

הטבלה המחזורית של היסודות / רן לוי

[/https://www.ranlevi.com/texts/ep6 the periodic table text](https://www.ranlevi.com/texts/ep6_the_periodic_table_text)

את ההשראה למאמר זה קיבלתי מסדרת תמונות שראיתי באינטרנט (באתר 'פליקר', Flickr, אתר מצוין לשיתוף תמונות), שבה מוצגים קעקועים מדעיים: אנשים שקיעקעו על עצמם ציורים מעולם המדע, במקום סתם דרקונים או לבבות. היו שם ציורים של מאובנים, חרקים, אפילו אחד שחרט על עורו את ראשי התיבות של שמה של אשתו- בקידוד של הקוד הגנטי! כאן הוא לא המקום להסביר איך הוא הצליח במשימה הרומנטית הזו, אבל הרעיון מקורי בהחלט- אם יש לך את האישה המתאימה, בכל אופן.

אחד הקעקועים המעניינים שבהם נתקלתי בסדרת התמונות הזו היה קעקוע של הטבלה המחזורית של היסודות: אותה הטבלה שחלקנו נתקלנו בה בשיעורי הכימיה בבית הספר התיכון. הטבלה מתארת את כל היסודות הכימיים- מימן, הליום, חמצן, ברזל וכו'- מסודרים לפי טבלה של מספר שורות ועמודות.

חשיבותה של הטבלה המחזורית היא בכך שהיא יוצרת סדר בכל אותם מאה ומשהו יסודות כימיים. במקום לזכור את התכונות של כל יסוד (כמו משקל או כמה נוטה יסוד מסוים להתרכב עם יסודות אחרים), ניתן להסיק רבות מהתכונות הללו באופן לוגי לפי מיקום היסוד בטבלה המחזורית.

הסדר הזה הוא בעל חשיבות דרמטית ממש. דמיינו לעצמכם, למשל, טבלת ליגה של כדורגל שבה לא היינו מסדרים את הקבוצות לפי ניקוד. תחשבו כמה קשה היה להבין מה קורה בליגה: לזה יש יותר שערי זכות, לזה יש יותר הפסדי בית, כך וכך כרטיסים אדומים ועוד ועוד סטטיסטיקות... אבל בלי אף טיפת הגיון. טבלת הליגה לא הייתה שימושית במיוחד אם זה היה המצב.

הסיפור על הטבלה המחזורית מעניין מכיוון שהוא הוא מדגים שני עקרונות חשובים. הראשון, שהמדע מתפתח כך שתגליות מדעיות באות באופן טבעי, עם הזמן, ובלי קשר לגאונות של איש מסוים זה או אחר. כשהתנאים בשלים והטכנולוגיה מתאימה, מישוהו כבר יגלה את התגלית- ולעיתים, אפילו כמה אנשים בו בזמן. מי יהיה הראשון מביניהם? זו כבר שאלה של מזל. העיקרון החשוב השני הוא שלפעמים, כדי לזכות בתהילה של 'המגלה הראשון', צריך להיות גם קצת בר מזל- אבל גם להיות אמיץ, כפי שעוד נראה.

בני האדם הכירו כמה מהיסודות הכימיים כבר מתקופות מוקדמות מאוד- זהב, נחושת, ברזל ומתכות דומות מופיעות בטבע בצורות הבסיסיות שלהם וקל לחצוב אותם מהסלעים. הקדמונים לא ידעו, כמובן, להבדיל בין חומר שהוא יסוד כימי בסיסי ובין תרכובת של כמה יסודות. הידע הזה נרכש רק כמה אלפי שנים אחרי כן.

הראשון שגילה יסוד כימי, ממש גילה אותו ולא הפיק אותו סתם ככה מהטבע, היה אלכימאי גרמני בשם הניג ברנד, בסביבות סוף המאה השמונה עשרה. ברנד היה סוחר במקצועו, אבל היה גם אלכימאי חובב ונלהב.

אלכימיה היא החיפוש אחר שיטה להפוך מתכות פשוטות לזהב טהור, תחום שהרבה אנשים עסקו בו לאורך ההיסטוריה- בעיקר בגלל שאם אתה קונה ברזל בזול, הופך אותו לזהב ואז מוכר את הזהב ביוקר, אתה יוצא עשיר גדול.

אבל במקרה של הניג, התחביב שלו כמעט גרם לו לפשוט רגל. הניג היה אובססיבי בניסיונותיו להפוך מתכות לזהב, וערך עשרות ומאות ניסויים. החומרים והכלים בהם עשה שימוש עלו לו הרבה כסף. למזלו, הייתה לו אישה עשירה למדי.

הקשתה על הניג גם העובדה שהרבה מהספרים שהינחו אנשים כיצד להפיק כל מיני תרכובות ומתכות היו לא מדויקים, בלשון המעטה. הספרים כללו לעיתים הנחיות כגון- "בצע את הניסוי לאור ירח מלא", או "ערבב אבקת פיות" וכדומה.

אחד מהספרים הציע שבשתן ישנם חומרים שיכולים לסייע בהפקת הזהב. הניג עשה שימוש בכמה אלפי ליטרים של שתן בניסויים כאלה (מגיע לו 'כל הכבוד' על ההשקעה, אני חושב).

באחד הניסויים, הוא חימם את השתן לטמפרטורה גבוהה מאוד, וזיקק אותו באמצעות סידרה של פעולות. לפתע פתאום עלו אדים מסתורים מהכלי והנוזל שהיה שם עלה בלהבות. אחרי שנתן לנוזל להתקרר, גילה הניג שהנוזל הירקרק צהבהב שהתקבל בסיר מאיר מצוין בחושך.

אף אחד לא ראה חומר כזה עד אז: זרחן. הזרחן היה היסוד הכימי הראשון שהופק באופן מלאכותי. ברנד שמר את הגילוי בסוד, והאמין שאולי הזרחן יעזור לו לגלות את הדרך להפקת הזהב- אבל אחרי שכימאי אחר, הפעם מדען רציני בשם רוברט בויל, גילה את הזרחן גם הוא, ברנד החליט לפרסם את תגליתו ברבים.

עד אזור אמצע המאה השמונה עשרה היו כבר כמה עשרות יסודות כימיים מוכרים ומזוהים. לכל יסוד כימי ישנו משקל טיפוס המכונה 'משקל אטומי'. כמובן שאי אפשר היה לשקול אטום בודד, מה גם שהרעיון של אטומים היה מאוד חדשני ונועז באותה התקופה. לכן 'משקל אטומי' סימל משהו פשוט יותר- המשקל של יחידה כלשהי של יסוד ביחס למשקל של אותה יחידה של מימן. למשל, ליטר של חמצן שוקל פי שש עשרה מליטר של מימן ולכן המשקל האטומי שלו הוא שש עשרה.

המימן נבחר כיחידת ההשוואה מכיוון שהוא היסוד הקל ביותר בטבע, וגם מכיוון שביחס אליו כמעט כל המשקלים האטומיים של היסודות האחרים מתקבלים כמספרים עגולים ונוחים כמו שש עשרה, שלושים ושתיים וכדומה.

כדי להבין מדוע לכל יסוד יש משקל אטומי ייחודי לו, כדאי לומר כמה מלים על מבנה האטום.

האטום מורכב משלוש אבני בניין יסודיות: פרוטונים, נויטרונים ואלקטרונים. הפרוטונים והנויטרונים מרוכזים בגרעין האטום והם כבדים וגדולים ביחס לאלקטרונים הקטנים שמקיפים את הגרעין. המרחק שבו האלקטרונים מקיפים את הגרעין גדול יחסית, כך שרוב האטום הוא למעשה ריק. אנלוגיה מאוד משומשת אומרת שאם הגרעין היה בגודל של כדור כדורגל ומונח במרכז מגרש תקני, האלקטרונים היו מקיפים את הגרעין מחוץ לאיצטדיון. המשקל האטומי הוא משקלם של הפרוטונים והנויטרונים יחדיו, זאת אומרת- משקל הגרעין בלבד.

המדענים זיהו בשלב מסוים שתכונותיהם של היסודות הכימיים קשורות באופן כל שהוא למשקלים האטומיים שלהם. התכונות של החומר- עד כמה הוא כבד, כמה הוא נוטה להתרכב עם אטומים אחרים ליצירת מולקולות, מהי הטמפרטורה שבא הוא הופך ממוצק לנוזל וכדומה- הן לא אקראיות וסתמיות, אלא יש בהן איזה היגיון מסוים שעליו הם לא הצליחו לשים את האצבע. התחושה הייתה שלמשקלים האטומיים יש קשר לעניין, ושיש כאן איזו תבונה עמוקה יותר שמסתתרת בתוך האקראיות לכאורה של היסודות.

המדען החשוב הראשון שעסק בכימיה היה אנטואן לבואז'יה- צרפתי שחי בתקופת המהפכה הצרפתית. הוא עשה את הצעד הראשון וסיווג חומרים לכאלה שהם יסודות ולכאלה שהם לא. לבואז'יה היה מדען פורה מאוד, אולי גדול המדענים הצרפתיים בכל הזמנים. ייתכן והוא היה ממשיך לפתח את הרעיונות שלו, אבל לצערו הוא עלה על הגיליוטינה במהפכה הצרפתית, ואחר כך כבר היה לא ראש להתעסק עם כימיה יותר.

המדען החשוב הבא שעסק בתחום היה אלכסנדר בגוייר. אלכסנדר היה זה ששם לב בפעם הראשונה שיש קשר בין המשקל האטומי של יסוד מסוים, לתכונות שלו. המשקל האטומי של הליום, למשל, הוא שתיים (במספרים עגולים), של ניאון הוא עשר, ושל ארגון שמונה עשרה- הפרש קבוע של שמונה בין שלושתם. כל השלושה הם "אדישים" ליסודות אחרים: זאת אומרת, לא יוצרים איתם תרכובות כימיות. זו דוגמא לתכונה משותפת להם.

אלכסנדר ניסה ליצור סידור הגיוני של היסודות השונים, בהסתמך על המשקל האטומי שלהם. השיטה שבה בחר הייתה סידור היסודות על היקף של עיגול, כך שהם יצרו שכבות, קליפות, סביב מרכז משותף. היסודות הסתדרו בשכבות כך שיסודות בעלי תכונות דומות ישבו אחד מעל השני בקליפה.

אבל אלכסנדר היה גיאולוג ולא כימאי ממש, כך שהקהילה המדעית לא הקשיבה למה שהיה לו לומר. גרוע יותר, הספר שכתב על הנושא היה מסורבל וקשה להבנה, ובגוייר אפילו לא צירף שרטוט של סידור היסודות הייחודי שלו כדי שמדענים אחרים יבינו על מה הוא מדבר- אז הם לא. הוא נשאר אנונימי ותגליתו לא הכתה גלים.

הבא בתור למצוא סידור מתאים ליסודות, היה ג'ון ניולנד האנגלי. ניולנד גילה מחדש, פחות או יותר, את מה שמצא אלכסנדר בגוייר לפניו- שישנם הרבה יסודות כימיים בעלי תכונות דומות שהמשקל האטומי שלהם הוא בכפולות של שמונה זה מזה. גם במקרה שלו, הרעיון

לא התקבל בקהילה המדעית האנגלית, ושאר המדענים לגלגו עליו על זה שהוא חושב שמספרים קובעים את התכונות של יסודות בטבע- רעיון שנשמע מוזר למדי באותה התקופה.

את הטבלה המחזורית, כפי שאנחנו מכירים אותה היום, גילו שני אנשים פחות או יותר בזמנית, בשנת 1869. כל אחד מהם עבד במדינה אחרת, ולא שמע על עבודתו של השני. הראשון היה הגרמני לותר מאייר, כימאי מוכר ובעל מוניטין. הוא הגיע לסידור מתאים של היסודות בצורה של טבלה (שורות ועמודות, וזאת בניגוד לסידור של בגוייר, שהיה סידור מעגלי), לפי סדר של משקל אטומי עולה, כך שמשפחות של יסודות (יסודות עם תכונות דומות) יהיו זה מעל זה בטבלה.

מאייר נתקל בשתי בעיות חמורות בטבלה המחזורית הראשונית שלו. הראשונה- היו כמה יסודות שלא התאימו למקום שלהם בטבלה. במילים אחרות, יש להם תכונות מסוימות שממקמות אותם במשפחה עם יסודות אחרים, ותכונות אילו אינן מתאימות למשקל האטומי שלהם.

הבעיה השניה הייתה שהיו כמה 'חורים' בטבלה: מקומות שלפי הטבלה צריכים להיות בהם יסודות, אבל בפועל היו ריקים. משמע, לא היו יסודות מוכרים למדע שיהיו בעלי תכונות או משקל אטומי מתאים.

בעקבות הבעיות הללו התלבט לותר מאייר התלבט לגבי פרסום התאוריה הזו במסגרת ספר לימוד שכתב, אבל בסוף החליט שלא לשלב אותה בספר בשל חששו לכתוב דברים שעמדו בסתירה למה שהיה ידוע אז.

המדען שבסופו של דבר זכה בתהילה על גילויה של הטבלה המחזורית, על אף שגילה אותה בזמנית עם מאייר, היה דימיטרי מנדלייב, רוסי יליד סיביר. מוצאו של מנדלייב היה יהודי, על אף שסבו המיר את דתו לנצרות ומנדלייב כנראה לא ראה את עצמו כיהודי. מנדלייב היה הצעיר מבין ארבעה עשר או שישה עשר ילדים (מקורות שונים מוסרים מידע שונה על המספר הזה. המון, בכל אופן). המשפחה הייתה ענייה מאוד, בעיקר מכיוון שאב הלך לעולמו. אבל אחרי שכל הילדים האחרים גדלו ועזבו את הבית וההוצאות קטנו, אימו לקחה אותו לעיר סנט פטרסבורג כדי לקבל חינוך טוב.

דימיטרי מנדלייב לא נחשב לתלמיד טוב בבית הספר מכיוון שלא אהב ללמוד שפות קלאסיות, שנראו אז כחשובות מאוד לאיש המלומד, וכתוצאה מכך התקבל רק לבית ספר מדרגה שניה בסנט פטרסבורג.

אבל היכולות המצוינות שלו במדעים המדויקים, במיוחד בכימיה, הביאו אותו מהר יחסית להתקבל לאוניברסיטה הנחשבת של סנט פטרסבורג, ומשם למשרות טובות והכרות עם מדענים מובילים באירופה.

מנדלייב אהב לשחק סוליטר: משחק קלפים לשחקן יחיד המוכר לרובנו בזכות העובדה שהוא קיים בכל התקנה של מערכת הפעלה 'חלונות' להנאתם של עובדים משועממים. במסגרת החיפוש שלו אחרי סידור מתאים של יסודות בטבלה, כתב מנדלייב את שמות היסודות על

קלפים- ממש כמו בסוליטר- והחל משחק בהם. בסופו של דבר עלה על הסידור המתאים ואז, כמובן, ניתקל באותן הבעיות של לותר מאייר: היו יסודות שלא התאימו למשקל האטומי הידוע שלהם, והיו חורים בטבלה שהצביעו על יסודות שאינם קיימים. כאן ניתן לראות עד כמה עשוי אופיו של מדען להשפיע על ההתפתחות המדעית. בניגוד ללותר, מנדלייב 'קפץ למים': הוא הזיז יסודות וסידר אותם בטבלה בהתאם למקומות שבהם הוא האמין שהם אמורים להיות. משמע, הוא

החליט שהמשקל האטומי המוכר של היסודות אותם הזיז הוא שגוי. מנדלייב לא עשה את זה רק ליסוד אחד או שתיים, אלא לשבעה עשר יסודות! את בעיית המשבצות הריקות בטבלה המחזורית פתר מנדלייב בכך שהשאיר את החורים במקומם ואמר שלדעתו יתגלו יסודות בעתיד שיתאימו לחורים הללו. זאת ועוד, הוא גם ניבא את התכונות שאמורות להיות ליסודות האלה כשאלה יתגלו. למנדלייב היה את הביטחון העצמי וה'חוצפה' כדי להתנבא באופן זה, בעוד שללותר מאייר לא היה את מה שצריך. זו הסיבה שאנו זוכרים את מנדלייב היום, ולא את מאייר. בסופו של דבר צדק מנדלייב ברוב התחזיות שלו. רבים מהמשקלים האטומיים של היסודות היו שגויים ותוקנו אחר כך, וכמה וכמה יסודות חדשים נתגלו וסתמו באופן אלגנטי את החורים בטבלה המחזורית. מנדלייב זכה לפרסום שהגיע לו אבל הוא לא זכה בפרס נובל: היה חסר לו קול אחד בלבד בוועדת הפרס כדי לזכות. אלו החיים.

גם אחרי מנדלייב, היו עדיין כמה וכמה שאלות פתוחות. עדיין נותרו כמה יסודות שלא התאימו למקום שלהם בטבלה ועובדה זו המשיכה להטריד את מנוחתם של המדענים. ארגון ויוד, למשל, היו שני יסודות שהסידור על פי משקל אטומי הציב אותם במקומות לא הגיוניים בטבלה, באותה המשפחה עם יסודות בעלי תכונות שונות משלהם. היה ברור שהטבלה נכונה באופן עקרוני מכיוון שרוב היסודות התאימו לטבלה המחזורית, אבל היו כמה יוצאי דופן. טבלה הייתה כמעט מושלמת- אבל רק כמעט. משהו היה עדיין חסר.

הפתרון לחידה הזו הגיע כתוצאה עבודתו של מדען בשם הנרי מוזלי. מוזלי הפגיש אטומים של יסודות שונים בקרני רנטגן (קרני איקס, כפי שכונו אז) ומדד את מידת הפיזור של הקרניים- עד כמה משנות קרני הרנטגן את מסלולן לאחר ההתנגשות עם האטום. הוא הגיע למסקנה המפתיעה שמידת הפיזור של הקרניים קשורה למיקום של היסוד המופגז בטבלה המחזורית. מחקר נוסף העלה שהפיזור הזה תלוי במספר הפרוטונים שישנם בגרעין האטום.

הסתבר שהסידור המדויק ביותר של היסודות בטבלה המחזורית יהיה לפי מספר הפרוטונים בגרעין ולא לפי המשקל האטומי של היסוד. מדוע?

בדרך כלל, המשקל האטומי מהווה אינדיקציה ברורה לגבי מספר הפרוטונים בגרעין וכמספר הפרוטונים עולה המשקל האטומי עולה יחד איתו באותה המידה. אבל גרעין האטום לא מכיל

פרוטונים בלבד, אלא גם נויטרונים. במרבית המקרים הנויטרונים נמצאים בגרעין במספר שווה לזה של הפרוטונים ואז הקשר בין מספר הפרוטונים למשקל האטומי נשמר. במקרים מסוימים, עם זאת, ישנו מספר לא זהה של פרוטונים ונויטרונים בגרעין: יש עודף של פרוטונים או עודף בנויטרונים. אטום כזה מכונה 'איזוטופ'. במקרים כאלה, המשקל האטומי כבר לא תואם בדיוק למספר הפרוטונים בגרעין. הנה דוגמא: לאטום פחמן רגיל יש שישה פרוטונים ושישה נויטרונים בגרעין. קיים גם איזוטופ של הפחמן שגרעינו מכיל שני נויטרונים נוספים, דהיינו שישה פרוטונים ושמונה נויטרונים. האיזוטופ הזה מכונה בשם 'פחמן 14'. לפחמן רגיל ופחמן 14 תכונות כימיות כמעט זהות, אבל המשקל האטומי שלהם שונה מאוד בעקבות שני הנויטרונים שהתווספו לגרעין. הסידור בטבלה המחזורית משקף את התכונות הכימיות של היסודות ועל כן ברור שהמשקל האטומי הוא לא מתאים לצורך הסידור בטבלה. מספר הפרוטונים בגרעין אינו משתנה בין פחמן ופחמן 14, ועל כן הוא זה שעל פיו נקבע מיקום היסוד בטבלה.

ברבות השנים נוספו עוד כמה וכמה יסודות לטבלה המחזורית. המדענים הצליחו לייצר במעבדה יסודות רדיואקטיביים שאינם קיימים בטבע, איזוטופים רבים נתגלו ליסודות השונים וטעויות קטנות בטבלה נתגלו ותוקנו. למרות זאת, אפשר לומר בבטחה שהצורה העקרונית של הטבלה המחזורית נותרה דומה למדי לזו ששירטט דימיטרי מלנדייב לפני כמעט מאה וחמישים שנה.

שאלות על המאמר: הדרך אל הטבלה המחזורית / מילכה ברקו גרש

1. מה חשיבותה של הטבלה המחזורית?
2. מי הראשון שגילה יסוד כימי? מיהו היסוד? כיצד נתגלה?
3. ממה מורכב האטום? (שמות אבני הבניין, מיקום, מסה.)
4. מהו משקל אטומי?
5. מדוע הפסיק לבואז'יה את פעילותו המדעית?
6. למה שם לב המדען אלכסנדר בגוייר? מה הייתה תגליתו והאם דעתו התקבלה על הקהילה המדעית בזמנו?
7. מה המשותף לדימיטרי מנדלייב וללותר מאייר?
8. מנדלייב ולותר מאייר- סכמו בקצרה על כל אחד מהם.
9. תארו את עבודתו של הנרי מוזלי ומה התברר כתוצאה ממנה.
10. לפי המאמר: מה קובע תכונות של חומרים?