



# 150 שנה לגילוי חוק המחזוריות של היסודות

ד"ר אליק גרויסמן

"האמת היא אחת, אבל יש דרכים רבות למצוא אותה."

(דמיטרי מנדלייב, המוטיבציה של השיטה המדעית.)

ב-1899 ביוזמתו של מנדלייב. התקשרתי למנהל מוזיאון-ארכיון של מנדלייב פרופסור איגור דמיטרייב. אחרי פגישה איתו חשבתי מחדש על התגלית העיקרית בחייו של מנדלייב, הבנתי את אופיו המורכב של מנדלייב כמדען, כאדם, את יחסיו עם עמיתים, יחסיו ליהודים, את המיתוסים על אודותיו שקיימים בספרות ובאינטרנט. התרגשנו מאוד (עם אשתי אולגה, שגם סיימה את האוניברסיטה הכימית טכנולוגית על שמו של מנדלייב במוסקבה) לראות את מקום חייו ועבודתו של מנדלייב. זה היה השיא של הנסיעה שלנו לסנקט פטרסבורג במאי-יוני 2019. המצאות רבות, אוספי ספרים, מפות מצוירות ביד, דפי ניסויים ודיוקנאות של חברים ועמיתים הוצגו. פרופסור דמיטרייב הסב את תשומת ליבנו לעובדה שמנדלייב גילה את חוק המחזוריות ולא את הטבלה המחזורית. מדענים רבים לפני מנדלייב הציעו צורות שונות של

## מבוא

שני אירועים היו משמעותיים במהלך כתיבת המאמר הזה. הראשון היה החניכה של האקדמיה הרוסית למדע והכרזה של אונסק"ו (ארגון החינוך, המדע והתרבות של האו"ם) על השנה הבינלאומית של הטבלה המחזורית של יסודות כימיים (2019 IYPT). טקס הפתיחה התקיים בפריז ב-29 בינואר [1-3] 2019. האגודה הישראלית להנדסה כימית וכימאים ארגנה את הכנס בעברית ב-5 במרס 2019 בתל אביב [4]. כתב העת "על-כימיה" ביקש ממני לכתוב מאמר על תגליתו של מנדלייב. האירוע השני היה ביקורי בסנקט פטרסבורג, העיר שבה מנדלייב למד, עבד, חי וגילה את החוק המחזורי ב-1869. כשהמאמר היה כמעט מוכן, הגעתי לסנקט פטרסבורג שברוסיה כדי ללמד קורס קורוזיה באוניברסיטה הפוליטכנית על שם פיטר הגדול שנוסדה

\* ד"ר אליק גרויסמן, הטכניון חיפה [www.alecgroysman.com](http://www.alecgroysman.com) [alecgroysman@gmail.com](mailto:alecgroysman@gmail.com)

## כיצד גילה מנדלייב את חוק המחזוריות של היסודות הכימיים?

ב-1867, כאשר מנדלייב היה בן 33, הוא החל להרצות על כימיה אי-אורגנית לסטודנטים בקורס המבוא [11]. מנדלייב העביר את הקורס עד שעזב את האוניברסיטה בשנת 1890. בתוך כך היה עליו להמליץ על ספרי לימוד כימיה לסטודנטים, וכשלא מצא את הספר המתאים החליט לכתוב את ספרו "יסודות הכימיה" (Osnovi Chimii - Основы Химии - Principles of Chemistry). במהלך עבודתו על ספר זה בשנים 1867-1871 גילה מנדלייב את חוק המחזוריות של היסודות הכימיים. שישים ושלושה יסודות כימיים היו ידועים עד אז, ונרכש די ידע על היסודות הכימיים, על המאפיינים שלהם ועל היישומים שלהם. בכל סיטואציה מדעית, הצטברות של נתונים חדשים מצריכה סיווג, וכך קרה עם היסודות הכימיים. נקדיש רגע לזכור את שמות המדענים ואת תרומתם למיון היסודות כימיים (טבלה 1).

האם ידע מנדלייב על כל קודמיו? נראה כי ידע לפחות על חלקם, שכן התייחס אליהם בעבודתו. למנדלייב לא היה ידע על מבנה האטום. המודל הפלנטרי של האטום שהציג ארנסט רתרפורד

טבלאות הכוללות את היסודות הכימיים. לכן הכותרת שהוכרזה על ידי אונסק"ו אינה ממש נכונה. פרופסור דמיטרייב שלח לי את כל פרסומיו הרבים (רובם ברוסית) ותמונות הקשורות למנדלייב. קריאת מאמריו [16-5] עזרה לי לכתוב מאמר זה בצורה חדשה. בתוך כך ניתחתי פרסומים רבים באנגלית, ברוסית ובעברית. עכשיו אני מזמין אתכם להיסטוריה המדהימה של גילוי חוק המחזוריות של היסודות הכימיים על ידי מנדלייב.

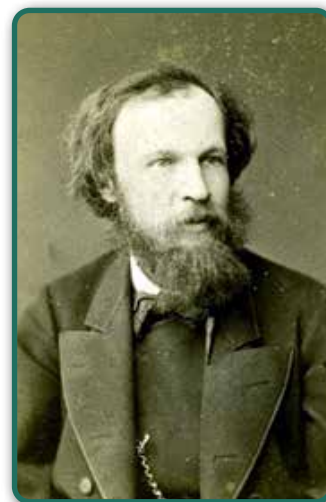
## סיפור אישי

כאשר נכנסתי בפעם הראשונה לכיתה לימוד הכימיה בבית הספר בגיל ארבע-עשרה, נדהמתי מהטבלה הצבעונית שהתנוססה על קיר הכיתה. ולצידה התבונן אליי איש עם זקן (ראו איור מס' 1). הייתי בטוח שזהו משה רבנו אשר הוביל את עם ישראל לארץ כנען, מסיפורי הסבתא פרימה שלי. הוא הסתכל עליי כל שיעור כימיה. זה היה דמיטרי מנדלייב אשר "דיבר" איתי כל השיעור. כך נוצר "קשר כימי הדוק", ולאחר ארבע שנים התקבלתי לאוניברסיטה לטכנולוגיה כימית על שמו מנדלייב במוסקבה. בכניסה הביטו בי אותן פנים, והכיתוב: "זריעה מדעית תגדיל את הקציר הלאומי". אלו היו מילות הפרידה של מנדלייב לכל אדם שמתחיל ללמוד כימיה.

למדתי על איזוטופים, איך להפריד ולייצר אותם. בסוף הלימודים, ב-1973, רשמתי פטנט על ייצור האיזוטופ  $^{48}\text{Ca}$  בשיטה חדשה של אמלגמה-כרומוטוגרפית [17]. איזוטופ זה "משחק" תפקיד חשוב בייצור וגילוי של יסודות על-כבדים "אחרונים" 113-118 בטבלה מחזורית של מנדלייב. זה היה פרויקט של המדען הרוסי גיאורגי פליוורוב לסינתזת יסודות על-כבדים. היסוד מספר 114 שייצרו לראשונה ב-1998 על ידי הפצצת  $^{244}\text{Pu}$  באיזוטופים של  $^{48}\text{Ca}$  בעיר דובנה שברוסיה קיבל את שמו, "פלורוביום" [18, 19].

בשנת 1969 השתתפתי בחגיגות "100 שנה לחוק המחזוריות של מנדלייב". השנה אנו חוגגים 150 שנה. מה השתנה?

האירוע הזה הוא באמת יוצא דופן וממשי. אנחנו חוזרים שוב ושוב לגילוי של מנדלייב לפני 150 שנה, אשר נתן את הבנת המחזוריות של תכונות ואפשרות חיזוי של יסודות כימיים חדשים.



איור 1. דימטרי מנדלייב (1869), השנה שגילה את חוק המחזוריות



איור 2. השער של הספר "עקרונות הכימיה" שכתב מנדלייב, 1869

טבלה 1. צעדים היסטוריים במיון יסודות כימיים

התורם	שנה	תרומה
אנטואן-לורן דה לבואזיה (1743-1794)	1789	יצר רשימה של 33 יסודות כימיים שהיו ידועים באותה עת וקיבץ אותם לגזים, מתכות, אל-מתכות ונמצאים באדמה [20, 21].
ג'ון דלטון (1766-1844)	1803, 1808, 1827	חישב את המשקל* היחסי הראשון של האטומים [22].
יוהאן וולפגנג דוברינר (1780-1849)	1817, 1829	סיווג את היסודות לשלוש - חוק השלוש [20, 22].
לאופולד גמלין (1788-1853)	1827, 1843	יצר קשרים מעבר לשלישיות [22, 23]
פול קרמר	1852, 1858	השווה בין יסודות בשני כיוונים: אופקי ואנכי [20, 21].
ג'ון האל גלדסטון (1827-1902)	1853	סידר את כל היסודות הידועים לפי משקלם האטומי [24, 25].
ג'וסאיה פרסונס קוק (1827-1894)	1854	מאמרו על משקל אטומי היה המבשר לחוק המחזוריות שגילה מנדלייב [26, 27].
ארנסט לנסן	1857	ניסה להבהיר את המשקלים האטומיים הממוצעים או את ה"שלוש" [21, 22, 28].
מקס יוזף פון פטנקופר (1818-1901)	1858	דחה את תיאוריית ה"שלוש" והרחיב את הקשר בין היסודות לקבוצות גדולות יותר. את עבודותיו ציטט מנדלייב בבניית הטבלה המחזורית של היסודות [26, 29, 30].
ז'אן-באפטיסט אנדרה דומא (1800-1884)	1857, 1859	התרחק מרעיון ה"שלוש" והתמקד במקום במציאת מערכת של משוואות מתמטיות שיכולות להסביר את העלייה במשקל אטומי בקרב כמה קבוצות של יסודות דומים כימית [20, 21, 26].
אדולף שטרקר (1822-1871)	1859	מצא את הדימיון בין היסודות שנמצאים בקבוצת הברזל [31].
ויליאם אודלינג (1829-1921)	1857, 1864-1865	הכין טבלה שהיתה דומה להפליא לטבלה שהפיק מנדלייב [32, 33].
אלכסנדר-אמיל בגויה דה שנקורטואה (1820-1886)	1862	סיווג את היסודות לפי העלייה במשקלים האטומיים שלהם (ספירלה סביב גליל - 'בורג טלוריק') [33, 34].
ג'ון אלכסנדר ריינה ניולנדס (1837-1898)	1863-1865	גילה את המחזוריות בצורת "חוק האוקטבות" (מכיוון שתכונות היסודות חזרו על כל יסוד שמיני, כמו תווי הסולם המוזיקלי) [26]. הוא לא השתמש במונח "מחזוריות" [16].
גוסטבוס דטלף הינריכס (1836-1923)	1855, 1867	לטבלה שלו הייתה צורה של ספירלה והיסודות סודרו בה בהתאם למשקלם האטומי [35, 36].
ג'וליוס לותר מאייר (1830-1895)	1864, 1869 (דצמבר)	סיווג 28 יסודות לשש משפחות לפי הערכיות שלהם [37]. בשנת 1869, כמה חודשים לאחר מנדלייב, פרסם מאייר גרסה מתוקנת ומורחבת של הטבלה שלו משנת 1864, שהיתה דומה לזו שפרסם מנדלייב** [37].
דמיטרי אייונוביץ' מנדלייב (1834-1907)	1869	הודיע על תגליתו שלפיה, "תכונות היסודות הן תכונה מחזורית של משקלם האטומי" [11, 16, 26]. היתרון בטבלה של מנדלייב על פני ניסיונות קודמים היה בכך שהיא הציגה דמיון לא רק ביחידות קטנות כמו השלוש, אלא הראתה קווי דמיון ומחזוריות ברשת שלמה של מערכות יחסים אנכיות, אופקיות ואלכסוניות.

\* המושג המקובל היום הוא "מסה אטומית", אך נתייחס למושג בטרמינולוגיה הנהוגה בנקודת מבט היסטורית.

\*\* מנדלייב שלח את הטבלה שלו לרבים מהכימאים שהיו ידועים בימיו, ובהם גם מאייר, כנראה. אין מידע אמין שלפיו הגיליון עם ההסבר לטבלה נשלח למייר. מאייר ראה רק את התקציר הגרמני למאמרו הראשון של מנדלייב על חוק המחזוריות. (פורסם ב: Zeitschrift Fur Chemie, N. F., 1869. Bd. 5. S. 405-406). בשנת 1882 קיבלו גם מאייר וגם מנדלייב את מדליית דיווי מידי החברה המלכותית באנגליה, כהוקרה על עבודתם בנושא חוק המחזוריות.

ו"גוף פשוט". יסוד יכול להתקיים בטבע בצורות שונות. לדוגמה, היסוד פחמן יכול להתקיים בצורת גופים פשוטים, כמו יהלום, גרפיט וכו'. מנדלייב סיווג את היסודות ולא את הגופים הפשוטים [5, 15]. באמצעות דוגמת היסודות הקלים (עם משקלים אטומיים מ-1 עד 40) מנדלייב השתכנע לא רק כי התכונות של היסודות "מתבטאות... במשקלם האטומיים", אלא גם בעובדה שכאשר היסודות מסודרים בסדר עולה של משקלם האטומי, נצפתה "מחזוריות של תכונות". כך גילה מנדלייב את חוק המחזוריות. בתחילת 1869 פרסם אפוא את מאמרו, "ניסיון של מערכת

ומודל האטום על פי נילס בוהר הופיעו 42 שנים לאחר גילוי של מנדלייב. ב-1913 הוציע הנרי מוזלי את העיקרון המארגן של הטבלה המחזורית הכוללת את היסודות הכימיים לפי מספר אטומי (שווה למטען גרעיני) במקום משקלים אטומיים, וכך הוסברו חריגות בטבלה המחזורית (לדוגמה: Te - I, Ni - Co). נתקדם לפי דרך חשיבתו של מנדלייב שהובילה אותו לגילוי חוק המחזוריות. הרעיון הבסיסי הראשון שמנדלייב הסתמך עליו היה קשור להשפעת מסת הגוף על התכונות הפיזיקו-כימיות שלו. נוסף על כך, מנדלייב הבין את הצורך להבדיל בין המושגים "יסוד"





איור 3. שולחנות עבודה במשרדו של מנדלייב וכן הסיפריה בחדרו

העיקריים של המדע בסוף המאה ה-19 עד ראשית המאה ה-20. הוא דחה את המחשבה המדעית של אותה תקופה כי "מבולבל ביונים ובאלקטרונים" [16]. גילוי חוק המחזוריות לא היה תהליך פשוט. ראשית, חלק מהמידע שנגע למשקלים האטומיים היה לא מדויק. שנית, הייתה סתירה בין משקלים אטומיים של יסודות לבין הסדר של שלושת הזוגות של יסודות (לדוגמה: Te - I). שלישית, נדרש הסבר לגורמים הפיזיים של המחזוריות מאחר שתכונות היסודות היו תלויות מעת לעת במשקלים האטומיים שלהם, מנדלייב ניסה להבין את טבע "המשקל האטומי" ואת תכונות המדיום המשדר את הכבידה, דהיינו את "האתר היקומי" ("Universal ether"). לדברי מנדלייב, אחת הדרכים להוכיח את קיומו של "אתר" יכולה להיות מחקר של גזים בלחצים נמוכים מאוד (rarefied gases). הוא אף חשב שהאתר הוא היסוד הקל ביותר, והיה צריך להופיע לפני המימן בטבלה המחזורית (ראו איור 4).

גילוי חוק המחזוריות לא הוכר מיידית על ידי הקהילה המדעית. אחת הסיבות לכך הייתה כי סיווג היסודות הכימיים לא נחשב לבעיה עיקרית, ולכן נתפס כלא ראוי לתשומת לב מדעית רצינית. כך, למשל, הנשיא הראשון של האגודה הכימית הרוסית, פרופסור ניקולאי זינין (1812-1880) אמר לאחר דיווחו של מנשוטקין שנזכר לעיל: "דמיטרי איונוביץ', הגיע הזמן להתחיל לעבוד" [16].

ואכן אנו יודעים כי תגליות במדע לא תמיד מתקבלות מייד. לפעמים נדרשות עשרות שנים כדי שמדענים יבינו ויעריכו תגלית כלשהי. דוגמה לכך היא הקוואזי-גבישים שגילה פרופסור דן שכטמן לראשונה ב-1982 ופרס הנובל שניתן לו רק ב-2011, כעבור 29 שנה! מנדלייב היה בר מזל, ותגליתו קיבלה הכרה לאחר שנים ספורות. יחסם של המדענים לטבלה המחזורית החל להשתנות רק עם גילוי היסודות הכימיים שחזה מנדלייב.

יסודות המבוססת על המשקל האטומי שלהם והדמיון הכימי".

### יום גילוי חוק המחזוריות (17 בפברואר 1869)

(התאריכים הקשורים לרוסיה של המאה התשע-עשרה עד תחילת המאה העשרים מובאים בסגנון הישן. אפשר להוסיף 13 יום על מנת לקבל את התאריך המודרני.)

מנדלייב השתמש בְיומן ושמר אותו. לכן אנו יודעים היום הרבה מהשיקולים וההערות שליוו את עבודתו. הוא עבד כל היום על אָסוף (טבלה) "ניסיון של מערכת היסודות" ("Attempt of the System of Elements"). בערב הזה שלח עותק של הטבלה המעודכנת לבית הדפוס. ב-20 בפברואר הוא עבד על מאמרו "יחסי תכונות עם משקל אטומי של יסודות" המכיל את הרעיונות הראשונים של התיאוריה של המחזוריות. בהמשך מסר את מאמרו לעמיתו ניקולאי מנשוטקין (1842-1907); אתם בוודאי זוכרים את התגובה בכימיה אורגנית הנקראת על שמו) לצורך פרסום ב"יומן של האגודה הרוסית לכימיה" ולצורך דיווח על התקדמותו בפגישה הקרובה של האגודה. ב-1 במרס 1869 שלח מנדלייב את דפי "הניסיון" לכימאים רבים ברוסיה ומחוץ לה. ב-6 במרס, דיווח מנשוטקין מטעם מנדלייב על "הניסיון של מערכת היסודות" בישיבה של האגודה הרוסית לכימיה [5]. היה זה מקרה חסר תקדים. מנדלייב ביקש מחברו להעביר את ההודעה הציבורית הראשונה על חוק המחזוריות בקרב קהל מקצועי של עמיתים כימאים. באותו זמן, הוא עזב את סנקט פטרסבורג ונסע לערוך בדיקות במפעלים לייצור גבינה. מדוע? אין הסבר. אנו יכולים רק לנחש. ההיסטוריה של גילוי חוק המחזוריות ויצירת המערכת המחזורית של היסודות הכימיים הינה רבת פנים ועדיין משמשת נושא לדיון בקרב מומחים [5, 15]. מנדלייב לא האמין בתיאוריה האטומית, וזה היה הפרדוקס העיקרי בתגליתו. עובדה זו מנעה ממנו לקבל את הגילוי של רדיואקטיביות, אלקטרונים ומההישגים

איור 4. דף מתוך העותק האישי של מנדלייב של "Natural System of Chemical Elements" עם הערותיו. בפינה השמאלית העליונה מול סמל המימן ישנו תיעוד של ה- "Universal ether"

## מי היה מנדלייב?

התמקדותו בבעיות גלובליות מדעיות הקשות ביותר בעולם. מנדלייב היה פילוסוף טבעי (natural philosopher), שכן בעיניו להגיע למטרה לא היה הדבר החשוב ביותר, אלא לראות כמה שיותר בדרך.

ב-1859 יצא מנדלייב לשנתיים התמחות באוניברסיטת היידלברג בגרמניה (שעבדו בה מדענים מפורסמים, כמו רוברט בוזן, גוסטב קירכהוף ואמיל ארלנמאייר). במעבדה של בוזן מנדלייב לא היה יכול לעבוד בגלל הריח הרע של הגופרית, ולעומת זאת באותם זמנים נהג לטייל עם המלחין לימים והכימאי אלכסנדר בורודין ועם הפיזיולוג איבן סצ'נוב, והשתתף בכינוס הבינלאומי הראשון לכימיה בקרלסרוהה, גרמניה. ב-1861 חזר לסנקט פטרסבורג והקדיש הרבה מזמנו בהוראה בחמישה מכונים חינוכיים שונים. הדעות על מנדלייב כמרצה ומורה בקרב בני זמנו היו מגוונות, ועם זאת אפשר להעיד כי תמיד נכחו בשיעוריו תלמידים רבים [5].

בשנת 1865, לאחר הגנה מוצלחת על התזה בדוקטורט שלו, "על תערובות של אלכוהול עם מים", קיבל מנדלייב את התואר פרופסור לכימיה באוניברסיטת סנקט פטרסבורג. במהלך תקופה זו באחזת בולובו שרכש ב-1865 (במחוז מוסקבה), ערך מחקרים באגרוכימיה ובחקלאות. העניין של מנדלייב בבעיות החקלאות היה עמוק כל כך עד שלא נחלש אף במהלך התפתחות תיאוריית מחזוריות היסודות הכימיים. מנדלייב היה נטורליסט מלומד וכלכלן מעמיק [9]. עבודתו של מנדלייב מתפלגת לתחומי הידע הבאים [16]: כימיה (29%), תעשייה (17%), כלכלה (14%), מטרולוגיה (11%), ניווט אווירי (9%), חקלאות (7%), פיזיקה (5%) ואחרים (8%). פעילותו כללה:

דמיטרי איונוביץ' מנדלייב נולד ב-27 בינואר 1834, הילד האחרון אחרי שישה-עשר ילדים במשפחתו. אביו היה איבן פבלוביץ' מנדלייב (1783-1847), מנהל הגימנסיה הקלאסית בעיר טובולסק (סיביר, רוסיה). אימו, מריה דמיטרייבנה לבית קורנילייבה (1793-1850), היתה בת למשפחת סוחרים מפורסמת בסיביר. דמיטרי לא היה תלמיד טוב, ובעיקר התקשה בלימודי הלטינית והגרמנית. הוא סיים את הגימנסיה ב-1849. אימו לקחה אותו למוסקבה ואחר כך לסנקט פטרסבורג. מאחר שמנדלייב הצעיר לא הרגיש עדיין שיש לו ייעוד מסוים, הוא חיפש אוניברסיטה מתאימה לפי שאיפות אימו, שהתעניינה בעיקר בחדשנות של המוסד הלימודי [5]. בסופו של דבר, ולא בנקל, הפך מנדלייב לסטודנט מן המניין במכון הפדגוגי הראשי בסנקט פטרסבורג. אימו נפטרה בספטמבר 1850, ומנדלייב נשאר לבד. הוא ידע שיכול לסמוך רק לעצמו.

למנדלייב היו יכולות טבעיות ונטייה חזקה למדעי הטבע, בעל סמפרנט ופינוק שנבע מההרגל לעשות רק מה שרצה ומה שמעניין בעיניו [10].

התכונה החשובה ביותר של מנדלייב ביחס ללימודיו באוניברסיטה היא היותו פולימאת, כלומר אדם בעל יכולת יוצאת דופן המתבטאת בין היתר ברבגוניות. עבודותיו של מנדלייב מכסות את הספקטרום הרחב ביותר: החל באווירונאוטיקה וחישוב הצורה האופטימלית של שובר קרח, דרך תיאוריה של תנודות משקולות, ועד עבודותיו הכימיות, הפיזיקו-כימיות והכימיות-טכנולוגיות [5]. התכונה השנייה של מנדלייב הנוגעת לסגנונו המדעי היתה



איור 5. פסלו של מנדלייב מוצב ליד הטבלה המחזורית (על הקיר) במוסד הרוסי למטלורגיה. הפסל גינצבורג הינו ידו של מנדלייב

בנוגע למקור השם מנדלייב, ובניהן אף הסברה שהוא צאצא של משפחת מנדל, או שסבו היה יהודי שהוטבל. אך בפועל, אביו של מנדלייב, איבן פבלוביץ', היה בנו של כומר רוסי בשם פאבל מקסימוביץ' סוקולוב. לפי המנהג של אותה תקופה, ארבעת בניו של האיש קיבלו שמות משפחה שונים. איבן פבלוביץ' קיבל את שמו של השכן בעל הקרקעות, מנדלייב [5]. אם לא כן, היה עלינו לכתוב את הטבלה המחזורית בשם "הטבלה של סוקולוב".

2. הטבלה המחזורית נראתה למנדלייב בחלום כמו השראה במהלך השינה: ראשית, מידע זה נמסר בפעם הראשונה על ידי עמיתו וידידו של מנדלייב, הגיאולוג הרוסי אלכסנדר אלכסנדרוביץ' אינוסטרנצב (1843-1919), בזיכרונותיו כפי שסיפר אותם כשהיה בן 76, כלומר, 50 שנה לאחר האירועים. שנית, מנדלייב, שאהב לספר סיפורים משעשעים מחייו, מעולם לא הזכיר את החלום הנפלא הזה. שלישית, הרישומים של המערכת המחזורית של היסודות שהגיעו אלינו אינם מאפשרים לנו לחשוף את ההשפעה של תובנה פתאומית. אינוסטרנצב סיפר עוד כי למנדלייב היה הרגל לשמור כל מה שכתב, כל דבר קטן, והוא ארגן בעצמו את הארכיון שלו. והנה, משום מה, מכל החומרים שהיו קשורים להיסטוריה של המערכת המחזורית, הציל מנדלייב רק חמישה דפים בכתב ידו [16].

3. מנדלייב הוא היוצר של הוודקה הרוסית: בשנת 1865 הגן מנדלייב על התזה בדוקטורט שלו, "על תערובות של אלכוהול עם מים". העבודה הוקדשה לחקר הצפיפות של תמיסות מים ואלכוהול, כתלות בריכוז ובטמפרטורה. נסיבות אלה היו הבסיס לאגדה שלפיה "מנדלייב הפך ליוצר של הוודקה הרוסית 40 מעלות" [39]. והנה, גם בפתקי העבודה של מנדלייב וגם בעבודת הדוקטורט עצמה לא מופיע אף לא רמז אחד לכך שהוא התעניין בתמיסות של אלכוהול במים שלפחות מתקרבות לריכוז של "הוודקה האידיאלית" (33.4% משקלי; כלומר 40° לפי

- בחינת הגורמים למשבר בתעשיית הפחם והנפט הגולמי.
- השתתפות בעבודה על עדכון תעריף המכס.
- יצירת אבקה ללא עשן (לצרכים צבאיים).
- הדפסים מחדש של "יסודות הכימיה" המתוקנים (שמונה מהדורות ראו עד 1906).
- השתתפות בפרויקט "שובר קרח".
- השתתפות במשלחת לאוראל (רוסיה) במטרה לשפר את תעשיית המתכות (תעשייה מטלורגית).
- הצעה לנקוט אמצעים של שימוש נרחב יותר בנפט גולמי, במוצרי נפט וייצור תרכובות יקרות ערך.
- בזמנו, כ-75% מהנפט נשרף כדלק. הביטוי המפורסם שלו, "אפשר לשרוף שטרות" [38] נחשב לאקטואלי גם היום.
- חיפוש עתודות נפט באזור באקו (הים הכספי); התנגד למס על נפט ותמך בבניית קו הנפט הטרנסקווקאזי.

מנדלייב סבר כי, "התפתחותה של החברה אפשרית רק באמצעות התקדמות התעשייה, המדע והחינוך". הוא היה חדור מטרה בהקשר של רעיון תיעושה של רוסיה האגררית. את מרב מרצו השקיע מנדלייב ביישום רעיונותיו. אחד המתנגדים העיקריים שקמו לו היה הסופר הרוסי לב טולסטוי, אשר ברומנים שלו תיאר רכבת כ"סמל לרע".

כאזרח ישראלי אני רוצה לציין את יחסו של מנדלייב ליהודים, כפי שבא לידי ביטוי בדבריו: "יהודים הם יהירים ובטוחים בעצמם". הוא הציע להם להתבולל ברוסיה, ונראה שהיה "אנטישמי מביתו". ועם זאת הדבר לא הפריע לו להתיידד עם פסל יהודי בשם גינצבורג שהקים פסל מעניין של מנדלייב העומד בסנקט פטרסבורג עד היום (ראו איור מס' 5) [9]. ראוי לציין כי הרעיון האנטישמי של מנדלייב היה גם נחלת רוב ההנהגה הסובייטית.

## מיתוסים על מנדלייב

באחרונה קראתי הרבה על מנדלייב ונתקלתי בסיפורים משעשעים עליו ועל חייו. כמה מהם הותירו בי רושם, כמו העובדה שהוא נהג לייצר מזוודות ואפילו מכר אותן; שיחק סולטייר; כתב את כל 63 היסודות הכימיים על כרטיסים אשר עזרו לו לגבש את חוק המחזוריות; גילה את החוק בזמן שינה; יצר את הוודקה הרוסית; עסק בריגול תעשייתי באמריקה ובצרפת; והיה בן למשפחה של יהודים מוטבלים. כל כך הרבה אגדות על מדען אחד! רק הפגישה עם פרופסור איגור דמיטרייב ביוני 2019 וקריאת מסמכים מפורטים ומאמרים אנליטיים עמוקים שכתב, אפשרו לי להבין דברים, לחדד הבנות ולפזר כמה מהמיתוסים הנוגעים למנדלייב. להלן כמה מההסברים החשובים הנוגעים לכמה מהמיתוסים הללו.

1. מקור שם המשפחה מנדלייב: קיימות כמה וכמה גרסאות

הדו"ח השנתי של חברת הרכבת על תנועת הסחורה, ומצא את היחס הנכון של החומרים הכלולים בייצור אבק שריפה". ואולם בזיכרונותיו של הבן מופיעים אי-דיוקים רבים. מיומנו של מנדלייב ומכתביו עולה תמונה ברורה שלפיה הוא לא עסק בנתונים סטטיסטיים כלשהם הנוגעים לרכבת כדי לזהות את סודות אבק השריפה בצרפת. כל זה מטיל ספק על עדות בנו של מנדלייב, אשר ב-1890 היה בן שש בלבד. המסקנה של מנדלייב הייתה ברורה: "אף אחד מהסוגים המוכרים של אבק שריפה חסרת עשן לא עמד בכל הדרישות לשימוש" [7].

## הווה והרהורים על עתיד הטבלה המחזורית

"נראה שהעתיד אינו מאיים על חוק המחזוריות  
אלא מבטיח התפתחות וארגון נוסף".  
(מנדלייב, 1905).

עוד בתקופת חייו של מנדלייב, יחס עמיתיו לחוק המחזוריות היה מגוון. חלק מהמדענים ראו בכך חוק יסוד של הטבע. אחרים (קקולה, בונזן, ברתלוט) היו ספקנים לגבי גילויו של מנדלייב. הרעיון המרכזי של מנדלייב היה לפתח את הידע הקיים על מחזוריות. הוא ראה במשקל האטומי כתכונה העיקרית של היסודות, ועם זאת, הוא ניחש כי יש להחליף קובלט וניקל, יוד וטלוריום - בהתאם לאופי השינוי בתכונותיהם, והפער בשינוי במשקלים האטומיים נחשב לאנומליה [45].

בתחילת המאה העשרים הופיע רעיון חדש - על המחזוריות בשל המבנה האלקטרוני של אטומים. בשנות העשרים של המאה העשרים הושגה הבנה מעמיקה יותר של חוק המחזוריות וקשריו ברמות האלקטרוניות של האטומים. בשנות השמונים התבררה לבסוף התיאוריה על אודות המבנה הכימי של החומר, אשר בסיסו נקבע לפי היבטים בטבלה המחזורית.

אנו מדברים על אירוע חשוב ויוצא דופן [19], המתרחש רק לעיתים רחוקות: גילוי שנעשה לפני 150 שנה הרלבנטי עד ימינו. המרכזים הגרעיניים הגדולים ביותר של רוסיה, ארצות הברית, גרמניה, יפן, צרפת וסין כוללים בתוכניות העיקריות שלהם את הסינתזה ואת המחקר של היסודות הכימיים החדשים, בדיון בגבולות הטבלה המחזורית ובגבולות תחולתו של חוק המחזוריות. בהקשר זה חשוב להתעכב על הרעיונות המרכזיים של פרופסור יורי אוגאנסיאן (שעל שמו נקרא יסוד מספר 118) כפי שבאו לידי ביטוי בריאיון שנערך עימו על הממצאים מחקר תכונותיהם של יסודות על-כבדים ועל החזון שלו בעבודתו העתידית הנוגעת למפעל יסודות על-כבדים, וכן בהרצאתו באונסק"ו ב-29 בינואר 2019 [2, 19].

נפח). מנדלייב התעניין בטווחים שונים לחלוטין של ריכוז, מעל 40% משקלי, ואלה היו במוקד תשומת ליבו, ובהתאם בוצעו רוב המדידות והחישובים שלו [5, 6, 14, 40]. מנדלייב גילה כי תמיסה עם ריכוז אלכוהול של כ-46% משקלי הייתה דחוסה ביותר. 40° נפחי, כמו הגבול התחתון של כוח וודקה (מבוסס על המלצתו של המדען הרוסי הס אבל לא על ידי מנדלייב!) הוצג על ידי ממשלת רוסיה ב-1866 [6].

4.1. מנדלייב היה מרגל תעשייתי רוסי: ב-1876 נשלח מנדלייב לארצות הברית כדי לבצע "משימה עדינה של ריגול תעשייתי" על מנת לגלות סוד של חידושים טכנולוגיים בתעשיית הנפט [41-44]. והנה, בקריאת בספרות שצינתי, נראה שהרושם ההפוך הוא כי מנדלייב השתמש רק במקורות רשמיים ובנתונים שקיבל מהבעלים של מפעלי הנפט האמריקניים.

בשנות השבעים של המאה התשע-עשרה, הנפט טרם זכה לערכים האסטרטגיים הצבאיים שקיבל במאה העשרים. מכל מקום, נשאלת השאלה, מדוע נשלח מנדלייב לארצות הברית ב-1876? ובכן, בשנים 1874-1875 פרץ משבר הנפט ברוסיה. מחירי הנפט והקרוסין ירדו, המפעלים החלו להיסגר בעשרות, ועלה צורך להבין את הסיבות למשבר. משרד האוצר הרוסי שלח את מנדלייב לקבל מידע על מצב תעשיית הנפט באמריקה. עם שובו ממסע העסקים הציג מנדלייב דו"ח מפורט לשר האוצר ופרסם את הספר "תעשיית הנפט במדינת צפון פנסילבניה ובקווקז". מנדלייב כתב שהאמריקאים סיפקו בחפץ לב את המידע הדרוש, והוא השתמש רק במקורות רשמיים [7]. המסקנה של מנדלייב הייתה כי למשבר הנפט באמריקה הייתה סיבה כלכלית: עודף היצע ("יצור) על פני הביקוש.

בדיוק ב-1876, המדען האמריקאי ג'וסיה וילארד גיבס פרסם באמריקה את מאמרו המפורסם, 376 עמודים על "אנרגיה חופשית" שאפשרה לפתור את בעיית הזיקה הכימית תיאורטית ולחשב כיוון של תגובות כימיות ספונטניות. אילו פגש מנדלייב את גיבס באותה שנה באוניברסיטת ייל באמריקה, אני סבור שהמדענים הרוסים ידעו על התרמודינמיקה הכימית קודם לכן.

4.2. יחד עם גניבת סודות הנפט האמריקניים, מנדלייב חשף עוד סוד חשוב של הפקת אבקה חסרת עשן [42]:

אבקה חסרת עשן הומצאה באמריקה רק ב-1895, עשרים שנה לאחר ביקורו של מנדלייב. ומנדלייב היה מעורב במחקר על אבקה ללא עשן רק ב-1890, השנה שבה נסע לאנגליה ולצרפת בשל העיסוק באבקה ללא עשן. שם קיבל מנדלייב בצורה רשמית את הדגימות הדרושות ואת הרכב האבקה ללא עשן, לרבות מידע על אופן הייצור שלה. נשאלת השאלה, מאין הגיעה השמועה? בזיכרונותיו של בנו של מנדלייב (איבן דמיטריביץ'), שנכתבו עשרים שנה לאחר מות אביו, נאמר כי "אבא לקח את



אוגאנסיאן מצוין עוד כי היו ניסיונות רבים לייצג באופן גרפי צורות שונות (מעל 400!) של הטבלה המחזורית [47, 48]. כך לדבריו זהו עניין של "עיצוב" הטבלה, ואילו את המהות שלה - את המחזוריות של מאפייני היסודות הכימיים - איש לא הצליח לשנות באופן יסודי [45, 49].

מדוע אנו צריכים להמשיך למלא את הטבלה המחזורית? פרופסור אוגאנסיאן משיב כי "אנו בוחנים ובכך לומדים את חוק הטבע שגילה מנדלייב לפני 150 שנה. אנו כבר מרגישים שהתקרבו לרגע שבו חוק זה מתחיל להשתנות, ולהשתנות במהירות. ידעת כל שינוי בחוקי הטבע (למשל, המחזוריות של תכונות היסודות הכימיים) היא מהותית" [19]. אני יכול רק להוסיף כי זו גם דרך להכיר את היקום שלנו.

## מנדלייב, טבלה מחזורית ואומנות

"לאומנות ולמדעי הטבע שורשים משותפים,

חוקי התפתחות כלליים, משימות ומטרות

זהות". (מנדלייב, 1880).

ישנו קשר כמעט ישיר, ומעניין, בין מדע ואומנות, בין מדענים ואומנים. אומנות מפתחת דמיון, יצירתיות, מחשבות לא טריוויאליות, אנלוגיות וניגודים, מערכות סמלים, סימטריה ואסימטריה, הייררכיות, ועוד דברים רבים שמדענים יכולים להשתמש בהם לעבודה פורייה.

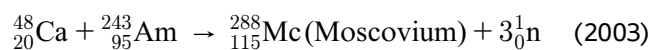
### ומה בין מנדלייב ואומנות?

כאמור, כאשר מנדלייב היה סטודנט, הוא הכיר את המלחין והכימאי אלכסנדר בורודין. אשתו שנייה של מנדלייב, אנה פופובה, למדה לנגן בפסנתר בקונסרבטוריון ואחר כך למדה



איור 6. ציור של מנדלייב הצייר הרוסי איליה רפין, 1885

"פיזיקה גרעינית ואטומית נותנים לנו תשובה כמה יסודות יכולים להיות בטבלה המחזורית. אטום (יסוד) קיים כל עוד קיים גרעין עם זמן מחצית חיים של לפחות  $10^{-14}$ . המודל המיקרוסקופי של הגרעין חוזה את קיום היציבות של יסודות על כבדים באזור. יסודות הממוקמים על האי הזה (עד  $Z = 118$ ) כבר מסונתזים לאחרונה. יסודות 119 ו-120 חייבים להתקיים גם כן. לייצירת יסודות 118-113, שימשו יוני סידן עשירי נויטרונים (איזוטופים  $^{48}\text{Ca}$ ). בתערובת טבעית של שישה איזוטופים של סידן, איזוטופ זה (עשיר בנויטרונים) קטן פי 500 (0.187% חלק מולי) מהאיזוטופ הראשי  $^{40}\text{Ca}$  הקיים בסידן טבעי על כדור הארץ [19]. הדבר יוצא דופן במספר נויטרונים עבור גרעינים קלים. כיום, האיזוטופים  $^{48}\text{Ca}$  מופקים על ידי הפרדה בשדה מגנטי בוואקום גבוה. רק במקום אחד בעולם מייצרים  $^{48}\text{Ca}$ : מתקן רוסי בעיירה לסנוי, כ-250 ק"מ מהעיר יקטרינבורג. לכן, איזוטופ  $^{48}\text{Ca}$  הוא נדיר מאוד ויקר: \$ 500,000 עבור 2 גרם בלבד. ייצורו מסתכם ב-10 גרם בשנה, 2 כפיות [46]. אפשר לרשום מספר תגובות עם ההשתתפות של איזוטופ  $^{48}\text{Ca}$  לייצור יסודות על-כבדים:



כעת מנסים להשתמש באיזוטופים של יוני טיטניום ( $^{50}\text{Ti}$ ) כדי לקבל יסודות שמספרם האטומי הוא 119 ו-120. נוסף על כך חשוב מאוד להראות אם היסוד  $^{118}\text{Og}$  הוא גז אצילי דומה אנלוגי לקבוצה ה-18 בטבלה המחזורית. "זה גם סביר כי תימצא קפיצה של תכונות כימיות של יסוד מספר 119. יש סיבה להאמין כי עם העליית מספר אטומי עבור יסודות 121-123, ההבדלים הקבוצתיים כמעט ייעלמו. בעיקרו של דבר, המחזוריות בשינוי התכונות הכימיות של היסודות תיעלם. הטבלה המחזורית 'הישנה' תוחלף בטבלה 'החדשה', ותשונה מאוד בתחילת השורה (period) ה-8. לאחר גילוי יסודות על כבדים, כמו מתוך תיבת פנדורה, הופיעו בעיות רבות. לחלק מהן אין עדיין פתרון" [2, 19]. כאשר מומחים מייצרים תרכובת כימית שאינה קיימת, זה בלתי אפשרי להכין אותה ללא הטבלה המחזורית, המהווה כלי שימושי. כימאים שעסקו בסינתזה של חומרים חדשים הצביעו על שני חסרונות משמעותיים בטבלה המחזורית [45]. ראשית, לעיתים קרובות הם זקוקים ליסוד כימי ש... אינו קיים, למרבה הצער. שנית, תכונות של יסודות כימיים משתנות בקפיצות, עם הבדלים גדולים בין יסודות שכנים בשורה (period). איננו יכולים "להערים" על חוק היסוד של הטבע רק כדי להפוך את השינויים האלה באופן הדרגתי יותר.





איור 7. דיוקן של מנדלייב שצויר ע"י הצייר הרוסי איבן קרמסקוי, 1878

הטבלה המחזורית של מנדלייב העניקה השראה לא רק לכימאים, אלא גם לסופרים, משוררים, מלחינים, זמרים ואדריכלים, אשר יצרו יצירות אומנות בעקבותיה. בתחילת שנות השישים ראו אור סיפורים על יסודות כימיים, כלומר, על סוגי האטומים שמהם בנויים כוכבי הלכת והכוכבים, האדמה, המים, האוויר, הצמחים, בעלי החיים ואנחנו עצמנו [53]. פְּרִימוֹ מִיקֵלָה לוי כימאי וסופר איטלקי יהודי, ניצל אושוויץ, אשר כתב את הספר "הטבלה המחזורית" ב-1975 [54], ובו סיפורים קצרים אנלוגיים לשמות היסודות הכימיים. ב-2006 בחר המכון המלכותי הבריטי בספר "הטבלה מחזורית" לספר הטוב ביותר אי פעם [55, 56].

הטבלה המחזורית הגדולה ביותר בעולם נמצאת על בניין הפקולטה לכימיה באוניברסיטת מורסיה בספרד (ראו איור 8); והקטנה ביותר - באוניברסיטת נוטינגהאם באנגליה [57]. האחרונה בוצעה בעזרת חרוט על שטח שבב סיליקון בשיטת ליתוגרפייית קרן אלקטרונים.

יש אינספור תיאורים ערמומיים ואומנותיים של הטבלה המחזורית [58]. הטבלה המחזורית בעבודת מקרמה של ג'יין סטיוארט, אשר השקיעה 350 שעות בקשירת 200,000 קשרים בחוטים צבעוניים לרגל חגיגת 150 שנה לחוק המחזורי של מנדלייב (ראו

לצייר באקדמיה הרוסית לאומנויות. מנדלייב היה קמצן, אבל קנה ב-30 רובל (!) את התמונה שציירה אשתו אנה עם סיום לימודיה באקדמיה לאומנויות, "היום האחרון של פומפיי" (העתק ציורו של הצייר קרל ברילוב). תמונה זו נמצאת עד היום על קיר דירתו של מנדלייב, שהפכה למוזיאון.

כמו כן, מנדלייב ארגן פגישות בביתו מדי יום רביעי, ובהם התכנסו אומנים, מדענים, סופרים ומלחינים שפעלו בסנקט פטרסבורג, מ"מיטב" אנשיה של התרבות הרוסית.

בביתו ביקרו הציירים הרוסים המפורסמים, איליה רפין, איבן קרמסקוי, ניקולאי יארושנקו, ארכיפ קוינג'י ואיוואן שישקין. בזכות שלושת הראשונים, יש לנו היום דיוקנאות של מנדלייב (ראו איורים מס' 6 ו-7). דיוקנאות שציירו רפין ויארושנקו נמצאים בגלריית טרטיאקוב במוסקבה. אף מדען רוסי לא זכה לתשומת לב כזאת בקרב ציירים לאורך חייו.

בין כל האומנויות מנדלייב אהב ביותר את תחום הציור. אף שהבנתו בציור הייתה מצוינת, מעולם הוא לא פרסם דבר בנושא זה. היוצא מן הכלל היחיד בהקשר זה הוא מאמר הנוגע לתמונתו של קוינג'י, "ליל הירח על הדנייפר". המאמר נקרא "לפני תמונתו של קוינג'י" (על הסיבה להשפעת הנוף על הצופה; 1880) [52 - 50], ומנדלייב כתב בו על הקשר בין אומנות למדע.

מנדלייב החל לאסוף יצירות אומנות מ-1880. הוא חקר יצירת צבעים ארוכי טווח, ונתן הרצאות לפני קהל ציירים על כימיה ופיזיקה של צבעים. ב-1884 מנדלייב אף נבחר לאקדמיה הרוסית לאומנויות. אך לאקדמיה הרוסית למדעים לא בחרו בו!

ומציור - למוזיקה. מנדלייב היה מעריץ של מוזיקה קלאסית. אהבה מיוחדת הייתה לו ליצירותיו של המלחין הגרמני בטהובן, במיוחד אהב להקשיב ולשיר את הפתיחה לאופרה "לאונורה" ("פידליו"), ועל כן זכה לכינוי "לאונורה". המלחין והכימאי בורודין, שככל הנראה חש מוטרד מכך שמנדלייב לא האזין ליצירותיו, אלא לאלה של בטהובן, סיים את מכתבו לחברו במילים "שלום, לאונורה". כמו כן, תמונתו של בטהובן והמלחין הרוסי מיכאיל גלינקה היו תלויות על הקיר בחדר עבודתו של מנדלייב.

מנדלייב אהב את הבלט של פיטר צ'ייקובסקי "אגם הברבורים", את האופרה של גלינקה "החיים של הצאר" ("איבן סוסנין"), את שירו של ג'ורג' בירון "החושך" ואת שירו של פיודור טיוטצ'ב "שתיקה".

מנדלייב גרס כי אומנות ומדע הם "שני צדדים של שאיפתנו ליופי, להרמוניה נצחית, לאמת הגבוהה ביותר" [52]. מנדלייב שאף לקרב אנשי מדע ואומנות, ולכן בתחילת 1870 יזם בסנקט פטרסבורג, יחד עם הצייר קרמסקוי, חברה לאחדותם של מדענים, אומנים וסופרים.



איור 8. הטבלה המחזורית הגדולה ביותר בעולם. אוניברסיטת מורסיה, ספרד

יותר מאשר את המטרה. אני ממליץ לקרוא יצירות אנליטיות, מפורטות ומדעיות מבריקות של פרופסור איגור דמיטרייב ואת כל המאמרים בכתב העת הרוסי "פרירודה" (Nature; מספר 2, 2019) בנוגע למנדלייב ולחוק המחזוריות.

כך הגעתי לסוף המסע שלנו לעבר, להווה ולעתיד של חוק המחזוריות, בתקווה שמצאתם הרבה דברים מעניינים ושתמצאו אף יותר מכך בספרות המומלצת.



איור 10. הטבלה המחזורית היקרה ביותר בעולם, עשויה מסרט כסף עם חיבורי זהב, פלטינה, פלדיום ויהלום

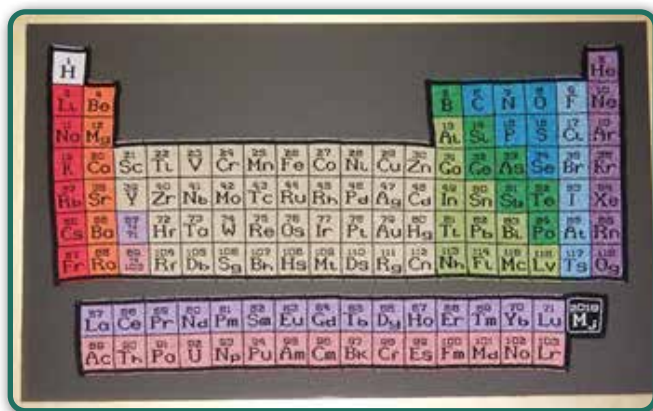
איור 9) [57]. הטבלה המחזורית היקרה ביותר בעולם נמצאת כנראה באוניברסיטת קיימברידג' (ראו איור 10). היא עשויה מסרט כסף עם חיבורי זהב, פלטינה, פלדיום ויהלום.

הטבלה המחזורית העניקה השראה גם מוזיקאים וזמרים, אשר יצרו שירים [62-59], אשר מעבר להיותם יפים ונעימים לאוזן הם מסייעים בחינוך והגברת המידע והידע על הטבלה המחזורית של היסודות הכימיים.

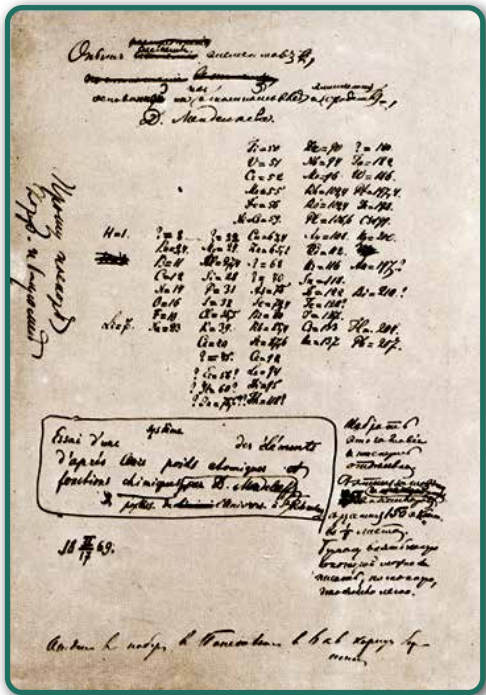
לסיכום, חוק המחזוריות משמעותי לא פחות מחוק הכבידה של ניוטון ומתורת היחסות של איינשטיין [45]. שפת הכימיה היא בינלאומית. זוהי שפה אוניברסלית ושיטתית של ידע, כלי מחקר וחינוך. הטבלה המחזורית מתפתחת באופן דינמי.

חוק המחזוריות ודימויו הגרפי בצורת הטבלה המחזורית של היסודות הכימיים אפשרו לפתח שפה אוניברסלית הדומה למוזיקה או למפה גיאוגרפית למטיילים. הטבלה המחזורית מקשרת אנשי מקצוע הפותרים בעיות מורכבות בתחומי הכימיה, הפיזיקה, האסטרופיזיקה, הקריסטלוגרפיה, הגיאוכימיה, הביוכימיה, הביולוגיה, הרפואה ועוד. תפקידה וחשיבותה של הטבלה המחזורית נותרו אפוא גדולים: כלי שיטתי של ידע במדע.

התחלתי לכתוב מאמר זה במרס 2019 וחשבתי שאסיים אותו בתוך חודש. במהלך הכתיבה בשלושת החודשים האחרונים הבנתי שאי אפשר לכסות את כל מה שקשור לחוק המחזוריות ולמנדלייב. המידע על נושא זה מזכיר לי כדור שלג, וכנראה שלעולם אינו מסתיים. בדומה למנדלייב, אני אוהב את הדרך



איור 9. הטבלה המחזורית בעבודת מקרמה של ג'יין סטיארט



**ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ,  
ОСНОВАННОЙ НА ИХ АТОМНОМ ВЕСЕ  
И ХИМИЧЕСКОМ СХОДСТВЕ**

<p>H = 1</p> <p>Be = 9,4    Mg = 24</p> <p>B = 11    Al = 27,4</p> <p>C = 12    Si = 28</p> <p>N = 14    P = 31</p> <p>O = 16    S = 32</p> <p>F = 19    Cl = 35,5</p> <p>Li = 7    Na = 23    K = 39</p> <p>Ca = 40</p> <p>? = 45</p> <p>?Er = 58</p> <p>?Yt = 60</p> <p>?In = 75,6</p>	<p>Ti = 50    Zr = 90    ? = 180.</p> <p>V = 51    Nb = 94    Ta = 182.</p> <p>Cr = 52    Mo = 96    W = 186.</p> <p>Mn = 55    Rh = 104,4    Pt = 197,4</p> <p>Fe = 56    Ru = 104,4    Ir = 198.</p> <p>Ni = 59    Co = 59    Pd = 106,6    Os = 199.</p> <p>Cu = 63,4    Ag = 108    Hg = 200.</p> <p>Zn = 65,2    Cd = 112</p> <p>? = 68    Ur = 116    Au = 197?</p> <p>? = 70    Sn = 118</p> <p>As = 75    Sb = 122    Bi = 210?</p> <p>Se = 79,4    Te = 128?</p> <p>Br = 80    J = 127</p> <p>Rb = 85,4    Cs = 133    Tl = 204.</p> <p>Sr = 87,6    Ba = 137    Pb = 207.</p> <p>Ce = 92</p> <p>La = 94</p> <p>Di = 95</p> <p>Th = 118?</p>
--	---

D. Mendeleev.

איור 12. אחת הגרסאות של הטבלה המחזורית מהתאריך 17.2.1869

איור 11. אחת מהצעות של מנדלייב שנשלחה לעמיתיו הרוסים בסוף 1869

Естественная система элементов Д. Менделѣева.

Группы	Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII (разделен на 3)	Группа IX
Символы	RO'	RO' или RO	RO'	RO' или RO'	RO'	RO' или RO'	RO'	RO' или RO'	HO'
Группа I	H=1 Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	Cl=35,5	
Группа II	Na=23	Mg=24	Al=27,4	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5		
Группа III	K=39	Ca=40	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56	Co=59	Ni=59
Группа IV	Rb=85	Sr=87	Zr=90	Nb=94	Mo=96	Ru=104	Rh=104	Pd=106	Ag=108
Группа V	Cs=133	Ba=137	Ce=140						
Группа VI									
Группа VII									
Группа VIII									
Группа IX									

איור 13. הטבלה המחזורית של מנדלייב בסוף 1870

### הכרה

לאשתי **אולגה**, על דיון מפרה וקריטי ועל ביקורת בונה.

לפרופסור **איגור דמיטרייב**, אשר נתן לי באדיבותו את עבודותי [16-5] ותמונות (איורים 1-13), ועל מפגש מקצועי ומרתק, שיחות וביקור במוזיאון-ארכיון של מנדלייב באוניברסיטה הממלכתית בסנקט פטרסבורג.



1. [www.iypt2019.org](http://www.iypt2019.org) – 30.3.2019.
2. [http://webcast.unesco.org/live/vod/2019/sc/20192901\\_sc\\_room-01/en/](http://webcast.unesco.org/live/vod/2019/sc/20192901_sc_room-01/en/) - 30.3.2019
3. The United Nations Proclaims the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements, <https://iupac.org/united-nations-proclaims-international-year-periodic-table-chemical-elements/> - 30.3.2019.
4. 5 March 2019, [www.engineers.org.il](http://www.engineers.org.il)
5. I. S. Dmitiriev, The soul's despairing cry, Biographical sketch of D. I. Mendeleev, SCIENCE First Hand, 2012. Vol. 32, № 2. pp. 52-71.
6. I. S. Dmitiriev, National Legend, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 459-474. (in Russian).
7. I. S. Dmitiriev, Special Mission of Mendeleev, Arguments and Facts, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 475-498. (In Russian).
8. I. S. Dmitiriev, Boring History, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 397-458. (In Russian).
9. I. S. Dmitiriev, Socio-economic topic in creation by D.I. Mendeleev, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 262-395. (In Russian).
10. I. S. Dmitiriev, Protected Space of the Man of Science: A Historical Aspect (Career Trajectories of M. V. Lomonosov and D. I. Mendeleev), Publishing house "Nestor-Historia", Sociology of Science and Technology, 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 30-50. (In Russian).
11. I. S. Dmitiriev, Mendeleev: The Way to the Law (On the history of the discovery of the Periodic Law). In press. (In Russian). <https://sochisiri.ru/uploads/files2/chem-201904-dmitiriev-mendeleev.pdf> 7.7.2019.
12. I. S. Dmitiriev, Laboratory Space - Displayer and Killer, In Press. (In Russian).
13. I. S. Dmitiriev, Effective Mendeleev (World Ether, Artillery, and Art of Fundraising), Scientific effectiveness at work: tool or weapon, Ed. L.V. Shipovalova, St. Petersburg: Foundation for the Development of Conflictology, 2017, pp. 162-194. (In Russian). [http://philosophy.spbu.ru/userfiles/kathedras/scitech/Shipovalova/effectiveness\\_research/monografii%20nauka2.pdf](http://philosophy.spbu.ru/userfiles/kathedras/scitech/Shipovalova/effectiveness_research/monografii%20nauka2.pdf) 7.7.2019.
14. I.S. Dmitiriev, National Legend: Was D.I. Mendeleev the creator of the Russian "monopoly" vodka? Questions of the history of science and technology, 1999, № 2, pp.177- 183. (In Russian).
15. I. S. Dmitiriev, Scientific discovery in statu nascendi, Man of the era of change. Essays on D.I. Mendeleev and his time. SPb, Himizdat, 2004, pp. 90-207. (In Russian).
16. I.S. Dmitiriev, The Discovery of the Periodic Law: Three Puzzles and a Legend, Priroda, 2019, No. 2, pp. 34-43. (In Russian).
17. D.A. Knyazev, K.I. Sakodinski, A. Groysman, The separation of lithium and calcium isotopes by means of amalgamo - chromatographic method. A.S., 1975, SU.
18. <https://en.wikipedia.org/wiki/Flerovium> - 7.7.2019.
19. "We Have Come Close to the Limits of Applicability of the Periodic Law", Interview with Yu. Ts. Oganessyan, Priroda, 2019, No. 2, pp. 4-11. (In Russian).



20. Eric R. Scerri, The Evolution of the Periodic System, Scientific American, January 21, 2011. <https://www.scientificamerican.com/article/the-evolution-of-the-periodic-system/> - 7.7.2019.
21. <https://www.metafilter.com/178916/The-Chemical-Table-An-Open-Dialog-between-Visualization-and-Design> - 8.5.2019.
22. Eric R. Scerri, The Past and Future of the Periodic Table. Scientific American, January–February 2008, 96(1): 52-58.
23. [https://en.wikipedia.org/wiki/Leopold\\_Gmelin](https://en.wikipedia.org/wiki/Leopold_Gmelin). - 8.5.2019.
24. <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/gladstone-john-hall> - 8.5.2019.
25. J. W. van Spronsen, In: The Periodic System of Chemical Elements, Amsterdam, 1969, pp. 76–78.
26. William B. Jensen, Periodic Law and Table. Written for Britannica on Line, Encyclopaedia Britannica: Chicago, IL, 2000, but never published. 11 p.
27. [https://en.wikipedia.org/wiki/Josiah\\_Parsons\\_Cooke](https://en.wikipedia.org/wiki/Josiah_Parsons_Cooke) - 9.5.2019.
28. Melissa Yost, Timeline of the Periodic Table. <https://www.sutori.com/story/timeline-of-periodic-table--cBr1GUy-4EupkEWJPTSGofeLi> - 8.5.2019.
29. Eric R. Scerri, The Periodic Table: Its Story and Its Significance, Oxford University Press Inc., New York, 2006, 2008 p.
30. [https://en.wikipedia.org/wiki/Max\\_Joseph\\_von\\_Pettenkofer#cite\\_note-Oxford\\_University\\_Press\\_Inc-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Max_Joseph_von_Pettenkofer#cite_note-Oxford_University_Press_Inc-4) - 9.5.2019.
31. Adolph Strecker, Theorien und Experimente zur Bestimmung der Atomgewichte der Elemente, Vieweg, 1859, 146 p.
32. [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_periodic\\_table#William\\_Odling](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#William_Odling) - 6.5.2019
33. Heinz Cassebaum and George B. Kauffman, The Periodic System of the Chemical Elements: The Search for Its Discoverer, The University of Chicago Press Journal, Autumn, 1971, 62(3): 314-327.
34. [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_periodic\\_table#Alexandre-Emile\\_B%C3%A9guyer\\_de\\_Chancourtois](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#Alexandre-Emile_B%C3%A9guyer_de_Chancourtois) - 6.5.2019
35. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gustavus\\_Detlef\\_Hinrichs](https://en.wikipedia.org/wiki/Gustavus_Detlef_Hinrichs) 19.04.2019.
36. Gustavus Detlef Hinrichs, Contributions to Molecular Science or Atomechanics, IOWA-CITY, United States, 1868.
37. [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_periodic\\_table#Julius\\_Lothar\\_Meyer](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#Julius_Lothar_Meyer) - 7.5.2019.
38. D.I. Mendeleev, On oil matters (Article one. Introduction and about kerosene), Vol. 10. Oil. L.-M., 1949. pp. 387-478; p. 463. (In Russian).
39. V.V. Pokhlebkin, Mendeleev and Vodka, Ogonyok (Огонек), 1997, № 50, pp. 4-5. (In Russian).
40. D.I. Mendeleev, Discourse on the combination of alcohol with water. D.I. Mendeleev, Works: In 25 volumes, L., 1937. (In Russian).
41. A.N. Itzkov, Russia - United States: attempts of convergence, In: Essays on the history of Russian foreign

- intelligence, Vol. 1, From ancient times to 1917, Editor Academician E.M. Primakov, Publisher International Relationships (Mezhdunarodniye Otnosheniya), Moscow, 1995. (In Russian).
42. Arguments and Facts, 1996. № 10 (803). p. 16. (Weekly newspaper in Russian).
43. Sergey Chertoprud, Scientific - technical intelligence from Lenin to Gorbachev, Olma-Press Obrazovaniye, Moscow, 2002, 447 p. (In Russian).
44. Anatoly Dienko, Intelligence and counterintelligence in persons. Encyclopedic dictionary of the Russian special services. Russki Mir, Moscow, 2002, p. 328. (In Russian).
45. E.V. Antipov et al., Chemists on the Periodic Table: A Professional Tool, a Scientific Icon, or an Open Book? Priroda, 2019, No. 2, pp. 17-33. (In Russian).
46. <https://www.sciencealert.com/this-calcium-isotope-is-so-rare-it-costs-500-000-for-just-2-grams> - 7.7.2019.
47. E.G. Mazurs, Graphical Representations of the Periodic System During One Hundred Years, Alabama, University of Alabama Press, USA, 1974, 224 p.
48. J. Bouma, An Application-Oriented Periodic Table of the Elements, J. Chem. Ed., 1989, 66 (9), p. 741.
49. Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table. Scerri E., Restrepo G. (eds.). Oxford University Press, 2018, 328 p.
50. <https://subscribe.ru/group/pole-chudes/5161966/> 13.07.2019
51. <http://www.prom-front.ru/pered-kartinoyu> 13.07.2019
52. [http://vivovoco.ibmh.msk.su/VV/JOURNAL/NATURE/02\\_07/DIM.HTM](http://vivovoco.ibmh.msk.su/VV/JOURNAL/NATURE/02_07/DIM.HTM) 13.07.2019
53. P.R. Taube, E.I. Rudenko, From Hydrogen to ... Nobelium? Publisher "Visshaya Shkola", Moscow, 1961, 332 p. (In Russian).
54. פרימו לוי, הטבלה המחזורית, הוצאת הקיבוץ המאוחד, 1987, 174 עמ'.
55. James Randerson, Levi's memoir beats Darwin to win science book title, The Guardian, 21 October 2006.
56. <https://davidson.weizmann.ac.il/online/sciencehistory/> 14.07.2019
57. <https://www.chemistryworld.com/news/ten-periodic-tables-you-really-should-know-about-/3010359.article> 14.07.2019
58. <https://www.artlebedev.com/mendeleev-table/> 14.07.2019
59. <https://www.youtube.com/watch?v=kuQ0Um4Wcz0> 14.07.2019
60. [https://www.youtube.com/watch?v=1PSzSTilu\\_s](https://www.youtube.com/watch?v=1PSzSTilu_s) 14.07.2019
61. [https://www.youtube.com/watch?v=rz4Dd1I\\_fX0](https://www.youtube.com/watch?v=rz4Dd1I_fX0)
62. [https://www.youtube.com/watch?v=k\\_9KTww6DiU](https://www.youtube.com/watch?v=k_9KTww6DiU)