

# ניקל - 48: "הקסם הכפול"

מעובד לפי: Geoffrey W. Rayner-Canham, *Education in Chemistry*, March 2001, pp46-48

**ב** דרך כלל, נוטים הכימאים למקד את התעניינותם באטום באלקטרונים, ולהשאיר את מסתרי הגרעין לפיזיקאים. כדי לענות על שאלות מסוימות, כגון "מדוע ליסודות מסוימים יש רק איזוטופ אחד ולאחרים איזוטופים רבים?" או "מדוע מספר היסודות היציבים הוא סופי?" אין מנוס אלא ל"הציץ" אל תוך הגרעין

ולהבין את המתרחש בו. השנה, עם גילויו של איזוטופ מיוחד של ניקל, פונים גם הכימאים לחפש תשובות במודל רמות האנרגיה של הגרעין.

מחישוב היחס בין מספר הנויטרונים לבין מספר הפרוטונים בגרעינים נפוצים, הסתבר שהוא גדל עם העלייה במספר האטומי (טבלה 1). כדי להסביר זאת, יש להתייחס לשני הכוחות המנוגדים הקיימים בגרעין:

- כוח המשיכה בין הנוקליאונים (הפרוטונים והנויטרונים), הנקרא הכוח החזק (או הכוח הגרעיני)

- הדחייה החשמלית בין הפרוטונים, הנקראת הכוח האלקטרומגנטי (קולון). הכוח החזק הוא קצר טווח, הכוח האלקטרומגנטי הוא ארוך טווח.

כדי שהמשיכה בין החלקיקים תהיה גדולה מן הדחייה ביניהם, צריך שהכוח החזק יהיה גדול יותר מכוח הדחייה, וזאת ניתן לקבל רק על ידי הוספת נויטרונים. אם אין מספיק נויטרונים, כוח הדחייה בין הפרוטונים יגרום להתפרקות הגרעין. באיזוטופ החדש של הניקל,  $^{48}\text{Ni}$ , נמצא כי היחס בין מספר הנויטרונים למספר הפרוטונים הוא רק 0.7. זהו יחס קטן בהרבה מהתחום הרגיל, שנע בין 1.1-1.3, השכיח באטומים עם מספר מסה דומה. כיצד אפשר להסביר זאת?

שני מודלים הוצעו כדי להסביר את התנהגות הגרעין: מודל הטיפה ומודל רמות האנרגיה. מודל הטיפה יעיל לחקר ביקוע גרעיני. אם מדמים את הגרעין לטיפת מים, פיצול הטיפה לשתי טיפות קטנות יותר, מתאים לביקוע הגרעין לשני חלקים.

יחס פרוטונים / נויטרונים	מס' נויטרונים	מס' פרוטונים	היסוד
1.0	2	2	הליום
1.0	6	6	פחמן
1.2	20	18	ארגון
1.2	30	26	ברזל
1.4	74	53	יוד
1.5	126	82	עופרת
1.6	146	92	אורניום

טבלה 1. יחס נויטרונים לפרוטונים בכמה איזוטופים נפוצים

מודל זה אינו מסביר מדוע איזוטופים מסוימים קיימים בטבע ואחרים לא. מודל רמות האנרגיה מסביר סוגייה זו, ומכאן חשיבותו. מודל זה, שהוצע בנפרד על ידי מריה גופרט מייר והנס ג'נסן (במסגרת בסוף המאמר), מייחס לנוקלאונים בגרעין רמות אנרגיה עם מספרים קוונטיים, בדומה לרמות האנרגיה והמספרים הקוונטיים של האלקטרונים באטום. על פי מודל זה, גם הפרוטונים והנויטרונים ממלאים רמות אנרגיה קוונטיות ומצייתים לכללי פאולי, על פיהם לא ייתכנו שני פרוטונים או שני נויטרונים המאופיינים על ידי אותם ארבעה מספרים קוונטיים.

בדומה לאלקטרונים, גם לנוקליאונים יש ספין של  $1/2$ . צימוד הספינים חשוב יותר בגרעינים מאשר באלקטרונים, ושכיחים יותר הגרעינים בעלי מספר זוגי של פרוטונים ו/או נויטרונים. מתוך 273 גרעינים יציבים, ב-164 יש מספר זוגי של פרוטונים ושל נויטרונים. רק בארבעה יש מספר אי-זוגי גם של פרוטונים וגם של נויטרונים, ואילו בשאר יש שילוב של זוגי ואי-זוגי. ספקטרוסקופיה של תהודה מגנטית גרעינית (תמ"ג) אפשר לבצע רק כשיש נוקלאונים לא מזווגים, ולכן שיטה זו יעילה בעבור פחות מ-40% מהגרעינים היציבים.

במערכת השמש, יסודות בעלי מספר זוגי של פרוטונים שכיחים פי עשרה מיסודות בעלי מספר אי-זוגי, ולכן מספר האיזוטופים היציבים גדול יותר. ליסודות בעלי מספר אי-זוגי של פרוטונים יש, בדרך כלל, איזוטופ אחד, או לכל היותר שניים. לדוגמה, לצזיום (55 פרוטונים) יש איזוטופ יציב אחד, ולבריום (56 פרוטונים) יש שבעה איזוטופים.

אף שזיווג ספינים חשוב מאוד, המספרים הקוונטיים האחרים ממלאים את התפקיד המרכזי בקביעת האנרגיה של רמת היסוד והרמות המעוררות של הגרעינים.

בדומה לאלקטרונים, לכל נוקליאון יש 4 מספרים קוונטיים:

1. מספר קוונטי ראשי,  $n$  - קובע את רמת האנרגיה של הנוקליאון. מספר זה, כמו באלקטרונים, יכול לקבל את הערכים 1, 2, 3, 4 וכו', עד אינסוף.
2. מספר קוונטי של תנע זוויתי,  $l$  - באלקטרונים ערכיו נעים בין 0 ל- $n-1$  לאפס. יש סדר קבוע של מיליו תת הרמות. למשל, תת-רמה  $4s$  מתמלאת לפני  $3p$ . הערך של התנע הזוויתי בנוקליאונים אינו מוגבל, והם יכולים לאכלס רמות  $1p, 1d$  וכו'. גם רמות הנוקלאונים מתמלאות לפי הסדר:

.....  $1j, 4s, 3d, 2g, 1i, 3p, 2f, 1h, 3s, 2d, 1g, 2p, 1f, 2s, 1d, 1p, 1s$



3. מספר קוונטי מגנטי - יכול לקבל ערכים מ- $l$  עד  $+l$  וכך יש תת רמה אחת  $s$ , שלוש  $p$ , חמש  $d$ , שבע  $f$ , תשע  $g$ , אחד עשרה  $h$ , שלוש עשרה  $i$  וחמש עשרה  $j$ .
4. מספר קוונטי של הספין - לכל תת-רמה יכולים להיכנס עד שני נוקלאונים, בעלי ספין הפוך.

מודל רמות האנרגיה של הגרעין, כפי שפותח על יד מריה גופרט מייר, מסביר את היציבות המיוחדת של גרעינים בעלי מספרי פרוטונים ונויטרונים מסוימים. הסתבר, כי כמו בסידור האלקטרונים, גם לגבי הגרעין קיימות סדרות של מספרים האחראיות ליציבות הגרעין. מריה גופרט מייר קראה בשם "מספרי קסם" למספרי הנוקלאונים הנחוצים למילוי הרמות בגרעין. "מספר הקסם הכפול" הוא מספר שבו מתמלאות גם רמות הפרוטונים וגם רמות הנויטרונים.

הרמה המלאה הראשונה, הן בפרוטונים והן בנויטרונים ( $1s^2$ ) היא בהליום - 4. אטום זה הוא השני בשכיחותו ביקום. גרעיניו, חלקיקי  $\alpha$ , נפלטים בדרך כלל בתגובות של דעיכה רדיואקטיבית. בגרעין הליום - 4, שבו גם רמת הפרוטונים וגם רמת הנויטרונים מלאות, מתקיים "מספר הקסם הכפול". גרעין חמצן - 16, שבו מתמלאת הרמה השנייה,  $1s^2 1p^6$ , גם של הפרוטונים וגם של הנויטרונים, הוא הגרעין השני בעל "מספר קסם כפול".

הרמה השלישית (אחריה יש קפיצה גדולה ברמת האנרגיה) ממלאת את  $1s^2 1p^6 1d^{10} 2s^2$ , כלומר 20 נוקלאונים.

"מספרי הקסם" הבאים הם 28, 50, 82, 126, 184. פיזיקאים טוענים, שלגבי נויטרונים, גם 114 הוא "מספר קסם".

על פי מודל רמות האנרגיה ניתן להסביר תצפיות רבות:

- לגרעינים עם "מספר קסם" של פרוטונים יש איזוטופים רבים (אטומים בעלי מספר פרוטונים שווה, מספר נויטרונים שונה). לסידן (20 פרוטונים), למשל, יש שישה איזוטופים יציבים; לשכניו, אשלגן וסקנדיום, יש רק איזוטופ יציב אחד.

- לגרעינים בעלי "מספר קסם" של נויטרונים יש איזוטונים רבים (אטומים בעלי מספר שווה של נויטרונים, אך מספר שונה של פרוטונים). לדוגמה, לאיזוטופים הנפוצים ביותר של טיטניום, ונדיום וכרום יש 28 נויטרונים.
- כל שרשרת הדעיכה הרדיואקטיבית של היסודות הכבדים מסתיימת בעופרת (82 פרוטונים).
- הגרעינים היציבים הכבדים ביותר הם עופרת - 208 וביסמוט - 209 (126 נויטרונים).
- האיזוטופים מאריכי-החיים ביותר של פולוניום ואסטטין הם  $At-211$  ו-  $Po-210$  (126 נויטרונים).

למודל רמות האנרגיה יש חשיבות רבה לגבי סינתזה של איזוטופים כבדים. באחת השיטות לקבלתם, מפגיזים גרעינים כבדים בגרעינים קלים, מתוך תקווה שיתרחש ביניהם תהליך היתוך ויתקבל גרעין כבד יותר. הצורך בין גרעין כבד, בו היחס המספרי בין הנויטרונים לפרוטונים גבוה יותר, לבין גרעין קל, בו היחס הוא בין 1.0 ל - 1.2, נידון מראש לכישלון בשל מחסור בנויטרונים.

כאן באים "מספרי הקסם" לעזרת המדענים. 0.187% מגרעיני הסידן הם איזוטופ "הקסם הכפול", סידן-48 (20 פרוטונים ו - 28 נויטרונים). באיזוטופ זה, שהוא קל יחסית, היחס הוא 1.4, יחס גבוה במיוחד. מדענים בדובנה שברוסיה הפגזו פלוטוניום - 244 (94 פרוטונים) בגרעיני סידן - 48, וקיבלו לראשונה את האטומים של היסוד 114 ("מספר קסם"). לאיזוטופ זה, עם 175 נויטרונים, יש זמן מחצית חיים של 30 שניות - זמן ארוך להפליא בשביל יסוד עם מספר פרוטונים גבוה כל כך. מפליאה עוד יותר העובדה, שיחס הנויטרונים לפרוטונים הוא רק 1.4, הרבה פחות מהדרוש ליציבות של גרעינים גדולים שכאלה. אם יצליחו לקבל איזוטופ עשיר יותר בנויטרונים, הוא יהיה, כנראה, בעל זמן מחצית חיים ארוך במיוחד.

פיזיקאי הגרעין חולמים לסנתז גרעין נוסף עם מספרי "קסם כפול", נוסף על החמישה שכבר ידועים: הליום - 4 (2p, 2n), חמצן - 16 (8p, 8n), סידן - 40 (20p, 20n), סידן - 48 (20p, 28n) ועופרת - 208 (82p, 50n). ידועים גם האיזוטופים הרדיואקטיביים ניקל - 56 (28p, 28n) ובדיל-132 (28p, 50n). בשנת 1993 סונתז הליום - 10 (2p, 8n), ושנה לאחר מכן בדיל - 100 (50p, 50n). יחס הנויטרונים לפרוטונים בבדיל - 100 הוא 1.0, נמוך בהרבה מהממוצע של 1.4 עבור האיזוטופים האחרים, אך זמן מחצית החיים שלו הוא כמה שניות, זמן ארוך במיוחד, יחסית לאלפיות השניה שציפו לקבל. בשנת 1995 הצליחו לסנתז איזוטופ יציב במיוחד של ניקל - 78 (28p, 50n).

המתחרים העיקריים על הכנת יסודות כבדים חדשים הם מדענים מברקלי (ארצות הברית), דובנה (רוסיה), ודרמשטדט (גרמניה). בניסוי משותף לגרמנים, לצרפתים ולפולנים, שבוצע במאיץ החלקיקים בדרמשטדט, הופגזו מטרות עופרת ובריליום ביוני אורניום - 238. התקבלו

למעלה מ-100 גרעינים, ביניהם גם האיזוטופ ניקל - 78, בעל "הקסם הכפול". 10 שנים ניסו, ללא הצלחה, לקבל גם ניקל-48. הם קיבלו אותו לבסוף בשנת 1999, במאיץ החלקיקים בקאין שבצרפת, שם הקרן הנשלחת היתה באנרגיה נמוכה יותר, אך עוצמתה גדולה יותר. החוקרים הפגיוזו מטרה של ניקל טבעי, בעיקר 58 ו-60, בקרן של ניקל-58, ולשמחתם האדירה, התקבלו שניים, ואולי אף ארבעה אטומים של ניקל-48. מאמציהם הממושכים נשאו פרי.

קיומם של איזוטופים אלה, בעלי זמן מחצית חיים ארוך יחסית, למרות יחס ניטרונים לפרוטונים נמוך יחסית, אפשר להסביר רק בעזרת מודל רמות האנרגיה בגרעינים. ידועים כיום שלושה איזוטופים של ניקל עם מספרי קסם כפולים: ניקל - 48 (28p, 20n), ניקל - 56 (28p, 28n) וניקל - 78 (28p, 50n). הסינתזה של ניקל - 48 והעמדתו מול סידן - 48 (20p, 28n) מאפשרת למדענים להשוות בין רמות האנרגיה של הנוקלאונים בשני האיזוטופים, וללמוד יותר על רמות האנרגיה בגרעין. קבלת ניקל - 48 היה עוד ניצחון לתיאוריה האלגנטית של רמות האנרגיה בגרעין האטום.

### **מריה גופרט מייר (Maria Goeppert-Mayer) 1906 - 1972**

בשנת 1963 קיבלו הנס ג'נסן ומריה גופרט מייר פרס נובל לפיזיקה, על פיתוח מודל רמות האנרגיה הגרעיניות. מריה נולדה כבת יחידה להוריה בשלזיה העליונה, אז גרמניה והיום חלק מפולין. כשהייתה בת ארבע, עברה המשפחה לגטינגן, עיר אוניברסיטאית מפורסמת. במסגרת לימודיה עסקה בחקר האטום והגרעין. את תואר הדוקטור קבלה על עבודה במכניקת הקוונטים. שנה לפני תום לימודיה, שכר חדר בבית משפחתה ג'וזף מייר, סטודנט מאוניברסיטת ברקלי שבא ללמוד שנה בגטינגן. בין הצעירים התפתח רומן, והשניים התחתנו במהלך אותה שנה.

לאחר סיום לימודיה, עבר הזוג לבולטימור, מרילנד. שם מונתה לפרופסור חבר בכימיה באוניברסיטת ג'ונס הופקינס. מייר פוטרה מג'ונס הופקינס בשנת 1939, מסיבות אקדמיות לכאורה. מאוחר יותר התברר, שההנהלה חיפשה סיבות לטיהור הקמפוסים מקומוניסטים, מיהודים, מקתולים, מנשים ומזרים. היא קיבלה משרת מרצה לכימיה באוניברסיטת קולומביה, לאחר שראש המכון לפיזיקה הבהיר לה שאינה רצויה במחלקתו. בשנת 1941 קיבלה

גופרט מייר משרת הוראה חלקית בניו יורק. שנה לאחר מכן צורפה לקבוצה סודית, שעסקה בהפרדת איזוטופים ופיתחה את הפצצה האטומית. סוף סוף הייתה למריה גופרט מעבדה משלה. לרוע המזל, המתח של המאמץ המלחמתי גרם לה לעשן בשרשרת ולשתות לשכרה.

בסוף מלחמת העולם השנייה עברה כל הקבוצה לאוניברסיטת שיקגו, שם קיבלה משרה אך לא משכורת. מאוחר יותר הציע לה אחד מתלמידיה, בוב זקס, חצי משרה בשכר, במעבדה הלאומית אורגון, שם חקרה את מקור היסודות הכימיים. כחלק מהמחקר, היא בחנה את שכיחות היסודות ביקום וגילתה, שככל שהמספר האטומי עולה, שכיחות היסודות יורדת. ואולם, היא שמה לב, שאיזוטופים מסוימים שכיחים יותר מהמצופה. כך גילתה את "מספרי הקסם" ופיתחה את מודל מבנה הרמות בגרעין. בנפרד, הגיע גם הנס ג'נסן מאוניברסיטת היידלברג שבגרמניה לאותה המסקנה. לאחר פרסום עבודותיהם הנפרדות, הם החלו לשתף פעולה ופרסמו יחד מאמר על התיאוריה של מבנה רמות הגרעין. בשנת 1959, עבר הזוג מייר לאוניברסיטה של קליפורניה בלה הויה, ורק אז, בגיל 53, קיבלה גופרט-מייר משרת פרופסור בשכר מלא. לרוע המזל, בהגיעה לקליפורניה חלה הרעה במצבה הבריאותי, היא קיבלה שבץ ופיתחה בעיות לב, שגרמו למותה בשנת 1972, בסן דייגו.

## **מטרות נבחרות לעבודת מעבדה בלימודי מדע למורי המדעים בכלל והכימיה בפרט**

**לקדם את ההתפתחות האינטלקטואלית של התלמיד  
לשפר ולהגביר את התפיסה של מושגים מדעיים  
להביא את התלמידים לכדי הבנת המדע והשיטות המדעיות  
לפתח מיומנויות של פתרון בעיות  
לפתח מיומנויות לביצוע חקר מדעי  
לפתח מיומנויות של ניתוח נתונים  
לפתח מיומנויות תקשורת  
לפתח מיומנויות של עבודה בקבוצה ושיתוף פעולה  
לשפר את היחס למדעים  
להביא את התלמיד למצב שבו יבין את סביבתו ולפתח אצלו  
גישה חיובית כלפי הרעיון לנסות ולהשפיע עליה.**

לפי:

V. Lunetta, a. hofstein, G. Giddings, "Evaluating Laboratory Activities", *The Science Teacher*, 48:1, January 1981, pp.22