

מבוא לפיזיקה מודרנית
מבוא לתורת הקוונטים

קוונטיזציה של מטען

בסוף המאה ה-19 ובתחילת המאה ה-20 נעשו מספר ניסויים שתוצאותיהם לא התאימו לתורת הפיזיקה הידועה עד אז. מניסויים אלה צמחה הפיזיקה הקוונטית.

הערה: בפיזיקה, המונח "קלאסי" משמש לתאור כל מה שאינו קוונטי. בהקשר של תורת היחסות המונחים המקבילים הם "לא יחסותי" ו"יחסותי".

זיהוי האלקטרון והיחס בין מטענו למסתו

גילוי האלקטרון ומדידת תכונותיו היה אחד הגילויים הקוונטיים שהיום נראים לנו פשוטים, אך למעשה היו מהפכניים.

לא תמיד היה ברור שמטען אינו ניתן לחלוקה.

התאוריה האטומית של החומר בוססה היטב במאה ה-19 על-סמך ניסויים בכימיה והתורה הקינטית של גזים (שמסבירה תופעות תרמודינמיות).

ניסויים של פרדיי באלקטרוליזה (1833) הראו שקיים יחס ישר בין מטען שמועבר בתמיסה לכמות החומר ששוקעת בתהליך (למשל, מתמיסת מלח בישול שוקעים נתון וכלור). מאחר שהיה ידוע שהחומר מורכב מאטומים, ניתן להסיק שלכל אטום מטען שהוא מכפלה טבעית של מטען יסודי.

אבל הקשר העמוק בין מטען חשמלי וחומר לא היה מובן מספיק.

השפופרת מורכבת מקתודה (אלקטרודה שלילית) ואנודה מוארקת עם גז בלחץ נמוך. במתח גבוה, הגז היה מאיר, וניסויים שונים חקרו את התופעה.

מניסויים אלה היה ברור כי קרניים כלשהן יוצאות מהקתודה לעבר האנודה: הקרניים גרמו לזכוכית השפופרת להאיר במקום בו פגעו בה. ב-1869 הראה היטורף (Hittorf) כי הקרניים נעות בקו ישר, ע"י הנחת מכשול בדרכן וקבלת תמונת צל של המכשול על המסך.

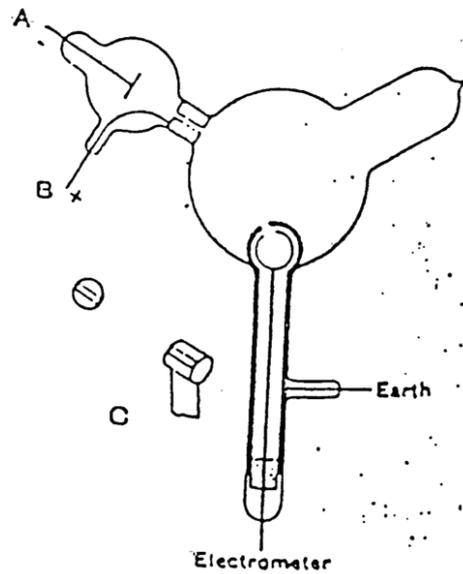
השם "קרני קתודה" (cathode rays) הוטבע ע"י גולדשטיין מספר שנים אח"כ. בשל התופעות האופטיות, גולדשטיין סבר שקרניים אלה הן גלים, בדומה לאור, הקשורים באתר, וכנראה (לפי דבריו של תומסון) כמוהו סברו רוב המדענים הגרמנים.

מאיך, קרוקס (Crookes) הראה שהקרניים מוסטות ע"י שדה מגנטי – מה שמעיד על כך שיש להן מטען חשמלי – ופריין (Perrin) הראה שכשהקרניים נפלו על מוליך מבודד, הצטבר עליו מטען חשמלי שלילי. פיזיקאים אנגלים נטו להאמיל שהקרניים הן חלקיקים.

הניסויים שהכריעו את הכף לטובת התפיסה החלקיקית היו אלה של תומסון (Thomson), עליהם כתב בשנת 1897 (Philosophical Magazine, 44, 293), ובהם הוכיח את האופי החלקיקי של הקרניים ומדד את היחס בין המטען והמסה של הקרניים (e/m).

מטען הקרניים:

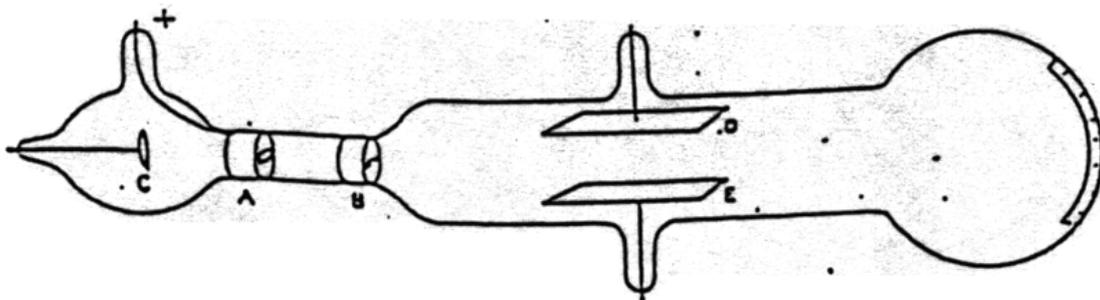
קודם כל (מבחינת המאמר, אולי לא מבחינה כרונולוגית), תומסון חזר על ניסויו של פריין עם שיפורים, באמצעות השפופרת הבאה:



הוא הסיט את הקרנים כלפי מטע באמצעות שדה מגנטי, וע"י מדידת המטען השלילי שהצטבר על הגליל שמחובר לאלקטרומטר, הראה שהקרניים נושאות מטען חשמלי.

הסחה בשדה חשמלי:

אחת ההתנגדויות לתפיסה החלקיקית היתה שהקרניים לא הוסטו ע"י שדה חשמלי קטן יחסית (כזה שניתן לקבלו באמצעות סוללות), כפי שהיה מצופה עבור קרני חומר טעון.



הקרניים כן הוסטו ע"י שדה חשמלי גדול (כנראה מאות או אלפי וולט לס"מ), אך הטענה היתה שזה יכול לנבוע מהזרם שזורם דרך הגז בין האלקטרודות שיוצרות את השדה, ולא בשל השדה עצמו.

תומסון מצא שמוליכות הגז יורדת מהר מאוד ככל שהלחץ בשפופרת קטן (הואקום גדל), וכאשר הוריד את הלחץ מספיק, הצליח להסיט את הקרניים באופן נראה לעיין באמצעות שדה של כ-1 וולט לס"מ (המרחק בין האלקטרודות היה 1.5 ס"מ והמתח היה 2 וולט).

אם כן, תומסון הוכיח שחוסר הצלחת הניסויים הקודמים היתה בשל הצטברות יונים ליד האלקטרודות, בעלי מטען הפוך למטען האלקטרודה, שגרמו לירידת מפל המתח בין האלקטרודות. בכך הסיר את אחת ההתנגדויות לתפיסה החלקיקית. שימו לב לחשיבות של שיטות נסיוניות מתקדמות ומהימנות.

תומסון כותב שמאחר שהקרניים נושאות מטען חשמלי שלילי והן מוסטות ע"י שדה חשמלי וגם שדה מגנטי כמצופה מגופים בעלי מטען שלילי, אין מנוס מלהסיק שהן מטענים שליליים הנישאים ע"י חלקיקי חומר. כלומר, חלקיקים ולא גלים.

השאלה הבאה היא, מהם אותם חלקיקים? האם הם אטומים, מולקולות, או רכיבי חומר בסיסיים יותר?

e/m:

תומסון ענה על כך ע"י מדידת היחס בין המטען למסה של החלקיקים, באמצעות שתי שיטות.

בשיטה הראשונה, הוא מדד עבור מספר N בלתי ידוע של חלקיקים את

1. המטען הכולל שלהם $Q=Ne$, כאשר e הוא המטען של כל חלקיק, באמצעות השיטה של השפופרת הראשונה בצירור למעלה.

2. האנרגיה הקינטית שלהם $W = \frac{1}{2} Nmv^2$, כאשר v היא מהירות החלקיקים, ע"י מדידת שינוי הטמפרטורה בצמד תרמי שהקרן פגעה בו.

3. את הרדיוס $r = \frac{mv}{eB}$ של המסלול שלהם בשדה מגנטי B, באמצעות מדידת הסחת הקרן על המסך. השדה המגנטי התקבל באמצעות סליל הלמהולץ (Helmholtz coil).

נפטר מ-N ע"י חלוקה של שתי המשוואות הראשונות:

$$\frac{W}{Q} = \frac{mv^2}{2e}$$

נחלק פעמים משוואה זו ב- rB (מהמשוואה השלישית), ונקבל את המהירות של החלקיקים

$$v = 2 \frac{W}{QrB}$$

נציב את המהירות במשוואה השלישית ונקבל משם את היחס

$$\frac{e}{m} = \frac{2W}{Q(rB)^2}$$

תומסון ערך את הניסוי עם גזים שונים בשפופרת ועם 3 שפופרות שונות. ההבדלים בין המדידות של e/m עבור הגזים השונים היו עד כדי כ-20%, ובין השפופרות היה שינוי של כ-30%.

כל ניסוי ארך מספר שניות בלבד, כדי שהחום לא יברח מהצמד התרמי וכדי שהגז לא יספיק להתייגן ולהפוך למוליך.

הערך הממוצע היה בערך $e/m = 2 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ השוו עם הערך של היום, $1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.

בשיטה השנייה, תומסון השתמש בכך שהכוח הכולל על מטען נע הוא $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ אם \vec{E} , \vec{v} , \vec{B} כולם ניצבים זה לזה, ניתן להגיע למצב שהכוח מתאפס, כאשר $Bv = E$, ואז אין הסחה של הקרן.

בצורה זו קיבל את מהירות החלקיקים.

כאשר הוא כיבה את השדה המגנטי, נשארה ההסטה בעקבות השדה החשמלי בלבד, שמורכבת משני רכיבים:

כאשר הקרן בין האלקטרודות, הוא מאיץ תחת השדה החשמלי, כך שההסטה היא

$$y_1 = \frac{1}{2} at_1^2 = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{x_1}{v_x} \right)^2$$

כאשר a היא התאוצה, x_1 אורך האלקטרודות, t_1 הזמן שהחלקיק שוהה בין האלקטרודות, ו- v_x היא מהירות החלקיק בכיוון x .

בזמן שהחלקיק נמצא בין האלקטרודות והמסך, הוא נע במהירות אנכית קבועה v_y וצובר הסטה

$$y_2 = v_y t_2 = (at_1) \left(\frac{x_2}{v_x} \right) = \left(\frac{eE}{m} \right) \left(\frac{x_1}{v_x} \right) \left(\frac{x_2}{v_x} \right) = \frac{Eex_1x_2}{mv_x^2} \quad \text{של}$$

ההסטה הכוללת היא סכום שתי ההסטות:

$$y = \frac{e E}{m v_x^2} x_1 \left(x_2 + \frac{x_1}{2} \right) \quad .e/m \text{ ומכאן מוצאים את היחס}$$

שיטה זו משמשת כיום בספקטרומטר מסות, מכשיר המשמש למדידת מסות של חלקיקים טעונים.

בשיטה זו קיבל תומסון ערך של $e/m = 0.7 \times 10^{11} \text{ C/kg}$

ערך זה נמוך מהידוע היום, אולי משום שהוא הזניח את השדה החשמלי מחוץ לאלקטרודות.

אך לשיטה היה פוזר תוצאות קטן יותר כאשר חזר על הניסוי שוב ושוב.

גם כאן, גזים שונים נתנו את אותן התוצאות, מה שמעיד שהיחס של e/m שנמצא תלוי בחלקיקי הקרן, לא בגז.

הערך של e/m שקיבל תומסון גדול בכ-2000 מהערך שהיה ידוע עד אז עבור האטום הקטן

ביותר – מימן – אשר נמדד באלקטרוליזה, כגון בניסויים של פרדיי.

מכך הסיק תומסון שמדובר בחלקיק חדש, שלאחר מכן קרא לו אלקטרון

(שם שהומצא ע"י Stoney ב-1891 כדי לתאר את יחידת המטען הבסיסית).

מכך שאותו ערך של e/m נמצא עבור גזים שונים, תומס הסיק שהאלקטרון נמצא בכל חומר.

שימו לב שתומסון לא ערך מדידות עם כל היסודות הידועים, אך הסיק מסקנה רחבה לגבי כל היסודות.

אין בהכללה זו פסול. אילו היינו צריכים להמתין לביצוע ניסויים עם אחרון היסודות לפני שנסיק מסקנות מרחיקות לכת, המדע היה מתקדם הרבה יותר לאט. אפשר להניח הנחות סבירות ואח"כ לוודאן בניסויים.

מטען האלקטרון

לאחר מדידת e/m , ניגשו תומסון ותלמידיו למדוד את המטען של האלקטרון.

הרעיון שלהם היה להשתמש בטיפות קטנות של מים, שמסתן מחושבת ממהירות נפילתן באויר.

אם על כל טיפה יש אלקטרון אחד או אלקטרונים בודדים, הכוח שמפעיל שדה חשמלי על הטיפה נותן את מטען האלקטרון.

הבעיה היתה שטיפות המים היו מתאדות במהלך הניסוי.

מיליקן (Robert Millikan) שיפר את הניסוי בהתשמשו בטיפות שמן, שנוצרו בריסוס. מאחר ששמן כמעט אינו מתאייד, הוא יכול היה להתבונן בטיפת שמן אחת במשך שעות. הטיפה נופלת תחת כבידתה, ונפילתה מעוכבת ע"י חיכוך באויר. נראה מהי תנועת טיפה כזו תחת כבידה בלבד:

משוואת התנועה של הטיפה היא $mg - bv = m \frac{dv}{dt}$, כאשר b הוא מקדם חיכוך.

הטיפה מגיעה מהר למהירות הסופית, כלומר, $\frac{dv}{dt} = 0$, ואז משוואת התנועה נותנת את מהירות

$$v_f = \frac{mg}{b}$$

כעת נמנע מהטיפה ליפול על-ידי הפעלת שדה חשמלי אחיד E . השדה מעלה את הטיפה, משום שהיא נטענת במטען בלתי-ידוע q על-ידי תהליך הריסוס (בשל חיכוך בפיית המרסס, וכו').

אז משוואת התנועה הופכת להיות $qE - mg - bv = m \frac{dv}{dt}$, ומהירות העליה הסופית היא

$$v_r = \frac{qE - mg}{b}$$

היחס בין מהירות הנפילה החופשים ומהירות העליה תחת שדה חשמלי הוא

$$\frac{v_f}{v_r} = \frac{mg}{qE - mg}$$

$$q = \frac{mg}{E} \left(\frac{v_f + v_r}{v_f} \right)$$

ומכאן נקבל את המטען

קיבלנו את המטען כתלות במסה של הטיפה, אז צריך למצוא את המסה.

שאלת בית: הראו שמסת הטיפה נתונה על-ידי הביטוי $m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \right)^{\frac{3}{2}} \rho$

כאשר $\rho = (\rho_{oil} - \rho_{air})$ הוא ההבדל בין צפיפות המסה של השמן וזו של האויר, b הוא מקדם החיכוך (שראינו קודם) של הטיפה בנפילתה באויר, ו- η הוא צמיגות האויר. השתמשו בחוק סטוקס $b = 6\pi\eta a$, המקשר בין מקדם החיכוך לרדיוס הטיפה a , כאשר מניחים שהטיפה כדורית.

נציב את המסה בביטוי למטען ומקבלים את המטען על הטיפה:

$$q = \frac{4}{3} \pi \frac{1}{E} \left(\frac{9\eta}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{v_f}{\rho g}} (v_f + v_r)$$

כעת נתון המטען רק עם גדלים מדידים.

בזמן ההתבוננות בטיפה, מיליקן ראה שלעתים היא משנה את מהירותה. הוא הסיק שזה נובע מכך שהיא מקבלת או מאבדת מטענים במהלך החיכוך באויר. ע"י חישוב המטען עבור הטיפה במשך זמן ארוך, הוא יכול היה לראות שהמטען משתנה תמיד בכפולה טבעית של גודל מסוים: המטען היסודי e .

$$e = 1.591 \times 10^{-19} \text{ C}$$

כ-20 שנה לאחר מכן הסתבר שהערך שלו שגוי ב-0.4% בשל ערך שגוי של צמיגות האויר.

$$e = 1.602 176 53(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

הנושא עדיין מעניין כיום, ועדיין משתמשים בשיטה של מיליקן (וגם בשיטות אחרות) כדי לחפש חלקיקים אקזוטיים (למשל, קוורקים חופשיים) בעלי מטען שהוא שבר של e .

גילוי האלקטרון השפיע עמוקות על ענפי הפיזיקה השונים.

היה צורך לצרף אותו לשיקולים של תיאוריות קיימות, והוא הוביל למהפכה טכנולוגית.