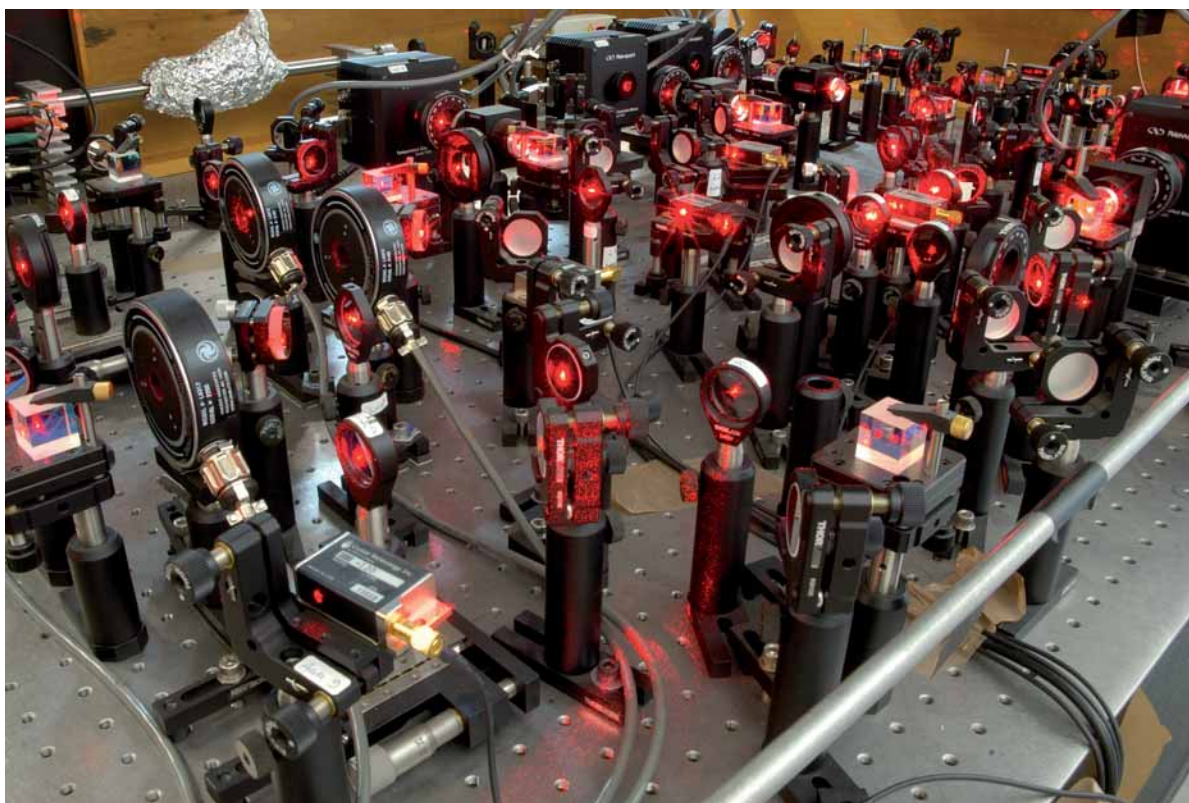
מעניינת במיוחד האינטראקציה בין חלקיקי האור לחלקיקי החומר. לאטום יש יכולת "לבלוע" פוטונים, בתנאי שהאנרגיה שלהם מתאימה לאנרגיית מעבר פנימית שלו, קרי: אנרגיה ה"מקפצה" אלקטרון השייך לו ממסלול אחד סביב גרעין האטום למסלול אחר, רחוק יותר. מכיוון שהמסלולים מוגדרים היטב, האנרגיות המתאימות למעברים אלו הן בדידות. כאשר יש התאמה, נהוג לומר כי האור נמצא בתהודה (רזוננס) עם האטום. כאשר האטום "בולע" פוטון הוא מספח אליו לא רק את האנרגיה, אלא גם את התנע של חלקיק האור. לאחר פרק זמן מסוים (זמן החיים של האלקטרון במסלול הרחוק), "ייפול" האלקטרון חזרה למסלול קרוב יותר, והאטום יפלוט את האנרגיה שהשתחררה כפוטון בכיוון אקראי.

כפי שציינו, הטמפרטורה על השולחן מוגדרת לפי המהירות הממוצעת של הכדורים הנעים עליו (ליתר דיוק, ממוצע המהירות בריבוע). בהינתן שני שולחנות, נוכל לדעת בקלות באיזה מהם הכדורים יותר "חמים", וזה לפי מהירות התנועה שלהם. אך מה יקרה אם נציב את אחד השולחנות על רכבת מהירה, בעוד האחר יישאר על הרציף? למהירות הכדורים בשולחן הראשון נוספה מהירות הרכבת. האם בשל כך עלתה הטמפרטורה שלהם? התשובה היא לא. אפשר להוכיח זאת בקלות על פי עקרון היחסות, שהרי צופה על הרכבת יכול לטעון באותה המידה שדווקא הכדורים שעל הרציף הם המהירים יותר. ואף זאת: כדור-הארץ אמנם נע סביב השמש במהירות של כ-100,000 קמ"ש, אך ברור שאין לכך כל השפעה על הטמפרטורה בכוכב-הלכת שלנו, שאם לא כן היינו כולנו בצרה צרורה. נראה כי ההגדרה הקושרת את הטמפרטורה רק עם המהירות הממוצעת של החלקיקים אינה מספיק מדויקת. אכן, הגדרה זו נכונה רק בתנאי שמדידת המהירויות מתייחסת למערכת שבה מרכז המסה של החלקיקים ניח, ולפיכך המדידה חייבת להתבצע כאשר אנו עומדים במנוחה ליד השולחן ולא כאשר הוא נע במהירות ביחס אלינו.

ומעט על קירור. אם נרצה לקרר פחית משקה ביום חם, נוכל להכניסה לדלי מי קרח. דרך מקובלת לקירור בתנאי מעבדה היא באמצעות חנקן נוזלי, שטמפרטורת הרתיחה שלו היא 196°C - והוא קל לשימוש ואינו יקר. חומר שיבוא איתו במגע יתקרר לטמפרטורה זו. אבל זה לא מספיק קר לצרכינו. טמפרטורת החנקן פשוט אינה נמוכה דיה למחקר באטומים קרים. יתרה מזו, גם הטמפרטורה במקום הקר ביותר המוכר לנו בטבע, החלל החיצון, אינה נמוכה דיה. הטמפרטורה שם היא 270.45°C - , רק 2.7 מעלות מעל האפס המוחלט או, בשפת הפיזיקאים, 2.7 מעלות קלווין². אז כמה קר זה מספיק קר בשבילנו, חוקרי האטומים הקרים? ובכן, כדי להגיע לתופעות המעניינות (שנתאר בהמשך), האטומים צריכים להיות מקוררים לטמפרטורה קרה פי 10 מיליון מזו שבחלל! אין סביבה קרה כזו ביקום כולו, ומכאן הצורך בשיטה מיוחדת. פתרון הגיע מכיוון בלתי צפוי – לייזר.

2. סולם קלווין הוא סולם "הטמפרטורות המוחלטות". אפס קלווין (לערך 273.15°C) הוא האפס המוחלט – הטמפרטורה שבה האטומים "נעצרים".

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



תמונה 1 מקצת הלייזרים המשמשים אותנו בניסוי

המפגש החזיתי יאטו האטומים, וטמפרטורת הגז תרד. לשם כך נחוצה שיטה שתמיין את האטומים לפי מהירותם. במילים אחרות, אנו רוצים שהאור שנקרין "יתקשר" רק עם אטומים הנעים במהירות מסוימת לקראתו, ויהיה "שקוף" לאטומים במהירויות אחרות, כאלו המתרחקים ממנו. הלייזר הוא מועמד טבעי לצרכים אלו. יתרונו העיקרי בכך שהוא מייצר קרן חד-צבעית (מונו-כרומטית) חזקה, שהתדר שלה ניתן לכוונון עדין באמצעים שונים. בזכות תכונה זו אפשר "לייצר" פוטונים רבים בתדר מסוים מאוד, הנמצא בתהודה עם האטומים. אור רגיל, לעומת זאת, גם בהספק גבוה, הוא בעל ספקטרום תדרים רחב, ולכן רק חלק קטן מאוד מהפוטונים שהוא מייצר יהיו בתהודה, ואילו

ב-1975 הוצע לראשונה כי תהליך בליעה ופליטה של פוטונים באטומים יכול לשמש לקירורם. העיקרון הוא כדלקמן: אם, טרם המפגש ביניהם, האטום והפוטון נעים זה לקראת זה, אזי תנועת האטום תואט כתוצאה מהסיפוח. באותה מידה, האטום יאיץ אם הפוטון, הנע במהירות האור, "יפגע בו מאחור". הדבר דומה לרכיבה על אופניים עם כיוון הרוח אונגדה. הרכב בדוגמה זו הוא האטום, והרוח היא שטף הפוטונים הפוגעים בו. כאשר נכוון קרן אור בתדר המתאים לתוך גז אטומים הנעים בכיוונים שונים, חלק מהאטומים יאטו, בעוד אחרים יאיצו, אך המהירות הממוצעת לא תשתנה בהרבה. כדי לקרר את הגז עלינו ליצור מצב שבו פוטונים ייבלעו רק באטומים הבאים לקראתם. בעקבות

שאר הפוטונים יהיו חסרי תועלת מבחינתנו. מאז שנת 1985, שבה דווח לראשונה על ניסוי מוצלח בקירור אטומים, פותחו שיטות רבות לקירור באמצעות לייזר. נתאר כאן שלושה שלבים של קירור שאותם עוברים האטומים במעבדתנו בדרך לטמפרטורה הסופית שלהם. שני השלבים הראשונים מבוססים על עקרון הבליעה והפליטה של פוטונים. גם בשלב השלישי והאחרון יש שימוש בלייזר, אם כי בצורה עקיפה. אנו משתמשים במעבדה במערך של שישה לייזרים בעלי הספקים ותדרים שונים.

שלב ראשון – קירור במאט-זימן

בחרנו לקרר את אטום הליתיום (${}^7\text{Li}$). זהו אטום קל (שלישי בטבלה המחזורית), מתכת מוצקה בטמפרטורת החדר. הליתיום הוא חומר פעיל מאוד מבחינה כימית, ולכן מן ההכרח להחזיקו בוואקום או בסביבת גזים ניטרליים (כגון ארגון). עם כל המגרעות, יש לליתיום תכונה אחת ההופכת את העבודה איתו למתגמלת ביותר. על תכונה זו נעמוד בהמשך. אנו זקוקים לליתיום במצב גזי על מנת לקררו; לשם כך אנו מחממים אותו. כן, זו לא טעות. הקירור מתחיל בחימום! מחממים את הליתיום לטמפרטורה של 450°C , הרבה מעבר לטמפרטורת ההתכה שלו, על מנת לנדף חלק מהנוזל לגז בתוך חלל התנור. בטמפרטורה זו, מהירות האטומים הממוצעת היא כ-1.6 ק"מ לשנייה, בהחלט לא תנאי התחלה אידאליים כשהמטרה היא להאט.

מערכת הקירור שלנו בנויה כצינור חלול ארוך וישר, שבקצהו האחד ממוקם התנור, ובחללה שורר ואקום גבוה מאוד (10^{-11} טור <). בתנאי לחץ נמוכים אלו, תנועת האטומים היא בליסטית (לאמור, הם נעים בקו ישר כל עוד אינם מתנגשים בקיר). התנור מחובר אל שאר חלקי המערכת בשני צמצמים. אטומים המצליחים לעבור דרך שניהם במעוף אחד יוצרים אלומת חלקיקים דקה, מעין שטף אטומים הנע מהתנור והלאה לאורך הצינור. מנגד לתנור, בקצה האחר של

המערכת, ממוקם חלון שדרכו נכנסת אלומת לייזר חזקה הפוגשת חזיתית את אלומת האטומים. מהירות האטומים הפוכה לכיוון התקדמות האור, ולפיכך כל בליעה של פוטון באטום אמורה להאט אותו.

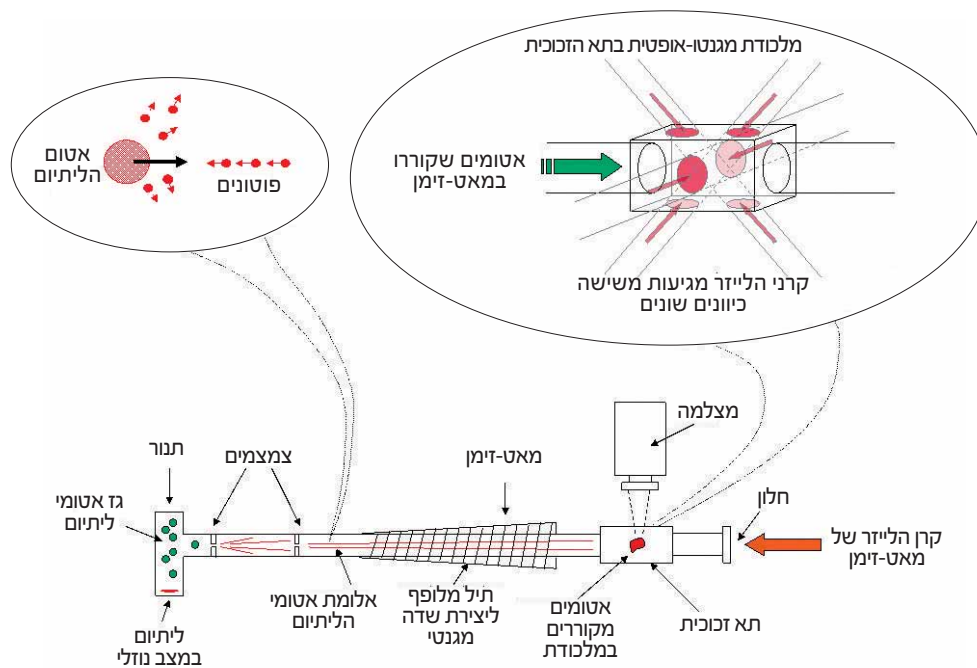
אך המציאות היא מעט מורכבת יותר. כזכור, פוטון ייבלע באטום רק אם הוא נמצא בתהודה איתו. באלומת האטומים שלנו החלקיקים נעים אמנם כולם באותו כיוון, אך בהתפלגות רחבה של מהירויות. לפיכך, כתוצאה מאפקט דופלר³, כל אטום "יראה" את הפוטונים בתדר שונה, התלוי במהירותו. אפשר לומר שתדר התהודה יהיה שונה בין אטומים בעלי מהירויות שונות. מכיוון שתדר אור הלייזר הוא בקירוב טוב חד-צבועי, רק אטומים במהירות מסוימת מאוד יצליחו לבלוע פוטונים ולהאט. יתרה מזו, ברגע שיאטו מעט, לא יהיו עוד בתהודה עם הפוטונים, כיוון שמהירותם השתנתה. ברור שאי-אפשר לבצע קירור יעיל בדרך זו.

ואולם, למזלנו, לא רק המהירות משפיעה על תדר התהודה של האטומים. גם לשדה מגנטי יש לרוב השפעה דומה. אפקט זה נקרא אפקט זימן (על שם המדען ההולנדי פיטר זימן, Zeeman). תדר התהודה של האטום משתנה כפונקציה של חוזק השדה המגנטי שבו הוא נמצא. אפשר להשתמש באפקט זה לתועלתנו על-ידי כך שנפצה על היסט דופלר באמצעות היסט זימן. כיצד הדבר מתבצע בפועל? הזרמת זרם חשמלי בתיל מוליך המלוּפף סביב קטע באורך כ-30 ס"מ בצינור יוצרת שדה מגנטי, הגדל ככל שהאטומים מתרחקים מהתנור. חוזק השדה המשתנה בכל נקודה דואג להשאיר את האטומים בתהודה לאורך כל מסלול ההאטה. מבנה זה נקרא מאט-זימן (Zeeman-slower). כל אטום שיאט במסלול הקצר בן 30 הס"מ יבלע ויפלוט בסך-הכל כ-10,000 פוטונים. כתוצאה מכך יהיה נתון במשך זמן זה לכוח הגדול פי 100,000 מכוח המשיכה של כדור-הארץ, אשר יגרום לו להאט למהירות של כ-30 מטרים לשנייה בלבד.

3. אפקט דופלר – שינוי בתדירות של גל נצפה כשמקור הגלים נמצא בתנועה ביחס לצופה (או למאזין). לדוגמה – סירינת אמבולנס נשמעת בצליל בעל תדירות גבוהה יותר כאשר האמבולנס מתקרב מאשר כשהוא מתרחק.

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

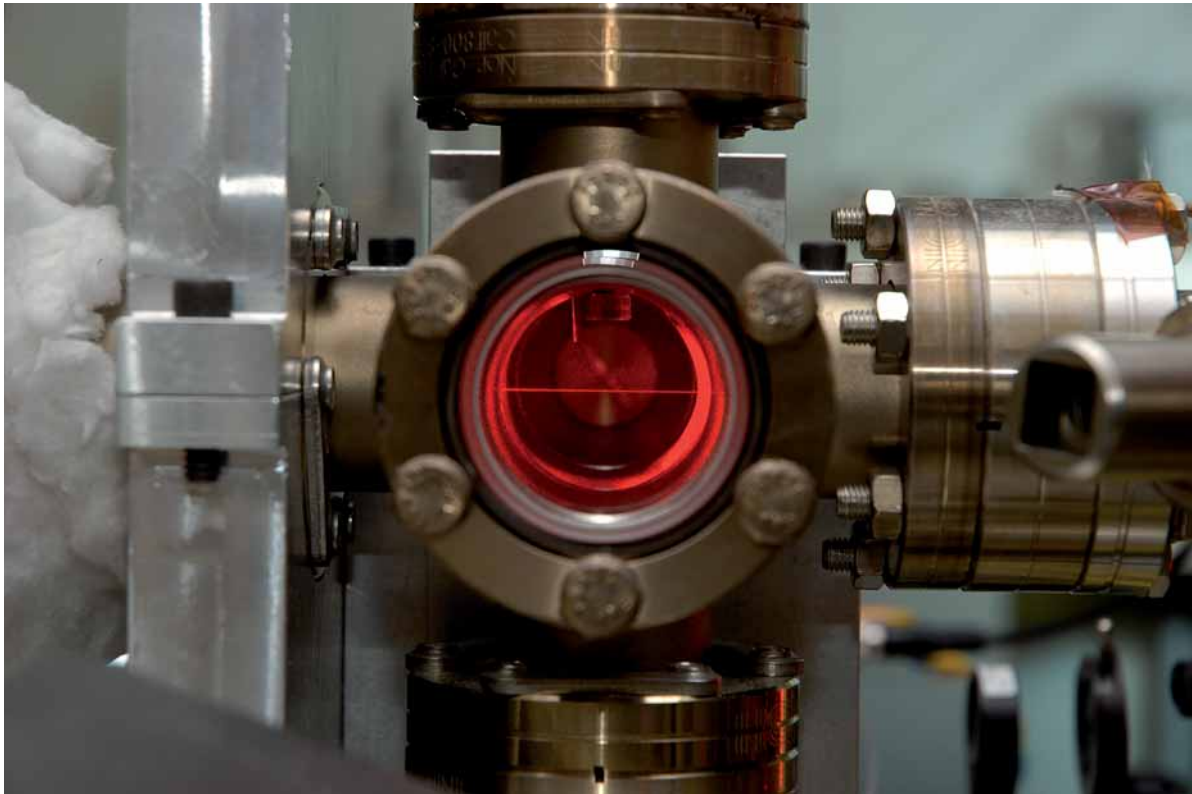
תרשים המערכת לקירור האטומים, הנמצאת בוואקום גבוה (10^{-11} טור <)



שלב שני - מלכודת מגנטו-אופטית

במרכז המערכת, מיד לאחר מאט-זימן, ממוקם תא זכוכית אשר בתוכו מתבצעים שלבי הקירור הבאים, ובהמשך – גם המחקר עצמו. חלק מהאטומים שעברו קירור ראשוני והגיעו אל תא הזכוכית נתפסים שם במלכודת, שבה ימשיך תהליך הקירור. זוהי מלכודת מגנטו-אופטית (Magneto-Optical Trap), המבוססת, כמו בשלב הקודם, על אפקטי דופלר וזימן. היא בנויה מקרני לייזר רחבות המגיעות משישה כיוונים שונים ומכוונות למרכז התא. שני סלילים, שדרכם זורם זרם חשמלי בכיוונים מנוגדים, ממוקמים משני צדי התא ומייצרים שדה מגנטי המתאפס

במרכז תא הזכוכית. תדר הלייזר מכויל כך שיהיה בתהודה עם אטומים הנעים לקראתו ומשקלל גם את ההיסט בתדר שגורם השדה המגנטי. כתוצאה מכך פועל על האטומים כוח המאט אותם (שוב, עקב בליעת הפוטונים). האטומים המקוררים מתרכזים באזור קטן שקוטרו מילימטרים אחדים במרכז התא, שם השדה המגנטי מתאפס והיעדרו של היסט זימן הופך אותם לכמעט "שקופים" ללייזר. האטומים עדיין בתנועה, אך הם סיימו את תהליך הקירור של שלב זה, שנמשך אלפיות שנייה אחדות. תפקידו העיקרי של הלייזר כעת הוא לשמור אותם שם. בחלקיקים הלכודים אפשר להבחין בעין בלתי מצוידת, כפי שאפשר



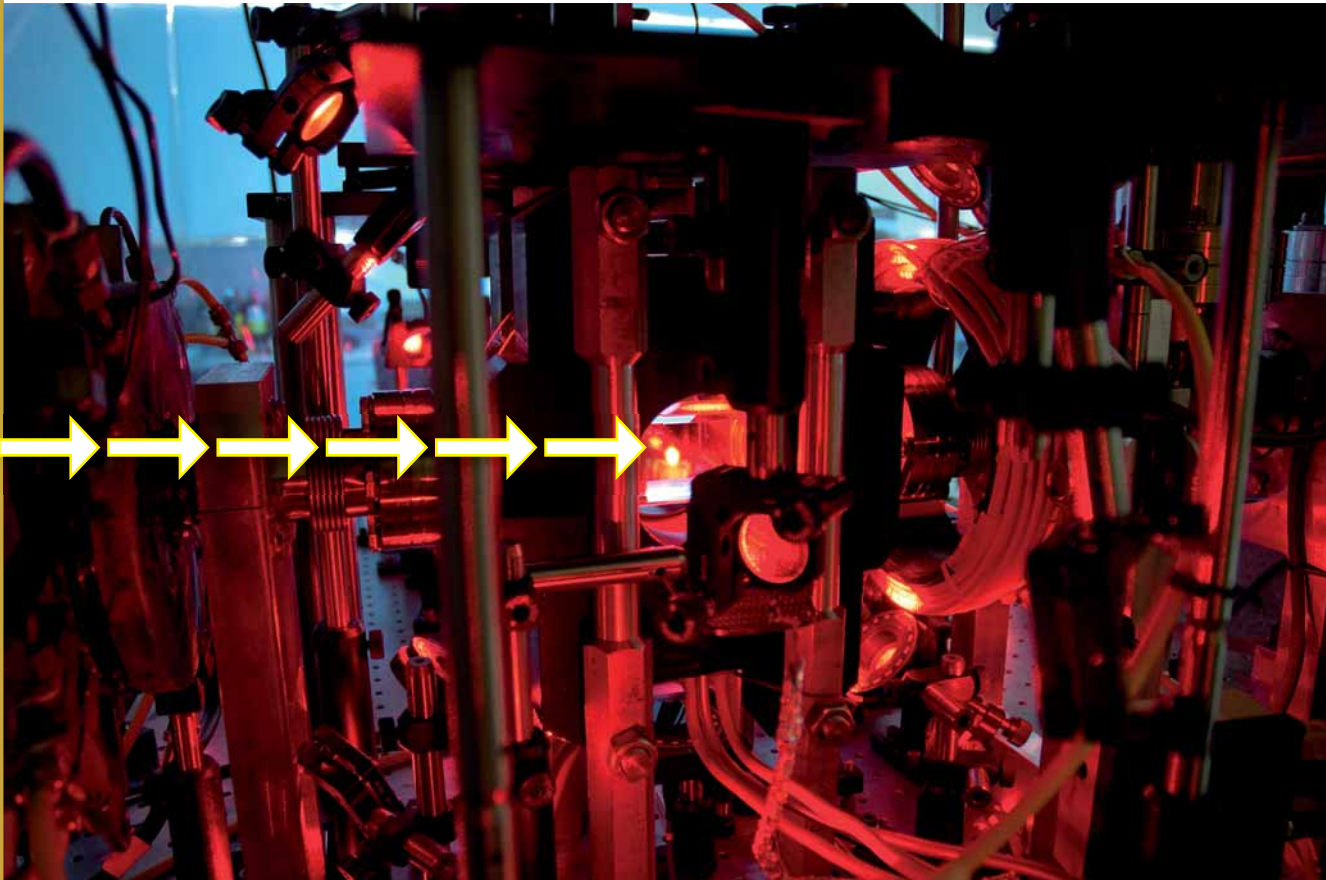
תמונה 2 בתמונה זו אפשר לראות את אלומת האטומים היוצאת מהתנור (משמאל) לכיוון מאט-זימן (מימין). האטומים נראים דרך חלון בגוף המערכת הצבע האדום, שבדקותו אפשר להבחין בהם, מקורו בפיזור הפוטונים של הלייזר המאט המגיע מימין (צבע האור תלוי בסוג הלייזר)

פי 1,000 מטמפרטורה זו, ולכן שלב הקירור הבא מבוסס על שיטה אחרת.

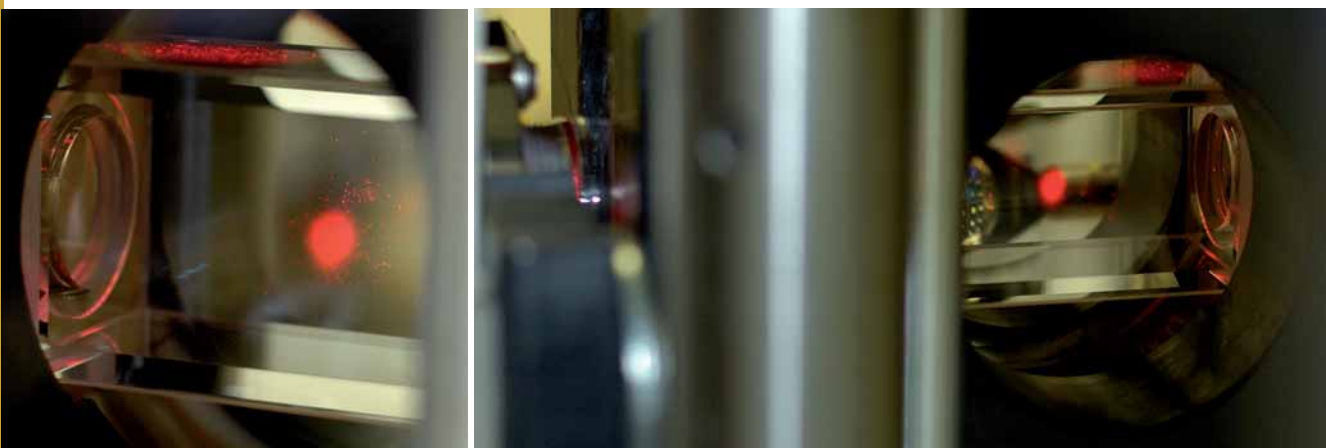
נקודה למחשבה: כולנו יודעים מה קורה לגז כשמקררים אותו – הוא מחליף מצב צבירה והופך לנוזל ואחר-כך למוצק. אם כן, מדוע האטומים הלכודים ממשיכים לשמור על מצב צבירה גזי על אף הטמפרטורה הנמוכה, שהרי אמרנו כבר כי בטמפרטורת החדר הליתיום הוא מוצק? ובכן, יש להביא בחשבון כי טמפרטורות ההתכה והרתיחה של כל חומר תלויות בצפיפותו. בתוך המלכודת, צפיפות האטומים קטנה פי מיליון מזו של האוויר בחדר, ולכן האטומים אינם משנים את מצב הצבירה שלהם.

← לראות בתמונות. הם נראים כמו ערפילית אדומה קטנה המרחפת במרכז התא. מצליחים לראותם בזכות הפוטונים המפוזרים על-ידי האטומים בתהליך הבליעה/פליטה (הלייזר הוא בתחום האור האדום). האטומים "תלויים" בתוך הוואקום, המונע מהם מגע עם כל גוף חם. בתמונות יש במלכודת כמיליארד אטומי ליתיום בטמפרטורה של 0.3mK (0.3 אלפיות קלווין), פי 10,000 קר יותר מהחלל החיצוני! זוהי טמפרטורה קרובה מאוד לגבול האפשרי בקירור של אטומי ליתיום המבוסס על בליעת פוטונים (הגבול נקרא Doppler limit), ובדרך הנוכחית אי-אפשר לקרר מעבר לה. אך הטמפרטורה שלה אנו שואפים קרה

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



תמונה 3 המלכודת המגנטו-אופטית בפעולה. קרני הלייזר מגיעות משישה כיוונים שונים למרכז תא הזכוכית, אשר בתוכו אפשר להבחין באטומים הלכודים (נקודה אדומה בהירה)



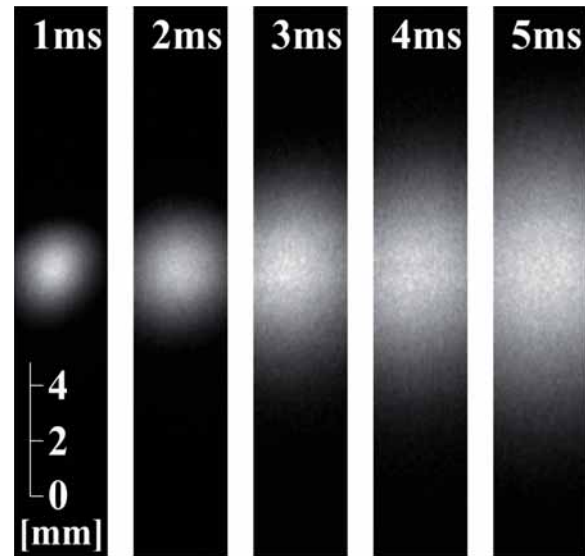
תמונות 4-5 אטומי הליתיום המקוררים לכודים בתוך תא הזכוכית שבתוכו שורר ואקום



איך מודדים חום לאטום?

בטרם נמשיך, ראוי לתת את הדעת לשאלה כיצד נעשית מדידת הטמפרטורה, שהרי את טמפרטורת האטומים המקוריים אי-אפשר למדוד בדרך המוכרת של מגע עם מדחום. כיצד, אם כן, מתבצעת המדידה?

דרך אחת שבה אנו משתמשים היא לכבות באופן פתאומי את המלכודת המחזיקה את האטומים, להמתין פרק זמן מסוים ואז לצלם את האטומים במצלמה מהירה. על סמך התבוננות בסדרת תמונות כאלה, שצולמו בפרקי זמן קצובים, אפשר למדוד את מהירות התפשטות הענן האטומי מיד לאחר שחרורו. מהירות זו היא מהירות האטומים, וממנה אפשר להסיק בעזרת נוסחאות פשוטות מהי הטמפרטורה. דוגמה לסדרת תצלומים כזו אפשר לראות בתמונה 6.



תמונה 6 התפשטות ענן האטומים עם שחרורו מהמלכודת טמפרטורת האטומים בתצלום היא כ-0.3mK (0.3 אלפיות קלווין) והיא מחושבת לפי מדידת מהירות ההתפשטות

שלב שלישי – קירור על-ידי נידוף

גוף האדם חייב לשמור על טמפרטורה של כ-37°C על מנת לשרוד. הטמפרטורות באילת בקיץ נוסקות לעתים עד מעבר ל-40°C, אך אינן מונעות את התיירים מלרבוץ לחוף הים. מהו אם כן המנגנון המונע מהם להתחמם? ואיך זה קשור לאטומים במעבדתנו?

כאמור, בשני השלבים הראשונים מיצינו את יכולת הקירור של הלייזר. טמפרטורת אטומי הליתיום נעצרה ב-0.3mK. השלב הבא בקירור מבוסס על שיטה אחרת, המוכרת לכולנו מחיי היומיום. זו גם השיטה שבה כל אחד מאיתנו שומר על טמפרטורת גופו ביום חם – הזעה. כדי להבין איך מנגנון זה עובד, נחזור למודל שולחן הביליארד. כזכור, הכדורים נעים במישור השולחן במהירויות שונות ומתנגשים זה בזה. אם נסתכל על התפלגות המהירויות, נגלה כי רוב הכדורים נעים במהירות הקרובה למהירות הממוצעת, ואילו מספר מועט יחסית של כדורים נעים במהירויות גבוהות או נמוכות במיוחד. כעת, מה יקרה אם ננמיך את שפת השולחן כך שהכדורים המהירים ביותר יצליחו ליפול ממנו ולא לחזור? האם תשתנה טמפרטורת השולחן?

ובכן, הטמפרטורה היא יחסית לאנרגיה הממוצעת של הכדורים, וזו יחסית למהירותם בריבוע. לפיכך, אמנם סולקו מהשולחן כדורים מועטים בלבד, אך עקב מהירותם הגבוהה, החזיקו הכדורים שאבדו באנרגיה כוללת גדולה. התוצאה – האנרגיה הממוצעת של הכדורים שנשארו על השולחן נעשתה נמוכה יותר ולכן הטמפרטורה שלהם קטנה (חשיבות רבה יש לעובדה, שהכדורים מתנגשים זה בזה ומחליפים אנרגיה עקב כך, אך לא נדון בנקודה זו במסגרת המאמר). כך גם אנו מתקררים. דרך בלוטות ההזעה שבעורנו מופרשים נוזלים. חלק ממולקולות המים, אלו בעלות האנרגיה הגבוהה מן הממוצע בגופנו, מצליחות להתנדף, בדיוק כמו הכדורים המהירים במודל, ועקב כך יורדת טמפרטורת הגוף. דבר דומה קורה כאשר אנו נושפים על פני מרק חם. אנו מאיצים את נידוף החלקיקים המהירים וכך מקררים את הנוזל.

כדי ליישם שיטה זו, קירור על-ידי נידוף, על אטומי הליתיום, יש להחליף את המלכודת שבה הם מוחזקים. כזכור, המלכודת המגנטו-אופטית מסתמכת על פוטונים בתהודה אשר הגבילו

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

יודעים היכן בדיוק. זוהי אי-הוודאות. הכדור יכול להימצא מבחינתנו בכל מקום בשטח המוסתר מתחת לכובע. עכשיו נניח כי ככל שמהירות הכדור אטית יותר – הכובע גדל (ואיתו גדלה גם אי-הוודאות). עם הנמכת הטמפרטורה, יגדלו הכובעים עד שבשלב מסוים כבר לא נראה את צבעו הירוק של השולחן, כיוון שהכובעים יחפפו בשטחם זה את זה. מהי הטמפרטורה הנמוכה ביותר שאליה אפשר להגיע? זו הטמפרטורה שבה הכובעים של הכדורים יהיו גדולים כמו השולחן עצמו. במצב זה כל אחד מהכדורים נמצא בסיכוי שווה בכל נקודה על פני השולחן. אין לנו עוד אפשרות להבחין בין כדור לכדור.

ובכן, מצב זה בדיוק חזו בוזא ואיינשטיין, והתופעה מכונה עיבוי בוזא-איינשטיין (Bose-Einstein condensation), או בקיצור BEC. שנים ניסו פיזיקאים לקבל BEC בגז אטומים אך לא הצליחו להגיע לטמפרטורות נמוכות מספיק. שיטת הקירור בנידוף היא שנתנה את הדחיפה האחרונה להשגת המטרה. ב-1995 התקבל לראשונה עיבוי בוזא-איינשטיין בשתי מעבדות שונות בארצות-הברית: באוניברסיטת קולורדו (עיבוי אטומי רובידיום) וב-MIT (עיבוי של אטומי נתרן). ב-2001 זכו מדענים בפרסי נובל על הישג זה.

BEC, אטומים קרים בכלל, הם כלי חשוב מאוד בתחום המדידות המדויקות:

- שעונים אטומיים נסמכים על תדרי התהודה של אטומים כאלו ומגיעים לרמות דיוק מדהימות (טעות של פחות משנייה במשך מיליון שנים).
- ענף זה שיפר פלאים את יכולתנו למדוד קבועי טבע, ומחקרים היום עוסקים בשאלה, אם קבועים אלו הם אכן "קבועים", או שמא הם משתנים בזמן.
- רגישותם של האטומים הקרים לשינויים סביבתיים מאפשרת בניית גרביטומטרים – מכשירים המזהים שינויים קלים בשדה כוח המשיכה, שבעזרתם אפשר לחפש מתכות כבדות מתחת לאדמה.
- אטומים קרים מהווים פלטפורמה טובה לבניית מחשב קוונטי, אשר עשוי לספק יכולות חישוב חזקות לאין שיעור ביחס למחשב המוכר.

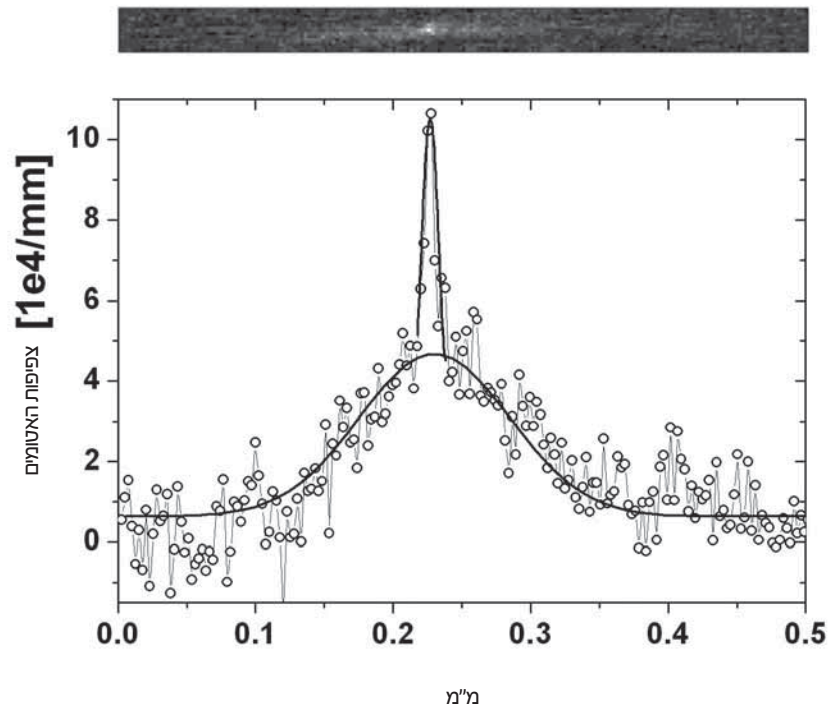
את הטמפרטורה בה ל-0.3mK. המלכודת הנוספת מבוססת על לייזר בעל אורך גל 1.07 מיקרומטר. זהו לייזר בתחום האינפרא-אדום (IR), ותדר זה רחוק מאוד מתהודה עם האטומים. הלייזר חזק במיוחד ונותן הספק של 100W. לייזר זה ממלא תפקיד חשוב מאוד במערכת.

אנו ממקדים את קרן הלייזר למרכז המלכודת המגנטו-אופטית, שבה נמצאים אטומי הליתיום המקוררים מסוף השלב הקודם. לאטומים, בתנאים מסוימים המתקיימים כאן, יש משיכה לאזור שבו עוצמת הלייזר היא מרבית (Stark effect) (העוצמה מוגדרת כהספק ליחידת שטח). אזור זה, שקוטרו כ-30 מיקרומטר, מתקבל במוקד הקרן. וכך, לאחר כיבוי הלייזרים האחרים על המלכודת המגנטו-אופטית, נותרים כמיליון אטומים לכודים במלכודת החדשה, הנמצאת במוקד קרן הלייזר החזקה. כעת מאפשרים לאטומים המהירים בחבורה הלכודה לברוח מהמלכודת וכך להוריד את הטמפרטורה של החלקיקים שנתרו בה. הדבר נעשה על-ידי הקטנת הספק הלייזר, פעולה המקבילה להנמכת שפת שולחן הביליארד במודל. במשך שניות אחדות מוקטן הספק הלייזר הדרגתית עד לקבלת הטמפרטורה הרצויה, כ-300 ננו-קלווין!

טמפרטורה אפס ועיבוי בוזא-איינשטיין

האם אפשר לקרר את האטומים עד לטמפרטורה של אפס קלווין – הטמפרטורה שבה החלקיקים עומדים מתנועה? ובכן, לפי מכניקת הקוונטים ועקרון אי-הוודאות של הייזנברג, האטומים אינם יכולים לעצור במקומם. לפי עיקרון זה, כאשר האטום מאט את מהירותו, גדלה אי-הוודאות לגבי מיקומו. בעצירה מוחלטת, אי-ודאות זו תגדל לאינסוף. זהו מצב בלתי אפשרי, שבו האטום יכול להימצא בכל מקום ביקום (ואף מעבר לו) בסיכוי שווה. אף על פי כן, דברים מעניינים מאוד קורים כשמתקרבים מספיק לאפס המוחלט.

ננסה להבין את משמעותה של אי-ודאות זו. נשתמש שוב במודל שולחן הביליארד. תארו לכם כי כל כדור על השולחן נע כאשר הוא מוסתר מתחת לכובע רחב שוליים הנע איתו. אנו יודעים כי מתחת לכל כובע מסתתר כדור, אך איננו



תמונה 7 עיבוי בזה-איינשטיין (BEC) של אטומי ליתיום כפי שהושג במעבדתנו. התמונה העליונה: במרכז נמצאים האטומים המעובים, כאלף מספרים (נקודה בהירה). מסביבם אטומים שלא התעבו בטמפרטורה של כמה מאות ננו-קלווין (נונו = מיליארדית). הגרף: זהו ניתוח של התמונה, המתאר את צפיפות האטומים האורכית (הציר האנכי) כפונקציה של המיקום במלכודת (הציר האופקי). האטומים המעובים מרוכזים ב"חנית" הממוקמת מעל ה"גבעה" של האטומים שאינם מעובים

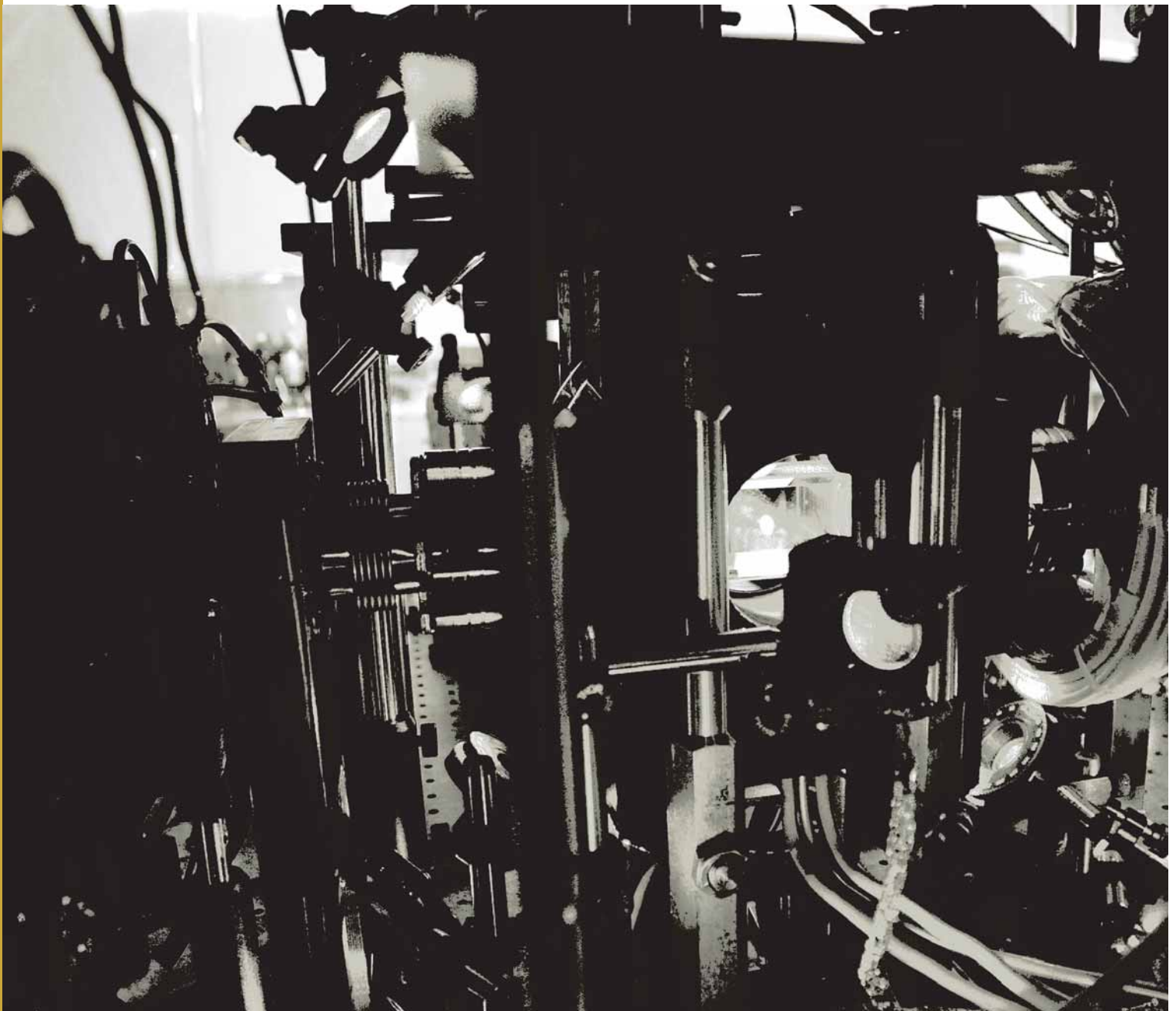
סוליטונים

אבן שנזרקה לתוך אגם שקט תייצר גל אשר יאבד מגובהו תוך כדי תנועתו ו"יימרח" עד שייעלם. תופעה זו נגרמת כתוצאה מדיספרסיה (פיזור) של הגל על-ידי התווך שבו הוא נע. בניגוד לכך, הסוליטונים הם גלים השומרים על גודלם וצורתם תוך כדי התקדמות. במקרה של BEC, אפקטים של משיכה בין החלקיקים המרכיבים את הגל מפצים על הפיזור שלו. נבחן את הדוגמה הזאת: אם ניקח חופן כדוריות קטנות בידנו ונגלגל אותן על הרצפה, הן יתחילו לנוע כמקשה אחת, אך אט-אט יתפזרו ויתרחקו זו מזו. לעומת זאת, אם נגלגל

מבחינתנו, הפיזיקאים, ה-BEC הוא בעיקר מגרש משחקים ענקי, שבו תופעות קוונטיות ניתנות לצפייה ישירה. קחו לדוגמה את תופעת ההתאבכות. כבר התרגלנו (אולי) לעובדה שאור הוא בה-בעת חלקיק וגל, אך לפי מכניקת הקוונטים, גם החומר הוא גל. כן, לכל אטום יש גם תכונות גליות. ואכן, התאבכות בין שני BEC זהים כבר נצפתה בניסויים.

בשנה האחרונה הצליחה קבוצתנו להגיע ל-BEC באטומי ליתיום. חומר זה מהווה את התשתית למחקרנו בתחום גלי החומר, כפי שנתאר בהמשך.

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



065

גליליאן
2008 אוקטובר

לקריאה נוספת:

אתר אוניברסיטת קולורדו, המספר בצורה מהנה על עיבוי בוז-איינשטיין:

[/http://www.colorado.edu/physics/2000/bec](http://www.colorado.edu/physics/2000/bec)

Nobel Prize Lectures 1997:

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997

Nobel Prize Lectures 2001:

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001

N. Gross and L. Khaykovich, "All optical production of Li-7 Bose-Einstein Condensation using Feshbach resonances", *Physical Review A* 77, 023604 (2008).



← אותן כדוריות על יריעת ניילון דקה, משקלן ייצור בה שקע קטן, שיתקדם איתן וימנע מהן להתפזר. אפקט דומה אנו מבקשים לחקור אצלנו במעבדה. את הכדוריות מחליפים האטומים המקוררים. כזכור, אטומי הליתיום אינם נוחים לעבודה, אך יש להם תכונה אחת המפצה על כל הקשיים: אטומים אלו מאפשרים שליטה יוצאת מגדר הרגיל בעוצמת המשיכה ביניהם, המשיכה שהופכת גל חומר לסוליטון. לכן הליתיום הוא מועמד מצוין למחקר בתחום זה. סוליטונים הם תופעה מעניינת מאוד למחקר, עקב שכיחותם במערכות שונות בטבע כגון נוזלים, אופטיקה לא-ליניארית, ביולוגיה מולקולרית ואסטרופיזיקה. באופטיקה משמשים סוליטונים של אור להעברת מידע למרחקים ארוכים בתוך סיבים אופטיים. בתחום האטומים הקרים, סוליטונים צפויים לשפר אף יותר את היכולת לבצע מדידות מדויקות בזכות יכולתם לשמור על צורתם.

עתיד האטומים הקרים

נוכחנו בעניין הרב שמעורר תחום האטומים הקרים. בעשור האחרון פורסמו עבודות מחקר רבות מאוד בתחום זה, הנמצא כיום בחזית המדע ומעסיק פיזיקאים בכל העולם. מאמצים רבים מוקדשים היום למיניאטורזציה של מערכות קירור אטומים (atom chips), על מנת שיוכלו לשמש במכשירים ניידים המיועדים לביצוע מדידות מדויקות בשטח. BEC הוא כלי ייחודי לחיקוי מודלים מורכבים של פיזיקת המצב-המוצק, אינפורמציה קוונטית (quantum information), פיזיקה לא-ליניארית ועוד. ענף זה ממשיך להתפתח, וצופן בחובו עוד תגליות רבות. ■

לב חייקוביץ הוא ד"ר לפיזיקה ומרצה בכיר באוניברסיטת בר-אילן.

נועם גרוס הוא סטודנט לתואר שלישי באוניברסיטת בר-אילן ונתמך על-ידי תכנית מלגות אדאמס של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים.

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

067

גלייליא
2008 אוניוסט