

על מוליכות וחיות אחרות

רונן

23 בספטמבר 2015

1 רקע

היום אני הולך לדבר על פיזיקה. אני הולך לדבר על אחת מהתופעות הפיזיקליות המגניבות ביותר שנחקרו במהלך המאה העשרים (ועדיין נחקרות במרץ). אני הולך לדבר אתכם על תופעה פיזיקלית שלפעמים נראית כמו קסם, אבל הישום שלה הוא מאוד מסובך. אני הולך לדבר אתכם על תופעה פיזיקלית שמוזכרת, ישירות מעט מאוד ביצירות מדע בדיוני במישרין, אבל לפעמים היא יכולה להיות הטכנובלל שמאחורי הקלעים. השנה היא 2015. מרטי מקפליי בדיוק צץ עם הדלוריאן שלו בהיל ואל, קליפורניה וצריך לברוח מגריף:

<https://www.youtube.com/watch?v=z1ZdMOMUgXE>

כשכתבתי את הגרסה הראשונה של ראשי הפרקים של ההרצאה, לפני בערך חודשיים, הסצנה הזו הייתה לחלוטין מדע-בדיוני. הסרטון הבא שהתכוונתי להראות לכם כלל דיסקית קטנה מרחפת מעל מגנט. שזה מגניב, אבל הוברבורד, זה לא. ואז לקסוס שחררו את זה: (אוגוסט 2015, ברצלונה)

<https://www.youtube.com/watch?v=ZwSwZ2Y0Ops>

כן. זה הוברבורד. כן. הוא עובד. כן, הוא קצת פחות מרשים מזה של מרטי ו(אל) תספרו לאף אחד) הוא עובד רק מעל מגנטים, אז שימושי מדי הוא לא. בהרצאה היום אני אדבר על על-מוליכות (או מוליכות על), התופעה הפיזיקלית שבליבו של הוברבורד של לקסוס, כמו גם בליבם של מכשירים כמו MRI ומאיצי חלקיקים. אני אספר לכם איך זה עובד, ולמה. אני אספר לכם למה משתמשים בזה כל כך מעט ואנסה לחשוב אתכם מה היה אפשר לעשות עם מוליכי על, אם כל העסק היה קצת יותר פשוט לשימוש.

2 מוליכות רגילה

2.1 מודל האטום

תמונה

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eisenatom.svg>

יש לנו אטום עם אלקטרונים. האלקטרון מוסר את האלקטרונים הרחוקים יותר ל"מתכת". כתוצאה מכך, נשאר לנו יון חיובי כבד ואלקטרונים חופשיים. היונים נמשכים אחד אל השני ויצרים גביש.

2.2 מודל דרודה

האלקטרונים חופשיים לנוע. כאשר מפעילים שדה חשמלי, הם מאיצים. התנועה הזו של אלקטרונים ממקום למקום - היא זרם חשמלי. עכשיו, אחרי שלאקטרונים יש כבר מהירות, אנחנו יכולים לכבות את השדה החשמלי - לנתק את הסוללה, והזרם ימשיך לזרום לנצח? לא ממש.

2.3 התנגדות חשמלית

כאשר האלקטרונים נעים, הם עלולים להיתקל בהפרעות: להתנגש אחד בשני, ביונים, ובהפרעות נוספות שיש בתוך החומר. בהתנגשות כזו, הם מוסרים חלק מהאנרגיה שלהם לגביש ומאטים. האלקטרונים מאבדים מהירות ונדרש שדה חשמלי קבוע - חיבור מתמיד לסוללה, כדי לשמור אותם במהירות קבועה.

לאן האנרגיה הלכה? כדי "לנער" את היונים, לגרום לתנודות שלהם סביב מיקומם המקורי. תנודות כאלו של יונים הם בעצם "חום", או אנרגיה שהולכת לאיבוד. אנחנו משקיעים. מטפחים את האלקטרונים שלנו. מלמדים אותם לזוז, והם מבזבזים את כל האנרגיה שלהם על התרועעות עם יונים. ובסוף גם עושים לנו כוויות.

3 מוליכות על

3.1 הגדרה

זה היה ממש נחמד לו היינו יכולים להזיז אלקטרונים ממקום למקום בלי לאבד אנרגיה: אלקטרונים זזים זה ממש כיף. קודם כל, אנחנו אוהבים להזיז אלקטרונים ממקום למקום, סתם ככה (למשל, מתחנת הכוח בחדרה לבית שלכם, או מחלק אחד של המחשב לחלק אחר). חוץ מזה, אלקטרונים זזים יוצרים שדות מגנטיים, שגם הם שימושיים לפעמים (נראה בהמשך). לצערנו, אי אפשר לעשות את זה. או שכן?

הייתה קמלינג אונס היה פיזיקאי הולדני, פרופסור באוניברסיטת ליידן. אונס תמחה במקררים. מה כל כך מעניין במקררים? המקררים שאונס בנה היו חזקים למדי. פורצי דרך. אונס היה הראשון שהצליח לייצר הליום נוזלי - בטמפרטורה של $-269^{\circ}C$ (או, $4.2K$). ועשה כל מני ניסויים על השפעה של תמפרטורות נמוכות על חומרים.

אם נחזור לסיפור הקודם -- על הולכה והתנגדות, נשים לב לתופעה מעניינת - בדרך כלל, מתכות מוליכות טוב יותר ככל שמקררים אותם (או, פחות טוב ככל שמחממים אותם). זה די ברור מהמודל: אם הגביש זז, הוא מפריע יותר לאלקטרונים הנעים. אבל ב-1911 אונס גילה משהו מפתיע: כשהוא קירר כספית לטמפרטורה של הליום נוזלי, ההתנגדות שלה - בבת אחת - נעלמה לחלוטין.

לא פחתה הדרגתיות. לא התנגדות חשמלית קטנה. אפס מאופס. מוחלט. בלי התנגדות כלל. הוא קרא למצב הזה, של הכספית, "מצב על מוליך". על התגלית הזו הוא קיבל פרס נובל. (מדליית נובל?)

אז, איך אלקטרונים יכולים לנוע במתכת, קרה ככל שתהיה, בלי התנגדות בכלל? בשנים הבאות צצו תאוריות רבות **מתארות** את התופעה, ואף הסבירו כל מני תופעות מוזרות יותר של על מוליכות (בהמשך...) אבל אף אחד לא הצליח להסביר. עד שהגיע ברדיין, קופר ושריפר.

3.2 מבוא - בוזונים ופרמיונים

(הסבר טכני. מסקנה בסוף)

לכל חלקיק בעולם יש תכונה שנקראת ספין. ספין יכול להיות מספר שלם $(0, 1, 2, 3, \dots)$ או חצי-שלם $(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots)$.

זוהי תכונה מאוד מעניינת, עם המון השלכות, אבל אנחנו נתרכז רק בשניים מהם:

- זה מאוד משנה אם הספין הוא שלם או חצי-שלם. זה משפיע על כמה חלקיקים יכולים להיות באותו מצב.

– חלקיקים עם ספין שלם נקראים "בוזונים". הם מאוד אוהבים אחד את השני. הם ישמחו להיות כולם באותו "מצב".

* למשל, לייזר – חלקיקי אור, פוטונים, הם בוזונים. בלייזר, כל הפוטונים הם באותו "צבע".

– חלקיקים עם ספין חצי שלם נקראים "בוזונים". הם לא כל כך ידידותיים. כל חלקיק נמצא במצב משלו. אי אפשר לשם שני בוזונים באותו מצב.

* למשל, באטום – כל אלקטרון נמצא במצב משלו.

* למשל, במוצק, לכל אלקטרון יש את ה"מהירות" שלו. ויש בלאגן.

- אם מדביקים חלקיקים ביחד, הספין של החלקיק החדש הוא סכום של ספינים.

– למשל, לפרוטונים וניוטונים יש ספין $\frac{1}{2}$. גרעין של הליום-3 מורכב משני פרוטונים וניוטון ולכן יש לו ספין $\frac{3}{2}$. גרעין של הליום-4 מורכב מ-2 פרוטונים ושני ניוטונים ולכן יש לו ספין 2.

אם האלקטרונים היו פרמיונים, אזי הכל היה פשוט – הם היו יכולים לנוע כולם ביחד, במצב עם האנרגיה הנמוכה ביותר האפשרית. הם לא היו יכולים להיות אנרגיה – כי האנרגיה שלהם היתה הנמוכה ביותר האפשרית. רק חבל שהאלקטרונים דוחים אחד את השני.

3.3 זוגות קופר

האומנם?

הפריצה הגדולה הייתה כאשר קופר הציע מנגנון שבו זוגות אלקטרונים בתוך גביש (=מתכת) נמשכים אחד אל השני.

האלקטרונים המהירים נעים בתוך גביש של יונים איטיים. כאשר אלקטרון עובר במקום מסוים, הוא מושך אליו את היונים. הם מצטופפים מעט, אבל האלקטרון ממשיך הלאה. לך? יופי. הם יכולים לחזור למקום. אבל לאט.

בנתיים, אלקטרון נוסף עובר בסביבה. הוא מזהה נתיב שבו היונים צפופים מעט יותר. הוא נמשך אליו. קיבלנו אלקטרון שעוקב אחרי אלקטרון אחר. וקיבלנו זוג אלקטרונים שנע ביחד – או – בוזון.

עכשיו, כשזוגות האלקטרונים שלנו הם בוזונים, הם כולם יכולים להיות במצב היסוד, מצב של אנרגיה מינימלית שבה כולם נעים בזה אחר זה, בלי לאבד אנרגיה. דוחפים אלקטרונים – והם ממשיכים לזוז.

3.4 אפקט מייזנר וריחוף

אז יש לנו זרם חשמלי ללא התנגדות, אבל איך כל זה עוזר לנו לרחף? ההסבר השגוי הוא כדלהלן:

- בואו נקרב מגנט לעל-מוליך. המגנט יגרום ליצירת זרמים חשמליים שינסו לבלום את השינוי בשתף המגנטי בתוך העל מוליך.
- אבל הזרמים האלו לא ידעו - העל-מוליך יוצר בעצמו אלקטרון-מגנט שדוחה את המגנט החדש.
- יותר מזה - העל-מוליך "מתנגד" לכל שינוי בשדה המגנטי. מציזים את המגנט? תצטרכו "לנצח" את העל-מוליך בשביל זה!

ואיך כל זה עוזר לנו לרחף?
מניחים מגנט מעל על מוליך (או על מוליך מעל מגנט)
(סרט - Quantum levitation)

3.4.1 טמפרטורות נמוכות וגבוהות

הכספית של של קמלינג-אונס היא על מוליכה בטמפרטורות נמוכות מ- $4.2K$ (לתרגום לצלסיוס). בדיל עושה את העבודה מתחת ל- $3.7K$ ואלומיניום ב- $1.2K$. זה לא כל כך קל להגיע לטמפרטורות האלו. אומנם קמלינג-אונס עשה את זה כבר לפני יותר ממאה שנה, אבל עדיין, זה די כאב-ראש.

על מוליכים בטמפרטורות נמוכות

- אלומיניום - $1.2K$ $-272^{\circ}C$
- כספית: $4.15K$ $-269^{\circ}C$
- עופרת: $7.19K$ $-266^{\circ}C$.
- אבץ: $0.88K$ $-272.27^{\circ}C$.

בשנות השמונים התחילו לגלות חומרים על-מוליכים נוספים, "על מוליכים בטמפרטורות גבוהות". חומרים אלו הם חומרים קרמיים, מורכבים (למשל...) והטמפרטורות הקריטיות שלהן יכולות להיות גבוהות למדי, עד $133K$!
חומרים:

- איבקו - איטריום בריום קופר ואקסייד. $90K$ $-183^{\circ}C$. .
- ביסקו - ביסמוט, סטרונציום, קופר ואקסייד, $20K$ $-253.15^{\circ}C$.
- לסקו - לטינום סטרונציום קופר ואקסייד.
- קלבלקו - $55K$ \sim $-218.15^{\circ}C$
- $-140^{\circ}C$ $133K$ $- Ha - BaCa - Cu - O$

היסטוריה

- פריץ והיינץ לונדון. פריץ היה מועמד לנובל 5 פעמים אבל לא זכה.
 - לב לנדאו, ויטלי גינזבורג.
 - ג'ון ברדין, לאון קופר, ג'ון שריפר.
 - 1986, איי בי אם (קיבלו פרס נובל שנה אחר כך). גרג בגנרוז, שלק מולר.
- הטמפרטורות האלו הן לא בדיוק טמפרטורות יומיומיות, אבל הן טמפרטורות הרבה יותר פשוטות להשגה מאשר מעלות-קלווין ספורות. חלק מהחומרים האלו הם על מוליכים בטמפרטורה של חנקן-נוזלי, שהוא לא כל כך יקר לייצור. חומרים אלו הם פשוטים בהרבה לשימוש - הן בשימושים "תעשייתיים" והן לצורכי מחקר. אבל על-מוליכים בטמפרטורות גבוהות אינם משוללי בעיות:
- אף אחד לא מבין איך הם עובדים. התורה של BCS לא ממש מתאימה להם.
 - אף אחד לא יודע איך לייצר חדשים כאלו. איזה מרכבת תהיה על-מוליכה. יש כל מיני כללי אצבע שלפעמים עובדים אבל בגדול - צריך לערבב ולבדוק.
 - הם לא עובדים בטמפרטורות גבוהות מספיק. לא לשימוש יומיומי.

4 שימושים

אבל מה בכל זאת אפשר לעשות עם על מוליכים.

4.1 בימנו

- מאיצי חלקיקים,
8.4 טסלה (וואו!!), 11,850A
27 קילומטר.
- אם אר אי
מה קורה במכשיר כזה? החולה הנדגם נמצא בשדה מגנטי מאוד חזק ואחיד $\sim 1.5T$ (המון!).
מגלים צפיפות של פרוטונים בודדים (אטומי מימן $<^{\circ}$ מים)
מקורר על ידי הליום נוזלי.
- מג-לב.
רכבות! ספציפית, SCMaglev. באפריל 2015 הגיע לשיא של 603 קמ"ש.
נמצאת בניסוי. כרגע בתכנון לבניה ביפן. עד 2027 אמור לחבר את טוקיו ונגויה.
- הוברבורד!

4.2 במדע בדיוני

ב"עולם טבעת" של ניבן, ישנה מערכת הגנה מפני מטאורים המורכבת מרשת של כבלים על-מוליכים. כבלים אלו יוצרים שדות מגנטיים חזקים (מצויין!) המשפיעים על השמש וגורמים לה להתפרצויות, ומכוונים אותם כדי להסיט מתאורים (בכל זאת, "בדיוני")