

התאבכות קוואנטית ואפקט אהרונוב-בוהם

יוסף אמרי, מכון ויצמן למדע
ורי'רד א. ווב, המרכז למחקר של י.ב.מ. ע"ש תומס י. וואטסון¹

ישתנה המופע של פונקציית הגלים של האלקטרונים.
(כידוע, בתורת הקוואנטים אפשר לתאר אלקטרון לפעמים כגל, ולפעמים כחלקיק).

כיצד אפשר להסביר את השינוי במופע של פונקציית הגל של אלקטרון? אהרונוב ובוהם ניבאו שאפקט זה נגרם על ידי גודל פיסיקלי שהוא יסודי יותר משדות חשמליים ומגנטיים: **הפוטנציאל**, אשר הודות לקצב השתנותו במרחב ובזמן נוצרים שדות חשמליים ומגנטיים. עתה, שלושים שנה אחרי הניבוי הנועז, אושר אפקט אהרונוב-בוהם באופן חד משמעי וסופי בניסויים שבוצעו באלקטרונים הנעים בריק; ובארבע השנים האחרונות נצפה האפקט גם בתילים מוליכים זעירים בטמפרטורות נמוכות.

אפקטים כגון אפקט אהרונוב בוהם, המנוגדים לאינטואיציה, ממלאים תפקידים חשובים בתורת האינטראקציות האלקטרו-מגנטיות, בפיסיקה של המצב המוצק, ויתכן גם בפיתוח התקנים מיקרו-אלקטרוניים חדשים.

למרות שתורת הקוואנטים כבר כמעט בת מאה, יכולתה להגיע למסקנות באשר לטבע עולמנו, שהן בניגוד לאינטואיציה, בעינה עומדת. אחת ההפתעות האלה התרחשה כאשר בשנת 1959 הציעו אהרונוב ובוהם ניסוי רב אתגר. הם אמרו: תארו לכם מגנט המוקף בחומר מיסוך באופן שאינו מסוגל להפעיל כוח על מגנט אחר הנמצא בקרבתו. במילים אחרות, אין שום אפשרות לגלות השפעה כלשהי של השדה הנוצר על ידי המגנט הממוסך. למרות זאת ניבאו אהרונוב ובוהם שאם **אלומת אלקטרונים תעבור בקירבת המגנט הממוסך**

1. Quantum Interference and the Aharonov – Bohm Effect Yoseph Imry and Richard A. Webb. Scientific American, April 1989
Translated with permission. Copyright©1989 by Scientific American, Inc. All Rights Reserved.

הישר דרכם. אז היו נרשמות על סרט הצילום סדרה של פגיעות, ממש מאחורי הסדקים, והיו יחסית מעט פגיעות הצידה מן הסדקים. ברור שתיאור כזה אינו יכול להסביר את התבנית המורכבת אותה מקבלים על הסרט.

גישה טובה יותר, (אשר מתאימה להתנהגות האלקטרונים כפי שהיא מוסברת על ידי תורת הקוואנטים) תהיה להניח שחלקיקים מתנהגים כמו גלים. הגודל המאפיין גלים כשהם נעים במרחב ובזמן, הוא אמפליטודה המשתנה באופן מחזורי ממכסימום למינימום וחוזר חלילה. נוח לתאר את השתנות האמפליטודה ומאפיינים אחרים של הגל על ידי פונקציית גלים מתמטית. ניקח, לדוגמה, גל מים שגובהו משתנה ממטר אחד מעל פני המים עד למטר אחד מתחת לפני המים וחוזר חלילה. אפשר לתאר את הגל על ידי הפונקציה קוסינוס, היות שערכה של פונקציה זו משתנה מ-1 ל-1- וחזרה ל-1+, כאשר זווית המופע שלה משתנה מ-0 ל- π ול-2 π . הזווית המתאימה לגובה הרגעי מכונה זווית המופע.

פונקציית הגל המתמטית המתארת גל אלקטרון מיוצגת באמצעות האמפליטודה המכסימלית שלה וזווית המופע. האמפליטודה של גל אלקטרונים מתארת הסתברות הקשורה לעובדה, שאפשר לקבוע את המקום והמהירות של חלקיק רק עד כדי מידת דיוק מסויימת, ולא יותר. בפרט, ריבוע האמפליטודה של פונקציית הגל של אלקטרון נותן את ההסתברות להימצאו של האלקטרון במקום מסויים בזמן מסויים.

זווית המופע של פונקציית הגלים של אלקטרון חשובה במיוחד לתיאור הקשר בין שני גלים. אם שני גלים הם "בפאזה" (שווי מופע) במקום מסויים או ברגע מסויים, שני הגלים מצויים באותו חלק של המחזור שלהם, שניהם הגיעו יחד למכסימום או למינימום. אם שני גלים הם בהפרש מופע של π , פירוש הדבר שהאחד הגיע למכסימום בו בזמן שהשני הוא במינימום. אפשר גם לבטא את זווית המופע של גל האלקטרון באמצעות גדלים פיסיקליים יותר אינטואיטיביים. במקרים פשוטים קשור המופע למכפלת התנע במרחק אותו עבר גל האלקטרון, וגם למכפלת האנרגיה בזמן. מושגים אלה מספקים הסבר נאות לתבנית ההתאבכות המתקבלת בניסוי שני הסדקים. היות שהמקור פולט אלקטרונים שווי תנע ואנרגיה, פונקציות הגלים של אלקטרונים אלה הן שוות מופע במרחק נתון מן המקור (תוחת אלקטרונים), כלומר הגלים הם קוהרנטיים. כאשר גל אלקטרון עובר את שני הסדקים, הוא מתחלק לגלים חלקיים. היות שהגלים החלקיים עברו מרחקים שווים אל כל סדק, הגל החלקי היוצא מן הסדק השמאלי הוא

לאפקט אהרונוב-בוהם היתה השפעה רבה על דרך המחשבה של הפיסיקאים בכל הנוגע לאלקטרודינמיקה. היה ידוע כבר זמן רב, שמטען חיובי העובר בקירבת מטען שלילי הנמצא במנוחה, אך אינו נוגע בו, יואץ וישנה את כיוון תנועתו. על מנת להסביר תופעה מעין זאת, הידועה כפעולה מרחוק

(action at a distance), הניח מיכאל פאראדי ב-1846, שמטענים נתקלים בשדות המפעילים כוחות חשמליים ומגנטיים. ממה שהיה ידוע אז, אפשר היה, באמצעות שדות, לתאר את הדינמיקה של מטענים בשלמות. כאשר פותחו תורת היחסות ותורת הקוואנטים, הופיעו הפוטנציאלים, ולא השדות, במשוואות מכניקת הקוואנטים; ומשוואות תורת היחסות קיבלו צורה מתימטית פשוטה וקומפקטית, כאשר ביטאו את השדות באמצעות פוטנציאלים. הניסויים שהוצעו על ידי אהרונוב ובוהם חשפו את המשמעות הפיסיקלית של הפוטנציאלים: **חלקיק טעון העובר בקירבת שדה מגנטי או חשמלי, אבל בשום אופן אינו נתקל בו, בכל זאת ישנה את אופי תנועתו בדרך מורכבת (subtle), אך ניתנת למדידה.** המסקנה מאפקט אהרונוב-בוהם היא שהפוטנציאלים, ולא השדות, הם אלה הפועלים ישירות על המטענים.

פיסיקאים חוקרים את ההשלכות הרחבות של האפקט בתחומים המשתרעים מאפקט Hall הקוואנטי ועל-מוליכות עד לתאוריית ה-superstrings. ייתכן ובעתיד תהיה לאפקט אהרונוב-בוהם השפעה מרחיקת לכת אפילו באלקטרוניקה. בסוף המאה הנוכחית מקווים יצרנים לייצר שבבי צורן ששטחם סנטימטר רבוע, המכילים עד 100 מיליון רכיבים. אם אמנם רוצים להגיע למספר זה או לעלות עליו, יש להתבסס על עקרונות פיסיקליים חדשים לגמרי. אפקט אהרונוב-בוהם עשוי להראות את הדרך לטכנולוגיה כזאת.

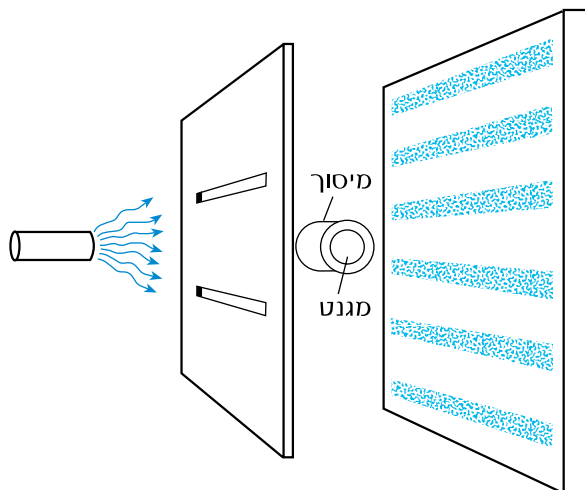
ניסוי התאבכות בשני סדקים מהווה הוכחה נאה לאופיים הגלי של אלקטרונים, ומהווה בסיס להבנת אפקט אהרונוב-בוהם. בניסוי כזה פולט מקור מתאים אלומת אלקטרונים בעלי שווי אנרגיה. מכוונים את האלומה אל לוח הבולע אלקטרונים. בלוח זה מצויים שני סדקים צרים, קרובים זה לזה. הם ממוקמים משמאל ומימין וסמוך לנקודה בה פוגעת האלומה. מאחורי הלוח ממוקם סרט צילום בו נרשם כתם בהיר בכל פעם שאלקטרון פוגע בו. אחרי שמקור האלקטרונים פלט אלקטרונים רבים, מתקבלת על הסרט סדרה של פסים כהים ובהירים. במרכז יש פס בהיר שמשני צדיו פסים כהים, ולצד כל אחד מאלה פסים בהירים, וכן הלאה, (ראה **תרשים 1א**). כיצד יצרו אלקטרונים תבנית התאבכות זאת? לו אלקטרונים היו דומים לכדורי רובה, היו מוחזרים מן הסדקים, או עוברים

תבנית ההתאבכות חוזרת לצורתה המקורית.

נראה, כי בניסוי התאבכות חדש זה שונו המופעים של גלי החלקיקים, השמאלי והימני, האחד ביחס לשני, למרות שהשדה המגנטי היה כלוא כולו בתוך הסילונית פנימה. שינוי המופע של פונקציית הגל של אלקטרון בתחום בו **אין שדה מגנטי** הוא אחד הדרכים בהם מתגלה אפקט אהרונוב-בוהם.

האפקט הצביע על כך, ששינוי המופע של פונקציית הגל צריך להיות קשור לישות פיסיקלית שמקומה מחוץ לשדה המגנטי הכלוא. אהרונוב ובוהם הסיקו מן המשוואות היסודיות של מכניקת הקוואנטים, ששינוי המופע נובע מגודל הקיים בכל מקום בתוך שדה מגנטי וסביבו, והמכונה **הפוטנציאל המגנטי הווקטורי**. למרות העובדה שהפוטנציאל הווקטורי הוא שדה ווקטורי במובן זה שיש לו גודל וכיוון בכל נקודה במרחב, ועשוי להשתנות עם הזמן, אפשר למדוד אותו ישירות רק על ידי בדיקת שינויים במופע של פונקציות גלים. השינויים במופע הנגרמים על ידי הפוטנציאל הווקטורי מסבירים את כל האפקטים המגנטיים הניתנים למדידה על חלקיקים טעונים.

כיצד פעל הפוטנציאל הווקטורי על המופע של אלקטרון בניסוי שני הסדקים? כאשר הגלים החלקיים, השמאלי והימני, עברו בתחום חסר השדה שבקירבת הסילונית, שינה הפוטנציאל הווקטורי את התנע של הגל החלקי השמאלי יחסית לתנע של הגל החלקי הימני, מבלי לשנות את האנרגיה הקינטית שלו.



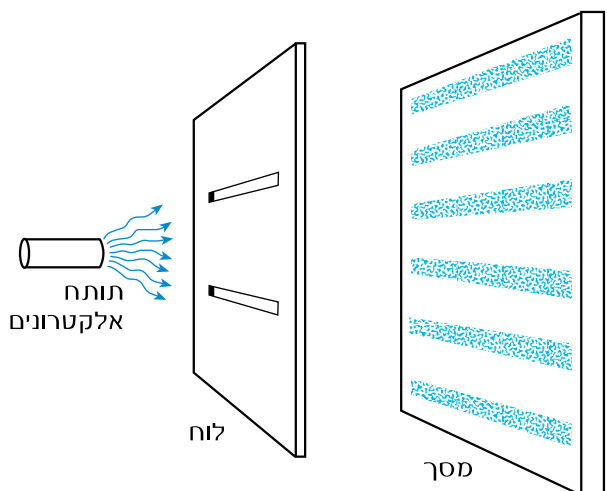
תרשים 1 ב':

כאשר מגנט גורם להתהוות פוטנציאל ווקטורי, תבנית ההתאבכות מוסחת תודות לאפקט אהרונוב-בוהם.

שווה-מופע עם הגל החלקי, היוצא מן הסדק הימני. לפיכך, בנקודה הנמצאת במרחקים שווים משני הסדקים, יהיו הגלים החלקיים, השמאלי והימני, שווי המופע. לפיכך הם יוצרים התאבכות בונה, מחזקים האחד את השני, ויוצרים פס בהיר במרכז הסרט. אפשר גם לומר שהפסים הבהירים מייצגים את העובדה שלאלקטרונים הסתברות פי שניים יותר גדולה להגיע אליהם, מאשר לנקודה ממוצעת על הסרט.

אלום משמאל לפס הבהיר, הגל החלקי הימני צריך לעבור מרחק גדול יותר, מאשר הגל החלקי השמאלי. לפיכך, בנקודות מסוימות משמאל, יהיו שני הגלים במופע הפוך, יבטלו זה את זה, ויווצר פס כהה (היות שהסתברות האלקטרונים להגיע לשם קרובה לאפס). בנקודה הנמצאת עוד יותר שמאלה על הסרט עבר הגל הימני מרחק כזה שהוא נמצא בפיגור מופע של מחזור שלם ביחס לגל השמאלי. כלומר, הגלים יהיו שוב שווי מופע, ויווצר פס בהיר נוסף (של הסתברות גדולה).

כדי שאפשר יהיה לראות את אפקט אהרונוב-בוהם, יש להכניס שינוי קל בניסוי שני הסדקים: מאחורי הלוח ובסמוך לו, בין שני הסדקים, מציבים סילונית ארוכה מאוד, שהשדה המגנטי שלה כולו בתוכה, ושמחוצה לה אין כלל שדה חשמלי או מגנטי. (**תרשים 1 א'**) עתה, כאשר אלומת אלקטרונים עוברת את שני הסדקים, וממשיכה ליד הסילונית, נרשמת על הסרט תבנית התאבכות חדשה. התבנית החדשה מוסחת יחסית לתבנית שנוצרה ללא הסילונית, באופן שהפסים שהיו קודם בהירים, נראים כהים יותר, ופסים שהיו כהים נראים בהירים יותר. כאשר השדה המגנטי של הסילונית מבוטל,



תרשים 1 א':

ניסוי התאבכות בשני סדקים מראה את התכונות הגליות של אלקטרונים. תוחח אלקטרונים פולט אלומת אלקטרונים הנעה אל שני סדקים בלוח. פונקציות הגלים של האלקטרונים עוברות דרך הסדקים ויוצרות תבנית התאבכות.

קשור לאנרגיה הכוללת ולזמן מעברו של האלקטרון, המופע של פונקציית גל אחת משתנה יחסית למופע של השניה.

זמן קצר אחרי שניבאו אהרונוב ובוהם את השפעת הפוטנציאלים, המגנטי והחשמלי, על המופעים של חלקיקים טעונים, התחילו פיסיקאים בניסויים. רוברט ג. צ'מברס² מאוניברסיטת בריסטול ביצע את הניסוי הראשון ב-1960. במיקרוסקופ אלקטרונים יצרו אלומה קוהרנטית של אלקטרונים ופיצלו אותה לשניים על ידי סיב קווארץ שקוטרו $1.5\mu\text{m}$. המצופה באלומיניום. נתקבלה תבנית התאבכות הדומה לזו שנוצרה בניסוי שני הסדקים. כאשר שמו תייל ברזל ממוגנט, שקוטרו $1\mu\text{m}$, מאחורי סיב הקווארץ, התבנית הוסחה. צ'מברס טען שהשדה המגנטי שנוצר על ידי תייל הברזל בתחום בו עברו האלקטרונים היה חלש הרבה יותר מדי מכדי להסביר את גודלה של ההסחה שנצפתה. הוא הסיק שהפוטנציאל הווקטורי גרם לשינוי במופע של פונקציית הגל של האלקטרונים, כפי שנובא על ידי אהרונוב ובוהם.

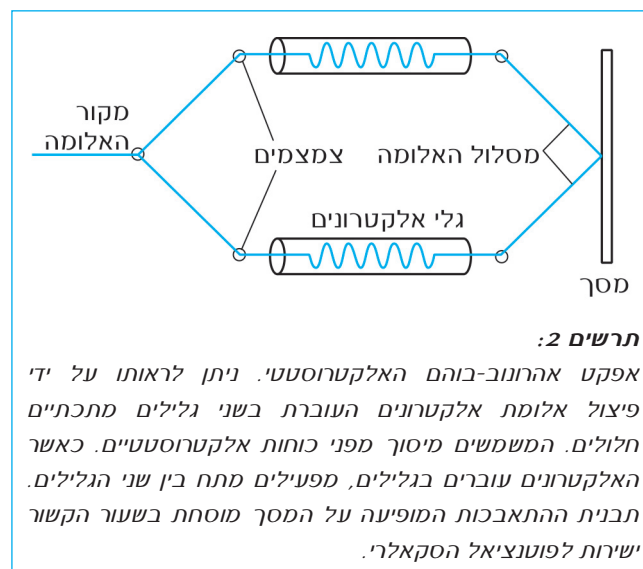
מספר חוקרים לא קיבלו את מסקנתו של צ'מברס. היות שהוא לא כלא את השדה המגנטי בשלמות בתחום קטן במרחב, טענו אחדים מהם שהכוח שהשדה המגנטי הפעיל על האלקטרונים כיסה על תרומת הפוטנציאל הווקטורי להסחה של תבנית ההתאבכות.

ב-1986 פתרו אקירה טונומורה³ ועמיתיו בחברת היטאצ'י בטוקיו את הבעיה של כליאת השדה המגנטי, לפי הצעתו של צ'רלס קופר (Charles Kuper) מן הטכניון בחיפה. טונומורה ידע שחומר מגנטי הומוגני בצורת טבעת תלת מימדית "בייגל", (toroid) הוא בעל שדה מעגלי הכלוא כולו בתוך הטורואיד. אולם, היות שלכל החומרים יש פגמים מסוימים, יהיה מגנט טורואידלי למעשה בעל שדה מגנטי חלש מסביבו, כלומר השדה שלו לא יהיה כלוא כולו. אפשר לכלוא שדה זה, הקרוי שדה של זליגה, על ידי ציפוי המגנט בחומר על-מוליך. לפיכך, בנה טונומורה מגנט טורואידלי וציפה אותו בשכבת ניוביום ההופך לעל-מוליך בעמפרטורות מתחת ל- 9.1K . סידור זה הבטיח, שפחות מ-1% של השדה המגנטי שבתוך המגנט הטורואידלי יחדור אל תוך החלל המרכזי (ראה **תרשים 3**). הם יצרו אלומת אלקטרונים בריק, ופיצלו אותה לשניים, באופן שאלומה אחת עברה בחלל שבמרכז הטורואיד, והשניה עברה מחוצה לו.

היות שהמופע של פונקציית גלים קשור לתנע שלה, משתנה המופע של הגל החלקי השמאלי יחסית לזה של הגל החלקי הימני.

לפוטנציאל הווקטורי המגנטי ולאפקט אהרונוב-בוהם יש מקבילים באינטראקציות חשמליות: הפוטנציאל החשמלי הסקלארי ואפקט אהרונוב-בוהם האלקטרוסטטי. הפוטנציאל החשמלי הסקלארי איננו שדה ווקטורי, יש לו רק **גודל** בכל נקודה במרחב. למרות שאי אפשר לקבוע את הגודל המוחלט של הפוטנציאל, הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות הוא האנרגיה הדרושה כדי להעביר יחידת מטען מנקודה אחת לשניה. הפרש פוטנציאלים זה נמדד בדרך כלל בוולטים. בדומה לפוטנציאל הווקטורי, גם הפוטנציאל הסקלארי החשמלי עשוי לחולל הסחת מופע של פונקציית גל של אלקטרון. אפקט אהרונוב-בוהם האלקטרוסטטי הוא הסחת המופע של פונקציית גל של אלקטרון הודות לפוטנציאל החשמלי הסקלארי בתחום בו **אין שדה חשמלי**.

אפשר להסביר את אפקט אהרונוב-בוהם האלקטרוסטטי באמצעות ניסוי מחשבתי (**תרשים 2**).



אלומת אלקטרונים מפוצלת לשני גלים חלקיים. כל גל חלקי מכווון לחלק הפנימי של גליל מתכת חלול. אחרי שהגלים החלקיים נכנסים לתוך כל גליל, מפעילים הפרש פוטנציאלים בין שני הגלילים. לפני שהאלקטרונים יוצאים מן הגלילים, מבטלים את המתח ביניהם; באופן זה האלקטרונים אינם חשים כוח חשמלי. אולם הפרש האנרגיה הכולל בין שני הגלים משתנה בשעור השווה למטען האלקטרון כפול בהפרש הפוטנציאלים בין שני הגלילים. היות שהמופע של פונקציית הגל של אלקטרון

2. Robert G. Chambers, University of Bristol, U.K.
3. Akira Tonomura and colleagues, Hitachi Ltd, Tokyo

כתוצאה מכך שינה הפוטנציאל הווקטורי את המופע של האלקטרונים שעברו בחלל הפנימי של הטורואיד יחסית למופע של האלקטרונים שעברו מחוצה לו. פירוש הדבר (וזוה תלוי במערך הניסוי) שבמקרים אחדים תבנית ההתאבכות שמאחורי החלל הפנימי של הטורואיד התאימה בדיוק לתבנית הייחוס, ובמקרים אחרים התבנית שמאחורי החלל הפנימי הוסחה יחסית לתבנית הייחוס (תרשים 3). בכל מקרה, הניסוי נתן אישור חד-משמעי של תפקיד הפוטנציאל הווקטורי בשינוי המופעים של גלי האלקטרונים, בתחום בו לא שורר שדה מגנטי.

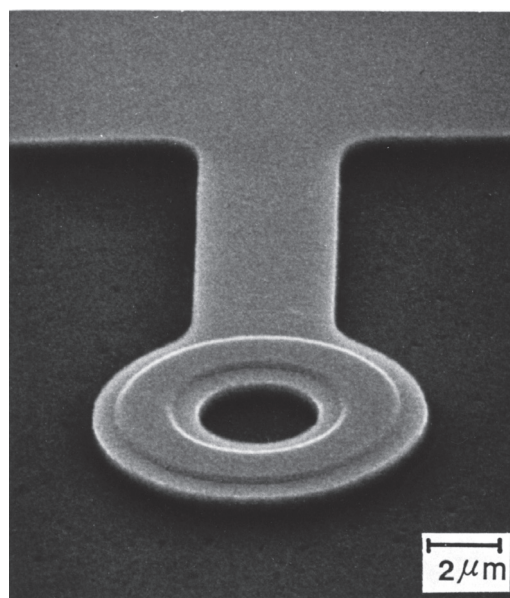
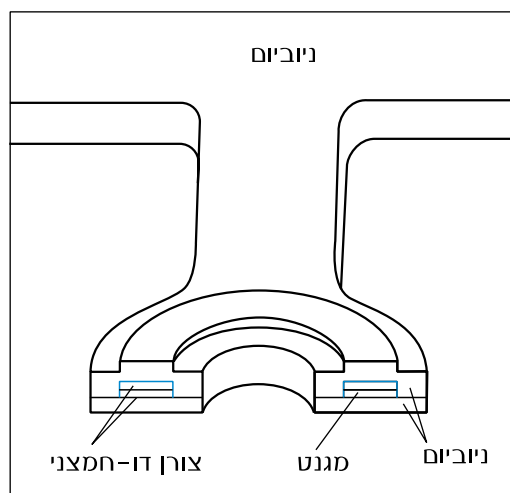
כאשר אלקטרונים נעים בריק, אפשר לצפות באפקט אהרונוב-בוהם, כי המופע של גל האלקטרונים נשאר מוגדר היטב, גם כאשר הגל מתפצל ונוצרת תבנית התאבכות. יותר קשה לצפות באפקט במוצקים, כי האלקטרונים מפוזרים על ידי פגמים שונים בשריג הגבישי.

אף על פי שבכל מוצק קיימת מידה מסויימת של פיזור, פותחו בעשור האחרון שיטות שונות המקטינות את הפיזור עד כדי כך, שהאלקטרונים נעים במוצק כמעט כאילו נעו בווקואום⁴. אולם היתה זאת העובדה, שקיימים שני סוגי פיזור במוליכים מוצקים: פיזור אלסטי ופיזור לא אלסטי, שהולכה לתגליות הראשונות של אפקט אהרונוב-בוהם ואפקטים קוואנטיים של התאבכות במוצקים.

פיזור לא אלסטי מתרחש, כאשר האטומים מהם מורכב מוליך מוצק, מחליפים אנרגיה עם אלקטרון. נדייק: הפיזור הלא אלסטי ישנה את פונקציית הגלים של האטומים במוצק, כלומר הפיזור גורם לשינוי במצב הקוואנטי של הסביבה בה נע האלקטרון. לדוגמה, האלקטרון יכול לקלוט אנרגיה, או למסור אנרגיה, לתנודות האטומים בשריג גבישי. דרך אחת להקטנת פיזור לא אלסטי היא להגביל את האנרגיה העומדת לרשות אינטראקציות אלה. אם מקטינים את כמות האנרגיה המצויה בשריג הגבישי ובמערכת האלקטרונים במידה מספקת, כמעט ולא יתרחשו פיזורים לא אלסטיים. הדרך להקטין אנרגיה זו היא לקרר את התייל לטמפרטורות נמוכות. בטמפרטורות של מעלות קלוין אחדות, שקל יחסית להגיע אליהן, האלקטרונים במתכות רבות מסוגלים לנוע מרחק של אלפים אחדים של אטומים ($\sim 1\mu$) מבלי שיתנגשו התנגשות לא אלסטית עם אטומים.

לקרור של מוליך מוצק לטמפרטורות נמוכות יש תוצאה חיובית נוספת. טווח האנרגיות של האלקטרונים הנעים

יחד יצרו שתי האלומות תבנית התאבכות על סרט שהוצב מאחורי החלל שבמרכז הטורואיד ובסמוך לו. בו זמנית יצרו תבנית התאבכות שניה למטרת ייחוס. כאשר הניוביום קורר לטמפרטורה שמתחת ל-9.1K, והפך להיות על-מוליך, הוגבל השדה המגנטי לעוצמה מסויימת על ידי חוקי העל-מוליכות, ולכן הפוטנציאל הווקטורי בחלל הפנימי של הטורואיד לא היה יכול לעלות על ערך גבולי מסויים.

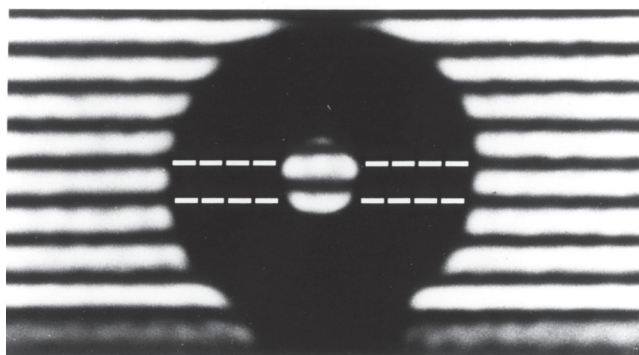


תרשים 3:

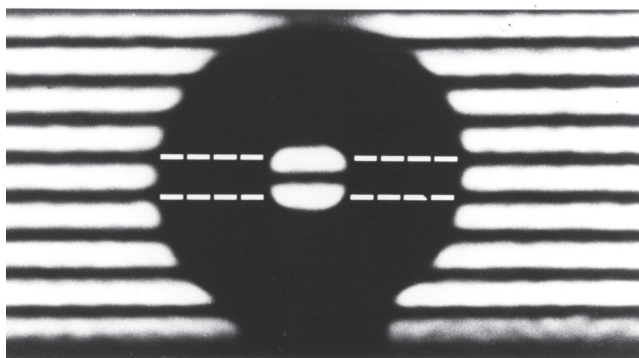
המגנט הטורואידלי ושכבת הניוביום בהם השתמשו בניסויים של טונומורה מוצגים בתצלום ובאיור. המגנט שרוחבו 5 מיקרונים, עשוי מנתך המכיל 83% ניקל ו-17% ברזל. ציפוי העשוי מתחמוצת צורן מבודד את המגנט מן הניוביום.

4. ראה לדוגמה: "Ballistic Electrons in Semiconductors", M. Heiblum and L.F. Eastman, Scientific American, Feb 1987

פרופורציונית, בקירוב, להסתברות המעבר של אלקטרונים בתייל מחולקת ביחידה קוואנטית יסודית של התנגדות: 25812Ω . ערך זה שווה לקבוע של פלנק מחולק בריבוע מטען האלקטרון: h/e^2 . ערך זה של התנגדות הוא הערך ההופכי ליחידת מוליכות Hall המקוונטת⁶.



T = 15 K



T = 5 K

תרשים 4:

תבניות התאבכות מראות את אפקט אהרנוב-בוהם. חלק מאלומת האלקטרונים עוברת בחלל הפנימי של מגנט טורואידי המצופה בניוביום. החלק השני עובר מחוץ לטורואיד. שתי האלומות יוצרות תבנית התאבכות (תרשים א3). תבנית הרקע נגרמה על ידי אלקטרונים שעברו מחוץ לטורואיד. תבנית ההתאבכות המוקפת על ידי הטורואיד מוסחת ביחס לתבנית הרקע, אף על פי שהאלקטרונים עברו באזור חסר שדה מגנטי: אפקט המיסוך נגרם על ידי קרור הניוביום מתחת ל-9.1K, טמפרטורה בה הוא הופך לעל-מוליך. הסחה זו, כפי שנובא על ידי אהרנוב ובוהם, היא תוצאה של אינטראקציה בין גלי האלקטרונים והפוטנציאל הווקטורי שקיים אפילו בהעדר שדה מגנטי. כאשר מחממים את ציפוי הניוביום מעל ל-9.1K (תרשים ב3), הוא חדל להיות על-מוליך, השדה המגנטי שהיה כלוא בתוך המגנט הטורואידי משתנה, ותבנית ההתאבכות מוסחת לפתע. אקירה טונומורה ועמיתיו ביצעו ניסוי זה ב-1986 במעבדות חברת היטאצ'י בע"מ בטוקיו.

במוצק הולך וקטן כאשר הטמפרטורות יורדות. בטמפרטורות הנמוכות מספיק, כדי שפיזור לא-אלסטי יהיה בעל סבירות נמוכה, טווח האנרגיות הוא צר עד כדי כך, שכל האלקטרונים הנעים בתייל הם למעשה שווי אנרגיה. מכאן שכל האלקטרונים במוצק מתאבכים למעשה באותו אופן.

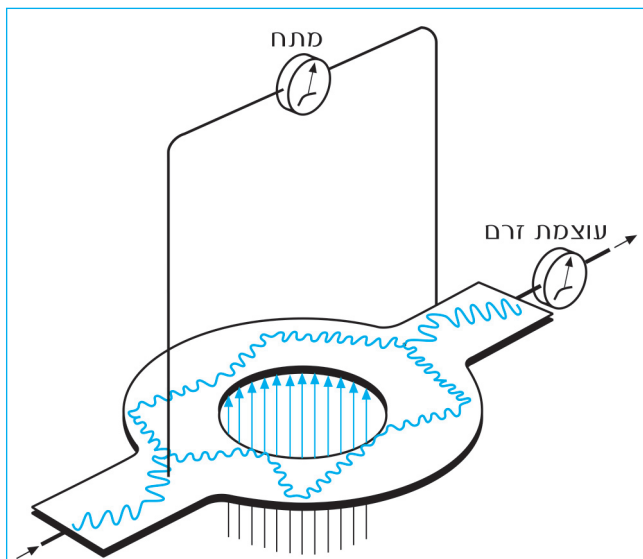
פיזור אלסטי מתרחש, כאשר אלקטרון נתקל בפוטנציאל סטאטי, כגון זיהום או פגם בשריג הגבישי. פוטנציאל סטאטי משנה את המופע של פונקציית הגל של האלקטרון, אבל לא את האנרגיה הכוללת שלו. אף על פי שהתפלגות אקראית של פוטנציאלים סטאטיים במוצק תגרום לשינוי מסובך במופע, התלוי בתכונות הזיהום, יהיה שינוי זה עובר כל אלקטרון הנע במסלול מסוים ובאנרגיה מסוימת. מתברר, שכאשר הטמפרטורה מתקרבת לאפס המוחלט, יתרחש רק פיזור אלסטי של גל האלקטרון; דבר זה מביא לידי שינוי מופע משמעותי אבל קבוע, ואינו מסתיר אפקטים של התאבכות אלקטרונים במוליך מוצק. זה היה המפתח לגילוי אפקטים קוואנטיים של התאבכות במוצקים.

אלם במציאות, במוליכים מוצקים בטמפרטורות נמוכות, עדיין קיים פיזור לא אלסטי במידה מסוימת, ודבר זה גורם לאי-וודאות מסוימת במופע של פונקציית הגל של האלקטרון. כאשר הגודל של המוליך קטן, קטן גם מספר האירועים הגוררים בעקבותיהם שינוי מופע אקראי. כדי שאפשר יהיה לצפות בהתאבכות קוואנטית, חייב המוליך להיות קטן עד כדי כך שלמעשה לא יתרחש בו פיזור לא אלסטי. ניסויים הראו, שלמרות שתייל מתכתי שעוביו 0.03μ , רוחבו 0.03μ ואורכו 1μ מכיל קרוב ל- 10^8 אטומים, המופע של פונקציית גל של אלקטרונים הנעים בתייל יחשאר קבוע בטמפרטורות מתחת ל-1K.

כדי למדוד אפקטים של התאבכות אלקטרונים במוליכים מוצקים, יש לתרגם את המכניקה של גלי האלקטרונים לגדלים פיסיקליים הניתנים למדידה בקלות. כאשר גל אלקטרונים נע לאורך תייל קטן בטמפרטורה נמוכה, חלק אחד של הגל מפוזר מקצה אחד של התייל לקצה השני, בו בזמן שחלקים אחרים של הגל מוחזרים חזרה לנקודת המוצא שלהם. ההתנגדות החשמלית של התייל היא מידה לקושי של האלקטרון לעבור מקצה אחד של התייל לקצה השני, ולהיפך, המוליכות של התייל היא מידה של הקלות בה נעה פונקציית הגל. לפני יותר מ-25 שנים פיתח רולף לנדאואר⁵ מסגרת תיאורטית, בה מבוטאת המוליכות החשמלית באמצעות ההסתברות שגל אלקטרונים יעבור בתייל. עבודתו מראה, שהמוליכות

5. Rolf Landauer, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, N.Y.
6. י. אמרי: "מוליכות הול הקוואנטית", "מדע", כרך ל', מס' 1, עמ' 28, 1986.

החוקרים ראו שההתנגדות החשמלית של הטבעת השתנתה באופן מחזורי כאשר השדה המגנטי גדל. דבר זה מתאים למה שידוע על אפקט אהרונוב-בוהם ופוטנציאלים. גלי האלקטרונים שעברו בטבעת בכיוון השעון התאבכו עם גלי האלקטרונים שעברו בטבעת נגד כיוון השעון. כאשר הגדילו את השדה המגנטי (ואיתו את הפוטנציאל הווקטורי), השתנה המופע של הגלים שנעו בכיוון השעון יחסית לאלה שנעו נגד כיוון השעון. כאשר המופע השתנה במחזור שלם על ידי הפוטנציאל הווקטורי, התנגדות הטבעת התנוודדה. מחזור התנודה הממוצע, כשהוא מבוטא באמצעות השדה המגנטי, היה $0.0076T$. גודל זה, כפול בשטח הממוצע המוקף על ידי הטבעת, נותן ערך קוואנטום-מיכני יסודי, השווה לקבוע של פלנק מחולק במטען האלקטרון h/e , בהתאם לניבוי התיאורטי.

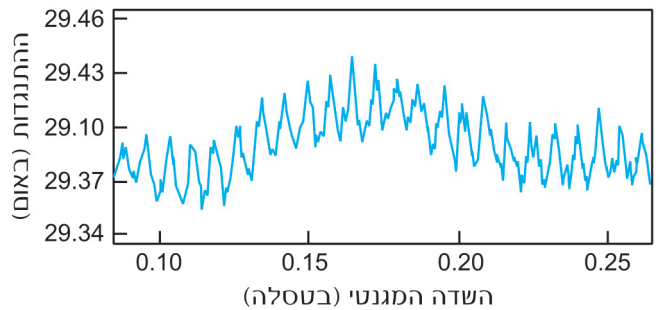


תרשים 6:

הטבעת מודדת את אפקט אהרונוב-בוהם במוליכים מוצקים. גלי אלקטרון נכנסים משמאל ומפוזרים בטבעת, אשר קורה לתמפרטורות נמוכות. שדה פוטנציאלי וקטורי של שדה מגנטי (חיצים) מסיח את המופע של פונקציית הגל של האלקטרונים ומשנה את ההתנגדות החשמלית של הטבעת, הנקבעת על ידי מדידת המתח ועוצמת הזרם.

הגודל של התנודות בהתנגדות במקרה המתואר לעיל היה קטן מאוד, בקירוב 0.1% מן ההתנגדות הכוללת של הטבעת. פרובר (D.E. Prober, Yale), דאטה (Supriyo Datta, Purdue University) ועמיתיהם אישרו עד מהרה את התנודות בהתנגדות במתכות אחרות ובמוליכים למחצה.

גורם התורם להסתברות המעבר של האלקטרון במוליך, ולמוליכות, הוא ההתאבכות של פונקציות הגל. מרקוס ביטיקר (Markus Buttiker), לנדאואר ואחד מאיתנו (י. אמרי) פיתחו תיאוריה על טבעות מתכתיות אשר לפיה פיזור אלסטי אינו הורס אפקטים קוואנטיים של התאבכות. יובל גפן, מרק י. אשבל ואחד מאיתנו (י. אמרי) ניבאו ב-1984, שכתוצאה מאפקט אהרונוב-בוהם, ההתנגדות החשמלית של טבעת מתכתית תתנוודד באופן מחזורי, כאשר שדה מגנטי המשתנה באופן מונוטוני מופעל במרכז הטבעת (תרשים 5). כאשר פונקציות הגלים של האלקטרונים העוברות בשני קטעים שונים של הטבעת מחזקות אחת את השניה, הסתברות המעבר, ולכן המוליכות, צריכות לגדול. כאשר פונקציות הגלים מבטלות אחת את השניה, הסתברות המעבר ואיתה המוליכות, צריכות לקטון. לפיכך מצפים, שהמוליכות של תייל תתנוודד בין שני ערכים קיצוניים. ב-1981 ניבאו אלטשולר, ארונוב וספיבק⁷ אפקט דומה, ושארבין ובנו⁸ אישרו ניבוי זה בניסוי.



תרשים 5:

אפקט אהרונוב-בוהם מסביר את התנודות בהתנגדות החשמלית של הטבעת.

אחד מאיתנו (Webb). העובד עם וואשבורן, אומבאך ולייבוויץ⁹ הראה את אפקט אהרונוב-בוהם לראשונה בטבעות מתכתיות קטנות ב-1985. הקבוצה הכינה טבעת זהב על מצע צורן טבעתי שטוח (silicon wafer). הקוטר הפנימי של הטבעת היה $0.86\mu m$. הם הזרימו זרם דרך תייל שחובר לצד אחד של הטבעת לתייל שני שחובר לצידה הנגדי; (תרשים 6). תילים נוספים חוברו לכל אחד מהתילים הנ"ל, קרוב לטבעת, כדי למדוד את המתח בין קצות הטבעת. המתח מחולק בעוצמת הזרם נתן את התנגדות הטבעות. שדה מגנטי שהופעל בכיוון מאונך (ראה תרשים 5) יצר פוטנציאל ווקטורי במישור המדגם.

7. Boris L. Al'tshuler, Arkady Aronov and Boris Spivak Leningrad Institute of Nuclear Physics .

8. Y.V. Sharvin and D.Y. Sharvin, Institute for Physical Problems, Moscow .

9. Sean Washburn, Corwin P. Umbach and Robert R. Laibowitz, I.B.M Thomas J. Watson Research Center .

בעתיד האלקטרוניקה. מאז גילוי הטרנסיסטור, הלכו וקטנו כל הזמן הממדים של התקנים אלקטרוניים, עד לנקודה בה רוחב של תייל הוא רק כ-1000 אטומים. בד בבד הלך וגדל הספק החום ליחידת שטח, הנפלט על ידי שבבי מחשב (computer chips). אם לא יפותחו התקנים חדשים, הפועלים באמינות וצורכים פחות הספק, יגיעו לגבול של מספר הרכיבים לכל שבב, דבר זה יגביל, בסופו של דבר, את מהירות הפעולה של התקנים אלקטרוניים. מחקר חדש של אפקטים של התאבכות קוואנטית רומז על כך, שניתן יהיה לפתח התקנים אלקטרוניים חדשים הפולטים הספקי חום קטנים ביותר. כבר נבדק אב-טיפוס ניסיוני של התקן כזה בסביבה בעלת טמפרטורה נמוכה. התקן זה שולט על התנגדות ומתח על ידי שימוש בפוטנציאל המשפיע על תכונות הגל האופייניות לאלקטרון. בעתיד הקרוב, כאשר הגודל של רכיבים אלקטרוניים ימשיך להצטמצם, יתכן ויוכלו לבנות התקנים בהם ההתנהגות הקוואנטום-מיכנית של אלקטרונים תמשיך להתקיים גם בטמפרטורות גבוהות הרבה יותר. לדעתנו העובדה שאפקט אהרונוב-בוהם, ואפקטים אחרים של התאבכות קוואנטית, מצאו את דרכם לניסויים המתבצעים במדגמים של חיי יום-יום, היא מרשימה ביותר.



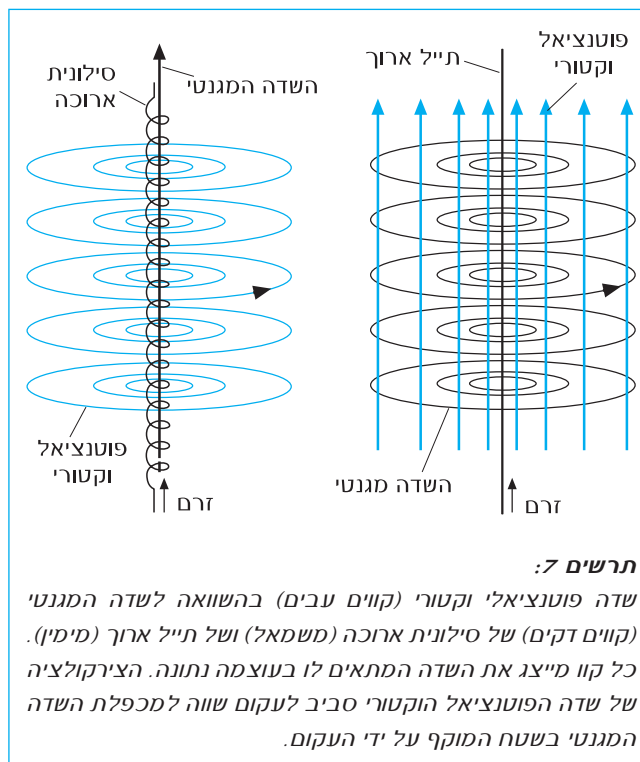
תרשים 8:

התקן מיתוג המבוסס על אפקט אהרונוב-בוהם. לולאה עשויה מאנטימון, שצלעה 0.8μ , נמצאת בין שני תיילים. על ידי הפעלת מתח על כל אחד מתיילים אלה או על שניהם, משנים את המופע של האלקטרונים העוברים דרך הלולאה, ודבר זה גורם לשינוי המתח ביציאה.

המאמר המופיע כאן לקוח מ"תהודה" (1) 14, עמ' 3, 1990

תהודה

לאחרונה בוצעו ניסויים על ידי קבוצות רבות אחרות, בהן נצפו תנודות במוליכות עד כדי 50% מן ההתנגדות הכוללת. יתרה מזו, התנודות במוליכות של מדגמים אלה הן בלתי תלויות בהתנגדות הממוצעת, וערכן שווה בקירוב ל- e^2/h . עובדה אוניברסלית זאת (כלומר, תנודות בהתנגדות שהן בלתי תלויות בחומר ובזיהומים שבו) נובאה לראשונה על ידי אלטשולר (Patrick A.Lee, MIT), וזמן קצר לאחר מכן על ידי (Yale University) A. Douglas Stone.



האישור הניסיוני של אפקט אהרונוב-בוהם פתח שדה מחקר חדש, אשר בו אפשר לחקור את האופי הקוואנטי של תנועת אלקטרון במוצק בתחום הנמצא בין אטומים לעצמים מאקרוסקופיים. מערכות "מזוסקופיות" (mesoscopic) כאלה, אשר גדולות בהרבה מאלקטרון או מולקולה, ניתנות להפעלה ולמדידה על ידי אמצעים מאקרוסקופיים, אך הן עדיין נוהגות לפי חוקי הפיסיקה המיקרוסקופית. במערכות אלה ניתן לגלות לדוגמא את האפקטים המיוחדים של מכניקת הקוואנטים, במדידות חשמליות רגילות. זה כאילו שיכולנו למדוד את התנגדות האלקטרונים בתנועתם בתוך האטומים. מערכות אלה תעזרנה לנו להשיב על שאלות יסודיות, כגון מה צריך להיות גודלה של מערכת כדי שתתנהג באופן מקרוסקופי. האפקט של אהרונוב-בוהם והתאבכות קוואנטית מעניינים בזכות עצמם, אך הם גם עשויים למלא תפקיד חשוב במיוחד