

## מאה שנה להולדתו של פאולי

Wolfgang Pauli נולד בווינה ב- 25.4.1900 ונפטר בציריך ב-15.12.1958. הוא שימש כפרופסור במכון E.T.H. שבציריך בשנים 1928 - 1958 פרט לתקופת מלחמת העולם השנייה, כאשר שהה במכון ללימודים מתקדמים בפרינסטון. תרומותיו של פאולי לפיסיקה רבות וחשובות. על אחת מהן, אולי החשובה ביותר, פיתוח וניסוח עקרון האיסור הנקרא על שמו, זכה ב-1945 בפרס נובל בפיסיקה.

## עקרון האיסור של פאולי

יגאל תלמי, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

פרופסור יגאל תלמי, שכתב מאמר זה, הכיר היטב את פאולי: הוא עשה אצלו את הדוקטורט ב-E.T.H. בשנים 1949 - 1951.

הזה אך לא ידע את הסיבה שקליפה מסוימת מתמלאת והאלקטרונים הנוספים נכנסים לקליפה חדשה. הוא גם לא ידע באילו מסילות נמצאים האלקטרונים בקליפה מסוימת. למשל, הוא כתב שבהעדר ידיעה מפורטת, הוא מניח שאם יש 9 אלקטרונים בקליפה שבה המסילות  $1d$  ו- $2p$ ,  $3s$ , הם נמצאים במספר שווה בכל מסילה, כלומר 3 אלקטרונים במסילה  $3s$ , שלושה ב- $2p$  ושלושה ב- $1d$ .

מדען בריטי, סטונר (E.C. Stoner) שחקר קרינת X הנפלטת מאטומים, הציע עבור האלקטרונים מסילות המאופיינות, בנוסף ל- $n$  ו- $l$ , גם על-ידי התנע הזוויתי הכולל  $j$ , כאשר ערכי  $j$  האפשריים הם  $j = l + (1/2)$  ו- $j = l - (1/2)$ , התנע הזוויתי בעל ערך  $\hbar/2$  היה ידוע לפיסיקאים. המומנטים המגנטיים של אטומים התאימו לנוסחת לנדה (Landé) שבה הופיע תנע זוויתי זה. בספר שפרסם לנדה על תורת הקוונטים הוא מסביר שמהות התנע הזוויתי הזה איננה ידועה. הוא כותב שאם יובן מקור מספרי הקוונטים החצי שלמים, יהיה הדבר צעד גדול להבנת תורת הקוונטים. באותה תקופה לא היה ברור כלל וכלל שמספר הקוונטים הזה, שערכו  $1/2$ , שייך לאלקטרון עצמו. בוחר סבר שמקורו של התנע הזוויתי הזה הוא ב"שאר האטום" ולא באלקטרון. לפי המיון של סטונר יש בכל אטום רק אלקטרון אחד בכל מצב המאופיין על-ידי  $j$  והטלתו

שמו של פאולי ידוע היטב בפיסיקה המודרנית בעיקר בזכות העיקרון הנקרא על שמו. עקרון פאולי, או עקרון האיסור (exclusion principle) של פאולי קובע שאין שני אלקטרונים יכולים להיות באותו מצב קוונטי. בתורת הקוונטים עיקרון זה נובע מהדרישה שפונקציית הגל של מערכת אלקטרונים חייבת להיות אנטיסימטרית לגבי החלפה של קואורדינטות המקום וכיוון הספינים של כל שני אלקטרונים. פאולי פרסם את העיקרון הזה בשנת 1924 לפני שתורת הקוונטים קיבלה את הניסוח המדויק שלה על-ידי הייזנברג ושרדינגר.

בספרי הלימוד, בסקירה היסטורית, מופיע תחילה עקרון פאולי ולאחריו תיאור מבנה המערכת המחזורית של היסודות לפי בוהר. קיומה של המערכת המחזורית נגזר ישירות מעקרון פאולי וניתן לשאול מדוע לא תאר פאולי בעצמו את המערכת המחזורית לאחר שגילה את העיקרון. מסתבר שבוחר פרסם את מבנה המערכת המחזורית כהסבר פנומנולוגי עוד לפני גילוי עקרון פאולי. הוא הסתמך על מבנה ה"קליפות" של האטום שלפיו באטום ההליום יש שני אלקטרונים בקליפה הנמוכה שבה יש רק מסילה אחת  $1s$ . באטומים כבדים יותר, אלקטרונים נוספים נמצאים בקליפה השנייה שבה המסילות  $2s$  ו- $1p$ . קליפה זו מתמלאת באטום של הגז האציל נאון. בוחר טען שמבנה המערכת המחזורית מכתוב את סדר המילוי

על ציר ה-z, כלומר בכל מסילה יש  $2j + 1$  אלקטרונים. למשל, במסילה s קיים רק  $j = 1/2$  ויכולים להיות רק שני אלקטרונים. סטונר הסתפק בקביעותו אלה וספק אם הבין את המשמעות העמוקה שלהן. סביר להניח שהוא גם לא עמד על הקשיים העיוניים הכרוכים בקביעות אלה.

לעומת סטונר, הבין פאולי היטב את הבעיה. במאמר הארוך שבו הוא מפרסם את העיקרון, רוב הדיון נסב על מהות המצבים הקוונטיים שבהם יכול האלקטרון להימצא. היה מקובל שאלה מוגדרים על-ידי שלושה מספרי קוונטים,  $n, l$  ו- $m$ . כבר בדברי הפתיחה קובע פאולי שמספר המצבים של האלקטרון הוא **כפול** ממה שנובע מעקרון ההתאמה של בוהר. הוא מתווכח עם בוהר ומראה שלפי העקרונות של בוהר עצמו, מקור התנע הזוויתי  $1/2$  אינו יכול להיות ב"שאר האטום". עקרון ההתאמה היה מאבני היסוד של תורת הקוונטים. בוהר הכריז עליו כאשר הציע את מבנה האטום והשתמש בו כדי לבטא את הקבוע של רידברג (Rydberg) בעזרת קבועים יסודיים. לכל הפיסיקאים היה ברור אז שאם האלקטרון נמצא במסילה בעלת מספרי קוונטים גבוהים מאוד, ניתן יהיה לתאר אותו באמצעות הפיסיקה הקלאסית. דבר זה לא ייתכן אם מספר המצבים הקוונטיים הוא כפול מהמספר שלהם לפי עקרון ההתאמה.

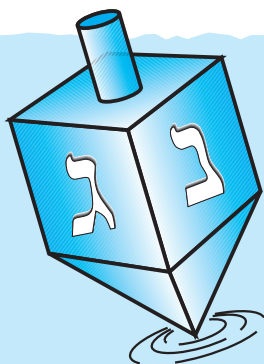
רוב המאמר של פאולי עוסק בשאלה מה הם המצבים הקוונטיים שמאפיינים את תנועת האלקטרונים. פאולי היה צריך להתגבר על הקושי הגדול של זניחת עקרון ההתאמה כדי להסביר את התופעות. בימינו, מזכירים בקושי את עקרון ההתאמה וקשה לנו לתפוס כמה יסודית הייתה המהפכה העקרונית שחולל פאולי באותו מאמר. הוא הבין זאת היטב ובמאמרו הוא מסביר בהרחבה את השיקולים שהביאו אותו

למסקנותיו. הוא קובע שלאלקטרון יש מספר קוונטים נוסף הקשור לתנע הזוויתי  $1/2$ . הוא קבע זאת מבלי לדעת כלל מה הפירוש הפיסיקלי של מספר זה. כמו שאר הפיסיקאים הגדולים של אותו הזמן, הוא דחה את הרעיונות שלאלקטרון יש תנע זוויתי  $h/2$  סביב צירו. הם סברו שבמקרה זה תהיה לאלקטרון אנרגיה עצמית מגנטית כה גדולה שתחייב רדיוס של האלקטרון גדול בהרבה מן המקובל. מבלי לדעת את הנימוקים שנראו אז כה חזקים, פרסמו אולנבק וגאודסמיט (Uhlenbeck & Goudsmit) מאמר המציע הסבר זה. הם עצמם נבהלו מתמימותם ובמאמר אחר הם כותבים שהסברם נועד אך ורק לתת תמונה הסתכלותית (anschaulich). הם גם מצטטים את קומפטון (Compton) שאף הוא פרסם הסבר זה עוד לפניו. רק אחרי הניסוי של שטרן וגרלך (Stern & Gerlach) השתכנעו כל הפיסיקאים שלאלקטרון יש ספין  $1/2$  ואף מומנט מגנטי הניתן למדידה.

במאמרו של פאולי מוקדשים למסקנות הנובעות מעקרון האיסור רק עמוד או שנים. המסקנה המיידית היא שמילוי נכון של המסילות באטומים השונים מוליך בהכרח למערכת המחזורית. מסקנה נוספת היא לגבי הספקטרום של אטום ההליום שהיה ידוע מהניסוי. במערכת רמות האנרגיה שנמצאו בניסוי חסרים כל המצבים שבהם שני האלקטרונים היו אמורים להיות באותו מצב.

מאז 1924 התגלו חלקיקים רבים והתברר כי עקרון פאולי תקף לכל החלקיקים הידועים בשם פרמיונים. אלה הם המרכיבים הבסיסיים של החומר, כמו אלקטרונים, פרוטונים, ונייטרונים. עיקרון זה הוא אחד מאבני היסוד של הפיסיקה המיקרוסקופית וישו של פאולי קשור בעיקרון זה יותר מאשר בשאר תרומותיו הרבות והחשובות לפיסיקה של ימינו.

תהודה



חל חנוכה שמח!