

פרס נובל בפיסיקה 2001

נ"ר דודזון, המחלקה לפיסיקה של מערכות מורכבות, מכון ויצמן למדע, רחובות

תקציר

בשנת 2001 ניתן פרס נובל לחוקרים שיצרו מצב צבירה חדש בעל ניוון קוואנטי מלא. קארל ויימן (Carl Wieman) ואריק קורנל (Eric Cornell) מהמכון המשולב לאסטרופיסיקה (JILA: Joint Institute for Laboratory Astrophysics) בבולדר, קולורדו, וולפגנג קטרלי (Wolfgang Ketterle) מהמכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT: Massachusetts Institute of Technology) התחלקו בפרס על יצירה ומחקר של התעבות בוז-איינשטיין (Bose-Einstein Condensation) כלומר התעבות ואכלוס מנוון של רמת היסוד הקוואנטית בגז של אטומים אולטרה-קרם.

מילות מפתח: התעבות בוז-איינשטיין, סטטיסטיקת פרמי-דירק, סטטיסטיקת בוז-איינשטיין, פרמיון, בוזון, גל דה-ברויי, מלכודות אטומים, קירור על-ידי לייזר ועל-ידי אידוי.

התעבות בוז-איינשטיין

כדי לתאר את ההתנהגות הממוצעת של מערכת המורכבת ממספר גדול מאוד של חלקיקים, לדוגמה חלקיקי גז, חייבים לעבוד בשיטות סטטיסטיות. בטמפרטורות גבוהות ההתפלגות בין מצבי האנרגיה היא רציפה ומקיימת את התפלגות בולצמן בהתאם לתיאור הקלאסי. בטמפרטורות נמוכות התיאור הקלאסי אינו תקף ושלטים חוקי פיסיקת הקוואנטים. לפי תורת הקוואנטים התכונות הסטטיסטיות של חלקיקים בטמפרטורות נמוכות מאוד נקבעות לפי גודלו של התנע הזוויתי הפנימי שלהם (**ספין**) ביחידות של קבוע פלנק h .

חלקיקים בעלי ספין שאינו שלם (למשל אלקטרונים, פרוטונים ונייטרונים להם ספין $1/2$) נקראים **פרמיונים** ומקיימים את **סטטיסטיקת פרמי-דירק**. סטטיסטיקה זו אוסרת על שני פרמיונים זהים להימצא באותו מצב קוואנטי. זהו עקרון האיסור המפורסם של פאולי המהווה אבן יסוד בהבנת תכונות החומר. חלקיקים בעלי ספין שלם (למשל חלקיקי האור-פוטונים) נקראים **בוזונים** ומקיימים את **סטטיסטיקת בוז-איינשטיין** המאפשרת ואף מעודדת הימצאות מספר בוזונים באותו מצב קוואנטי. מסתבר שהעיקרון ניתן ליישום גם עבור חלקיקים מורכבים. כך למשל לאיזוטופ רובידיום 87 המכיל 37 אלקטרונים, 37 פרוטונים ו-40 נויטרונים יש תנע זוויתי כולל שלם ולכן הוא מתנהג כבוזון. למעשה כל אטום נייטרלי שמספר הנייטרונים שלו הוא זוגי יתנהג כבוזון. כבר בשנת 1924 כתב הפיסיקאי ההודי סטיינדרה נאס בוז (Satyendra Nath Bose) מכתב לאלברט איינשטיין ובו תאר את הסטטיסטיקה הנכונה עבור פוטונים אשר הסבירה את התכונות של קרינת גוף שחור. איינשטיין הכליל את הסטטיסטיקה גם עבור אטומים, והבחין שיש לה תכונה מוזרה מאוד בטמפרטורות נמוכות אבל סופיות: סטטיסטיקת בוז-איינשטיין מנבאת שמרבית האטומים יעברו **התעבות** ויאכלסו את המצב בעל האנרגיה המינימלית האפשרית

במערכת שהוא מצב היסוד הקוואנטי. במצב זה כל האטומים נמצאים ברמת היסוד, וכולם בעלי אפיון קוואנטי זהה. פירושו של דבר שפונקציית הגל של כל אטום, המתארת למשל את מיקומו, מהירותו וכיוון תנועתו תהיה זהה לחלוטין לזו של האטומים האחרים בעיבוי. בשפה ציורית ניתן לחשוב על מיליוני אטומים זהים אלו כעל "סופר-אטום" בודד שמרכיביו מתנהגים באופן קוהרנטי והמתואר על ידי פונקציית גל אחת בלבד בעלת מיליוני עותקים זהים.

ניתן לכנות את העיבוי בשם "קרן לייזר של אטומים" כי מצב זה אנלוגי לקרינת לייזר שבה למרבית הפוטונים קיטוב, אורך גל וכיוון התקדמות זהים לחלוטין. קרינת הלייזר עצמה למעשה אינה עיבוי כיוון שהפוטונים, בניגוד לאטומים, יכולים להיווצר ולהיעלם כך שמספרם אינו נשמר. בשונה מהתעבות רגילה של גז לנוזל, התעבות בוז-איינשטיין **אינה** נובעת מאינטראקציה בין האטומים אלא רק מהסטטיסטיקה הקוואנטית שלהם, כלומר מהתאבכות בונה בין גלי דה-ברויי של חלקיקי החומר ולכן תתרחש גם בגז "אידיאלי" ללא אינטראקציות בין החלקיקים.

על-מוליכות ועל-נוזליות

כבר במחצית הראשונה של המאה העשרים התגלה שבטמפרטורות של מספר מעלות מעל האפס המוחלט יורדת ההתנגדות החשמלית בחומרים מסוימים לאפס, כלומר הם הופכים לעל-מוליכים (superconductors), כמו כן החיכוך בזרימה של הליום נוזלי יורד אף הוא לאפס והוא הופך לעל-נוזל (super fluid). מאז, ולאחר ויכוחים רבים התקבל על ידי הקהילה המדעית שבסיסן של תופעות מפתיעות אלו הוא בהתעבות בוז-איינשטיין של זוגות אלקטרונים ושל אטומי הליום בהתאמה. עם זאת, גם לאחר עשרות שנות מחקר ניסיוני ותיאורטי אנו עדיין רחוקים מהבנה מלאה של תופעות אלו מכיוון שאינטראקציות חזקות בין

התעבות בוז-איינשטיין כתהליך התאבכות בונה בין גלי-חומר

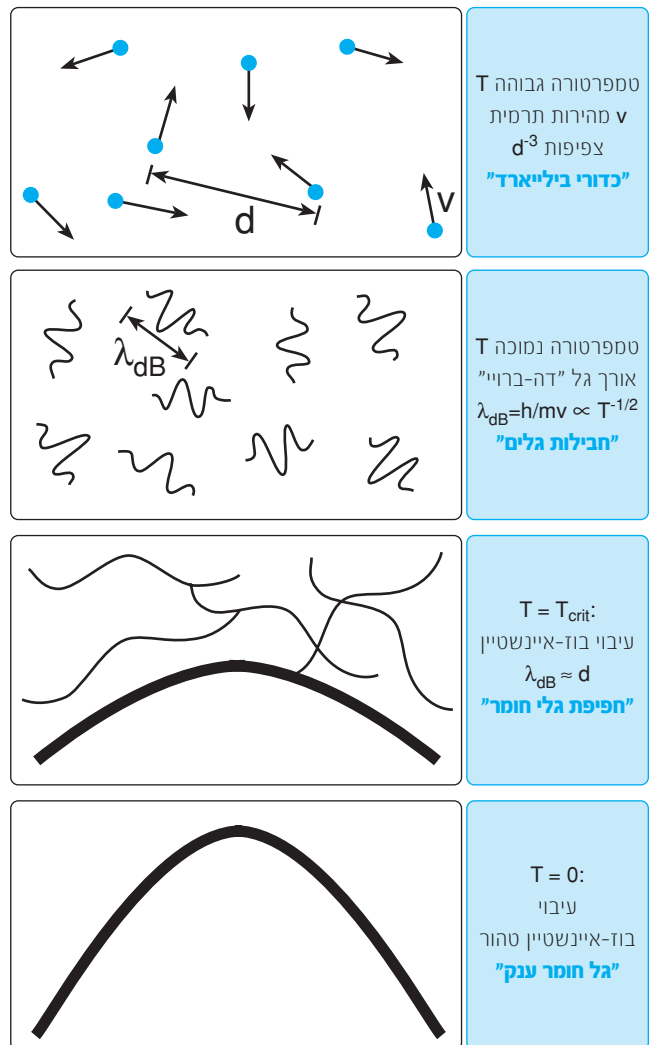
תאור אינטואיטיבי של תהליך ההתעבות, באנאלוגיה לגלי אור, מתבסס על התייחסות לאטומים כגלי-חומר שמתאבכים זה עם זה. כפי שגילה דה-ברויי (de Broglie) בתחילת המאה העשרים, אורך הגל λ של האטום שווה לקבוע פלנק h חלקי התנע שלו p , ($\lambda = h/p$), ולכן כאשר מקררים את האטומים התנע שלהם קטן ואורך הגל גדל. כאשר אורך הגל שווה בערך למרחק הממוצע בין האטומים, "מרגישים" האטומים זה את זה ויכולים להתאבך באופן קוהרנטי. בדומה לאור, ההתאבכות יכולה להיות הורסת או בונה. עבור פרמיונים, כאשר שתי חבילות גלים חופפות זו את זו, ההתאבכות תמיד תהיה הורסת. כלומר הסיכוי למצוא את האטומים באותו מצב, אותו מקום ואותה מהירות הוא אפס וזהו בדיוק עקרון פאולי האוסר על שני פרמיונים להימצא באותו מצב קוואנטי. לעומת זאת עבור בוזונים ההתאבכות בין חבילות הגלים המייצגות אטומים שונים תהיה תמיד בונה, כלומר הסיכוי למצוא את האטומים באותו מצב קוואנטי מוגבר. הגברה זו גורמת להצטברות מהירה של מרבית האטומים (התעבות) באותו מצב קוואנטי.

מתברר שהתנאי הפשוט לקיום התאבכות, קרי שאורך הגל של האטומים (אשר תלוי רק בטמפרטורה) שווה בערך למרחק הממוצע ביניהם (אשר תלוי רק בצפיפות) מתאים בקירוב לתנאי המדויק להתעבות המתקבל מסטטיסטיקת בוז-איינשטיין. מכך נובע, לדוגמה, שהטמפרטורה הדרושה להתעבות בוז **דליל** קטנה בערך פי מיליון מאשר בנוזל או במוצק, בהם המרחק בין האטומים בערך פי אלף יותר קטן (זכור שטמפרטורה T מתכונתית לתנע p בריבוע ולכן לאורך גל דה-ברויי הנדרש בחזקת מינוס שתיים $T \propto p^2 \propto \lambda^{-2}$).

קירור אטומים באמצעות קרני לייזר

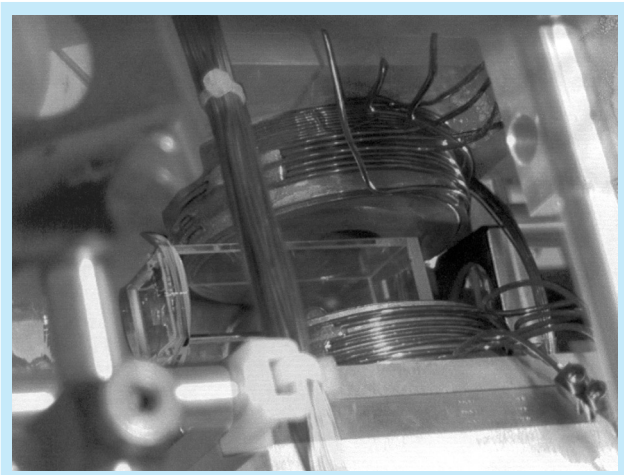
כאשר אטום בולע פוטון הוא מקבל ממנו את התנע שלו: אם תנע הפוטון שנבלע מנוגד לכיוון תנועתו של האטום יאט האחרון במקצת ואם תנע הפוטון שנבלע מקביל לכיוון תנועתו של האטום הוא יאיץ במקצת. באמצעות הארה של גז אטומי על ידי שש קרני לייזר מכיוונים שונים ושימוש באפקט דופלר הצליחו מדענים לגרום לכך שכל האטומים **יבלעו** בממוצע יותר פוטונים מכיוון מנוגד לתנועתם מאשר בכיוון המקביל

החלקיקים במוצק ובנוזל מסבכות מאוד את התנהגותם. משום כך, נוצר צורך חשוב לייצר התעבות בוז-איינשטיין בחומר שבו האינטראקציות בין החלקיקים זניחות או לפחות חלשות מאוד, קרי גז **אטומי דליל**. לרוע המזל ההתעבות בגז דליל צפויה להתרחש בטמפרטורות של כמיליונית מעלה מעל האפס המוחלט (ראה הסבר במסגרת), טמפרטורות שנחשבו לדמיוניות לחלוטין בזמנן. מצב זה החל להשתנות בשנת 1985 כאשר לראשונה קיררו מדענים גז אטומי דליל לטמפרטורות של מספר מיליוניות מעלה מעל האפס המוחלט. תיאור סכמטי של תהליך ההתעבות ניתן בתרשים 1.



תרשים 1: מהו עיבוי בוז-איינשטיין (BEC)? מלמעלה למטה:

בטמפ' גבוהה החלקיקים מתנהגים כ"כדורי ביליארד"
 בטמפ' נמוכה החלקיקים מתנהגים כ"חבילות גלים"
 טמפ' קריטית "עיבוי בוז איינשטיין" $\lambda_{dB} \approx d$
 באפס המוחלט מתקבל סופר אטום המתואר על ידי פונקציית גל אחת.



תרשים 2: מלכודת מגנטית לקירור חלקיקים הקיימת במכון ויצמן.

נושאות איתן אנרגיה רבה ומקררות בכך את העור. אם מבצעים את התהליך מספיק לאט כך שבכל שלב האטומים שנשארים במלכודת מספיקים להתנגש ולשמור על שיווי משקל תרמי נותרים לבסוף במלכודת כאחוז אחד מהאטומים (עובדה כאובה מאוד לכל מי שמשמש בשיטה זו), אבל עם פחות ממיליונית האנרגיה המקורית (כלומר 99 האחוזים שאודו נשאו עמם יותר מ-99.99999% מהאנרגיה). כאשר הטמפרטורה של האטומים הלכודים יורדת מתחת לטמפרטורה קריטית מתרחש תהליך ההתעבות ומרביתם עוברים לאכלס את רמת היסוד הקוואנטית של המלכודת. למעשה ניתן להגיע לאיכלוס כמעט מלא (מעל 95%) של רמת היסוד כך שהמערכת מתנהגת בקירוב מצוין כעיבוי בוז-איינשטיין מושלם בטמפרטורה של אפס מעלות קלווין. **בתרשים 2** מופיע תצלום של מלכודת מגנטית לקירור חלקיקים הקיימת במכון ויצמן.

תופעות חדשות

בשנים המועטות שעברו מאז שנוצר לראשונה עיבוי בוז-איינשטיין בגז אטומי רובידיום קרים, הודגמה התופעה גם בגזים של נתרן, ליתיום, מימן והליום ולאחרונה גם בגז מולקולרי. כמו כן, הוגדל מספר האטומים המשתתפים בקודנסט מאלפים בודדים עד מעל למיליארד (כמובן שזוהי עדיין כמות קטנה מאוד של חומר שמסתה כ- 10^{-14} גרם). כיום פועלות בעולם כ-20 קבוצות מחקר המבצעות ניסויים בהתעבות בוז-איינשטיין. במקביל, נערכה סדרה של ניסויים מדהימים שהמחישו את תכונותיו הייחודיות של העיבוי; רבים מהם נחשבו עד לאחרונה ל"ניסויים מחשבתיים"

ל¹. **פליטת** הפוטונים תהייה **כיוון אקראי**, כך שבממוצע לא תשפיע על מהירותם. חזרה על התהליך כ-10,000 פעמים (דבר שנמשך בפועל כאלפית שניה) הצליחה להביא את כל אטומי הגז לעצירה כמעט מוחלטת ולפיכך לקירור הגז לטמפרטורות של פחות מאלפית מעלה מעל האפס המוחלט. שיכלול שיטה זו, פיתוח שיטות קירור חדשות באמצעות לייזר ופיתוח מלכודות אופטיות, מגנטיות ומגנטו-אופטיות לגז האטומים הקפואים, איפשרו קירור נוסף לטמפרטורה של כמיליונית מעלה מעל האפס המוחלט ואף גידול מסוים בצפיפות הגז. על פיתוח שיטות אלו ניתן פרס נובל לפיסיקה בשנת 1997 לסטיב צ'ו, ויליאם פיליפס וקלוד כהן-טאנוג'י (Steve Chu, William Phillips, Claude Cohen-Tannudji).

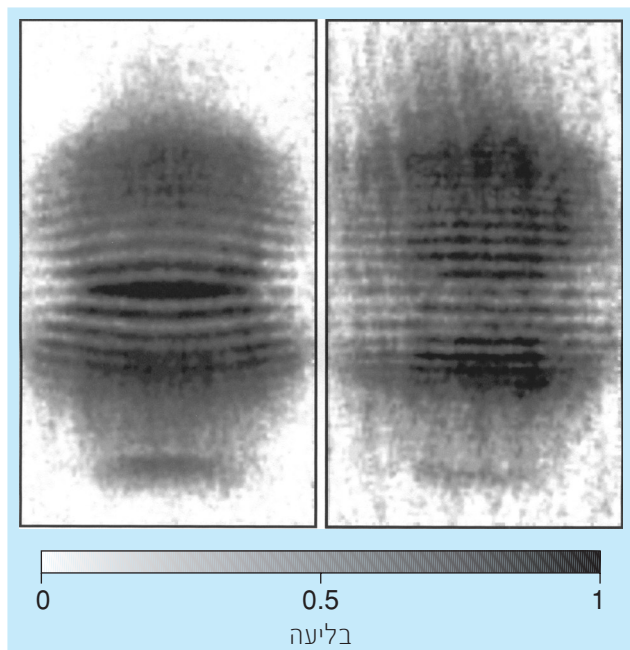
למרות שלשיטות קירור ולכידה של אטומים היתה השפעה עצומה בתחומים רבים בפיסיקה ולמרות שהצליחו להגדיל את אורך הגל דה-ברויי של האטומים עד לכדי עשירית מהמרחק הממוצע ביניהם, (כלומר פי 10 בלבד פחות מהנדרש להתעבות בוז-איינשטיין) נכשלו כל המאמצים להתגבר על הפער שנותר.

התברר שהפוטונים שהצליחו כל כך בשלבי הקירור הראשונים הם חלקיקים "אלמים" בטמפרטורות נמוכות מדי ובצפיפות גבוהה מדי (אז האטומים מתחילים לפזר את הפוטונים זה על זה וגורמים לדחייה ולחימום הדדיים). לפיכך לא נותרה ברירה אלא "לזנוח" את שיטת הקירור על ידי פוטונים ולגלות שיטה חדשה לשלב הקירור הסופי.

קירור באמצעות אידוי

השיטה שבסופו של דבר הצליחה להביא לקירור משמעותי נוסף (והיחידה עד כה) הינה פשוטה באופן מפתיע ומוכרת לכולנו מחיי היום יום: קירור באמצעות אידוי (evaporative cooling). שיטה זו הודגמה במקור עבור גז מימן בשנת 1988 והופעלה בהצלחה על אטומי רובידיום מקוררי לייזר בשנת 1995 על ידי ויימן וקורנל. אטומי הרובידיום הקרים הוטענו למלכודת מגנטית (שנבחרה משום שכמעט ואינה מחממת את האטומים). באמצעות הקרנה איטית מאד על ידי גלי רדיו הוצאו באופן סלקטיבי האטומים החמים ביותר מהמלכודת. כל אטום חם שעוזב את המלכודת נושא עימו אנרגיה הגבוהה יותר מן האנרגיה הממוצעת של האטומים הנותרים, כשם שמולקולות מים המתאדות מעורנו

1. בליעת פוטון על ידי אטום היא רזוננטית, כלומר בתדירות אופיינית לאטום. כיוון שהאטום בתנועה, תדירות אור הלייזר הנבלע משתנה בהתאם לאפקט דופלר.



תרשים 3: פסי התאבכות שנוצרו על-ידי חפיפה של שני עיבויים שונים שמקורם בעיבויים שהתרחשו במלכודת שונות.

חדשים (על ידי מדידה של השינוי הזעיר שהם גורמים לקצב תנועת הכוכב אותו הם סובבים), לבחון שבירות סימטריה חלשות מאד בחוקי הפיסיקה ואף לאתר שינויים זעירים בכוח המשיכה, בעזרתם תוכלנה צוללות לנווט בקרקעית הים, וניתן יהיה לגלות מרבצי נפט ממכשירים מוטסים. יישום נוסף צפוי להיות בתחום הננו-טכנולוגיה. הדבר לא יקרה בשנים הקרובות ולא בטוח שזה הכיוון הדומיננטי בתחום. בהתעבות בוז-איינשטיין מתקבלים מיליוני אטומים בעלי אותה אנרגיה ואותו התנע - ועל כן הם זהים לחלוטין; מעין מיליון עותקים של אטום אחד. ניתן יהיה לנצל מקור זה ליצירת ליתוגרפיה אטומית שבה "בוניים" שבבים למיקרו אלקטרוניקה על ידי נידוף סלקטיבי של שכבות חומר דרך מסכות ננומטריות.

לקריאה נוספת

1. Cornell, E.A. and Wieman, C.E., The Bose-Einstein Condensate, Scientific American, March 1998.
2. Wieman, C. E., The Richtmyer Memorial Lecture: Bose-Einstein Condensation in an Ultra Cold Gas, Am. J. Phys. vol. 64, p. 847 (1996).

(gedanken experiments), כלומר ניסויים שלא ניתן לבצע בפועל.

בשנת 1996 הדגים קטרלי פסי התאבכות שנוצרו על ידי חפיפה של שני עיבויים שונים שמקורם בעיבויים שהתרחשו במלכודות שונות. בניגוד להתאבכות אטומים תרמיים שהודגמה מספר שנים קודם לכן, התאבכות העיבויים הוכיחה קוהרנטיות ארוכת טווח של גלי-חומר והיוותה המחשה דרמטית של התנהגות קוואנטית (גלית) בסקלה של מילימטרים - "סקלה ענקית" ביחס לממדים האטומיים הרגילים (תרשים 3).

מדידות מדויקות של הטמפרטורה הקריטית להתעבות, של גודלו וצורתו של העיבוי ושל התנהגות ועירורים (excitations) שונים בו, נערכו במגוון רחב של פרמטרים ניסיוניים: צפיפות, טמפרטורה וחוזק אינטראקציה. מדידות אלו, וכן הפשטות האינהרנטית של גז, איפשרו לחוקרים לאשר ולהבין את התיאוריה הפיסיקלית הבסיסית ולאחרונה גם להתחיל ולשפר אותה כך שתטפל במיקרים המסובכים יותר של מערכות בהן האינטראקציות חזקות כגון במוצק ובנוזל. כך למשל הושגה התקדמות כזו בהבנת תהליך העל-נוזליות, ביצירת מערבולות (vortices) קוואנטיות ובהבנתן, ובהתנהגויות לא יציבות של העיבוי.

אולי המדידה היפה ביותר, שהודגמה על ידי קטרלי, היא היכולת לצלם "סרטים" של התפתחות פונקציית הגל של העיבוי בזמן באופן שאינו הרסני (non-destructive). יכולת זאת עומדת לכאורה בסתירה לעקרון אי-הוודאות של הייזנברג (הקובע שביצוע מדידה הורס את המערכת הקוואנטית ומכניס בה אי-וודאות). היא נובעת מהעובדה שהעיבוי מכיל עותקים רבים וזהים של אותה פונקציית גל ולכן בכל "frame" של הסרט "הורסים" חלק קטן מהם אך מרבית העותקים שורדים וממשיכים להתפתח באופן שכמעט אינו מופרע על ידי המדידה.

שימושים

מעבר לחשיבות המדעית, הניסויים בהתעבות בוז-איינשטיין עשויים להביא לפיתוח יישומים חדשים בשני תחומים עיקריים: מדידות זמן מדויקות וננו-טכנולוגיה. בניית שעון אטומי מדויק המבוסס על עיבוי בוז-איינשטיין תאפשר לבצע מדידות מדויקות של זמן, מרחק, מסה או מתח חשמלי. כך לדוגמה, מערכת הניווט הלוויינית GPS, המשמשת כיום בעיקר לניווט מטוסים, יאכטות, מכוניות ואפילו הולכי רגל, מבוססת על שעון אטומי. מדידות מדויקות יאפשרו לגלות כוכבי לכת

3. Anglin, J.R. and Ketterle, W., Bose-Einstein Condensation of Atomic Gases, Nature vol. **416**, p. 211 (2002).
4. Bose-Einstein Condensation, www site at <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec> (כולל הדמיה יפה)

5. Chu, S., Laser Trapping of Neutral Particles, Scientific American, Feb. 1992.
6. גלברזון. ו. י., הליום 4 והליום 3 - שני על-נוזלים, פרס נובל בפיסיקה, תהודה(1)19, עמ' 5-13, 1998.
7. http://cua.mit.edu/ketterle_group/

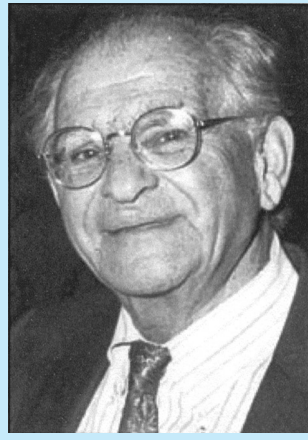
תהודה

ויקטור וייסקופף

1908 - 2002

במרכז מאיץ חלקיקים מהגדולים והחשובים בעולם.

וייסקופף ניחן בכישרון נדיר להסביר בעיות בפיסיקה בצורה בהירה. הוא אמר פעם: אם ברצונך לדעת אם הבנת בעיה בפיסיקה, צא לרחוב ונסה להסביר אותה לאיש הראשון שייקרה על דרכך. אם הצלחת סימן שהבנת את הבעיה. פרופסור עמוס דה שליט ז"ל, ממייסדי המחלקות לפיסיקה ולהוראת המדעים במכון וייצמן, היה מתלמידיו של וייסקופף ממנו למד כיצד להסביר דברים מסובכים בדרך פשוטה ומובנת. וייסקופף פרסם, בין השאר, את הספר הפופולארי "דעת ופליאה" (Knowledge and Wonder). הספר יצא לאור במסגרת תוכנית ה-PSSC. תוכנית זו פותחה בתחילת שנות הששים, על ידי אנשי מדע והוראה בכירים בארצות הברית, לקידום הוראת המדעים. התרגום העברי יצא לאור בספריית מדע לעם הוצאת דביר ועם עובד בשנת 1967. וייסקופף היה חבר באקדמיה הלאומית למדעים של ארצות הברית ועטור פרסים ומדליות לרוב, ביניהם פרס וולף היוקרתי ו-Legion d'Honneur הצרפתי. עם מותו נסתלק אחד מגדולי הפיסיקאים של המאה העשרים.



ויקטור וייסקופף הלך לעולמו ב-25.4.02 בגיל 93. הוא נולד בווינה ב-1908. בתחילת שנות השלושים סיים את עבודת הדוקטורט בפיסיקה באוניברסיטת גטינגן שבגרמניה, המשיך את מחקריו בקופנהגן, כבן טיפוחיו של נילס בוהר ואחר כך בשווייץ יחד עם וולפגנג פאולי. ב-1937, בעקבות רדיפות הנאצים, עזב את אירופה והיגר לארצות הברית. ב-1943 הצטרף לפרויקט מנהטן, מתוך ההבנה שהמרוץ הוא נגד הגרמנים. אולם הזעזוע בעקבות הפצצת הירושימה ונגסאקי הפך אותו ללוחם בלתי נלאה לאיסור השימוש בנשק גרעיני ולרתימת

האנרגיה הגרעינית לצורכי שלום בלבד. עם סיום פעילותו בפרויקט מנהטן חזר ל-MIT. וייסקופף היה פיסיקאי תיאורטי שעבד יחד עם גדולי הפיסיקאים בדורו, ביניהם הייזנברג, שרדינגר, בוהר ופאולי.

מחקריו של וייסקופף בשנות השלושים התמקדו ביישום תורת הקוואנטים לשדות אלקטרומגנטיים; בכך הקדים את התיאוריות שבשנת 1965 הביאו את פרס נובל לפיינמן טומונוגה ושווינגר בשנים 1961-1965 עמד בראש המרכז האירופי למחקר גרעיני CERN שבשווייץ. תחת ניהולו נבנה