

F
Fluorine

תפקיד הפלואור בחיינו*

פרופ' שלמה רוזן**



אנרי מואסאן שהצליח לבודד את הפלואור וזכה על כך בפרס נובל

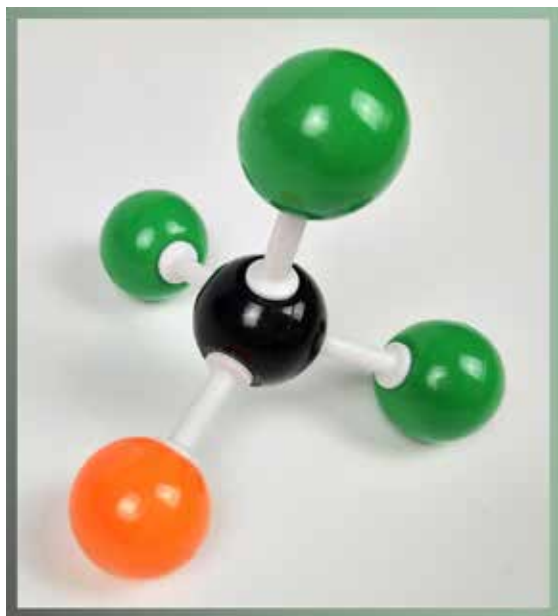
הפלואור היה ידוע עוד בימי הביניים, אך מלבד החומצה שלו (HF), שהשתמשו בה לצריבת זכוכית, לא נמצא לו שימוש. מהמעט שהיה ידוע עליו, מנדלייב, אבי המערכה המחזורית, צירף אותו לקבוצת ההלוגנים, והוא אכן הראשון במשפחה זו, יחד עם כלור, ברום ויוד. הוא גם היה ההלוגן היחיד שלא הצליחו לקבלו בצורתו החופשית. בסוף המאה התשע-עשרה הבין הכימאי הצרפתי אנרי מואסאן, שלא ניתן לבודד את היסוד באמצעים כימיים, ואכן היה הראשון לבודדו, תוך שימוש באלקטרוכימיה. על כך זכה בפרס נובל.

מהר מאוד התברר שהפלואור הוא יסוד ריאקטיבי מאוד, וכשניסו לרתום אותו לריאקציות כימיות אורגניות, שבוצעו בסגנון תחילת המאה העשרים, התוצאות היחידות היו הריסת כל חומר שבא במגע איתו. הדבר גרם לקיפאון בפיתוח הכימיה של הפלואור, ומעט מאוד כימאים טרחו להתעסק עם יסוד זה. הדבר הכמעט יחיד שעלה על הדעת באותה תקופה היתה העובדה שנגזרת

* מבוסס על הרצאה שניתנה בכנס המנהדסים והאדריכלים במרס 2019

** פרופ' שלמה רוזן, ביה"ס לכימיה, אוניברסיטת תל-אביב

בעלות פחמן אחד, שניים או שלושה הקשורים הן לאטומי פלואור והן לאטומי כלור, או ברום, כגון CFC-11 או CFC-12 (CFCl_2); (CF_2Cl_2) , נמצאו לא רעילות, לא דליקות, יציבות מאוד וזולות להכנה. חומרים אלו עמדו בבסיס פיתוח בתי קירור מודרניים, מקררים ביתיים, מזגנים לתעשייה, למגורים ולכלי רכב. נמצא להם גם שימוש רב בניפוח פולימרים והפעלת אירוסולים. בשנות השבעים של המאה שעברה, מכל מקום, החלו לחשוד במולקולות הנ"ל כי אלו חומרים הורסי אוזון. התברר שה"פושעים" היו אטומי הכלור או הברום, ואכן נכנסו לתמונה מולקולות חדשות שיש בהן רק פחמן, פלואור ולעיתים גם מימן. דוגמה לחומרי הקירור החדשים היא HFO-1234yf ($\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$) וחומרים דומים אחרים.



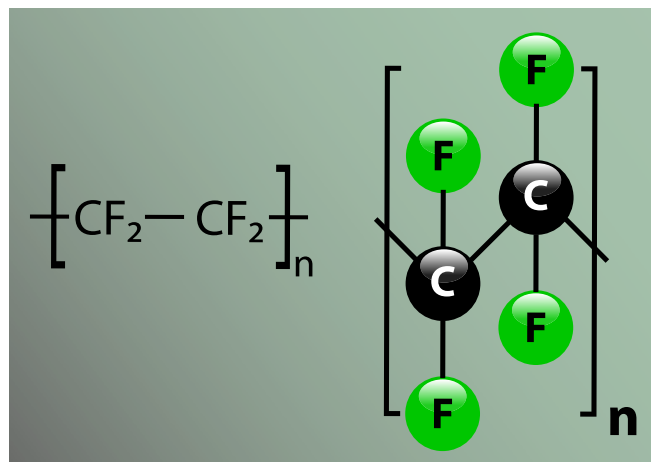
דוגמה לפראון CFCl_3

פריצה אדירה נוספת הקשורה באטום הפלואור ואשר אף היא השפיעה רבות על האנושות, התרחשה באמצע שנות החמישים של המאה העשרים. המדען היהודי יוסף פריד מאוניברסיטת שיקגו פרסם כי סטרואידים מסוימים, כגון קורטיזול, שהוכנסו בהם אטום פלואור אחד או יותר, פעילותם הביולוגית עולה לפחות פי 50! הדבר הוביל לזינוק אדיר במאמצים להכניס יסוד זה למגוון עצום של חומרים. נציין בודדים מהם, כמו 5-פלואור אורציל (5FU) המשמש בסיס לתרופות כימותרפיות רבות, אנטיביוטיקות מודרניות כגון משפחת הקווינולונים, תרופות אנטי-פסיכוטיות (פרוזק), כולסטרול אינהיביטור (ליפיטור), חומרים אנטי-דלקתיים (בטאמתאזון) ועוד ועוד. כיום, כ-30% מהתרופות החדשות המאשרות על ידי ה-FDA מכילות אלמנט זה. בחקלאות מספר זה אף גדול יותר, וממצאים מהתקופה האחרונה מראים ש-50% (!) מהחומרים החדשים המשמשים בשטחי החקלאות השונים מכילים אף הם פלואור.

הפלואור של חומצת החומץ (CH_2FCOOH) הינה רעילה מאוד והצדדים הלוחמים במלחמת העולם הראשונה שקלו להשתמש בה להרעלת בארות המים של האויב. דחיית הביצוע של תוכנית זו הצילה אלפי אנשים מכל הארצות הלוחמות.

עם התקדמות הכימיה והידע בתכונות הפיזיקליות של החומרים, התברר שהקשר פחמן-פלואור (C-F) הוא חזק מאוד, ועל כן במרכז הכימיה הגדול בעולם בעת ההיא - מעבדות דופונט בדלוור ארצות הברית - החלו לחפש דרכים ליצירת פולימרים וחומרים אחרים המכילים בעיקר פחמן ופלואור. החיפוש ערך שנים, אך בסוף, הודות לקצת מזל והרבה עקשנות, הצליחו במרכז זה ליצור את הטפולון הראשון ($[\text{CF}_2-\text{CF}_2]$ -) וחומרים אחרים הדומים לו. אלו נמצאו כחומרים יציבים ביותר הן מבחינה טרמית והן מבחינה כימית.

כידוע, בזמן מלחמת העולם השנייה החלה ארצות הברית בפרויקט אדיר שלא היה כמותו בהיסטוריה עד אז - פרויקט "מנהטן" - לפיתוח פצצת האטום הראשונה. הפיתוח הראשוני הצריך תרכובות נדיפות של אורניום, והיחידה שבאה בחשבון הייתה התרכובת הגזית אורניום הקסאפלואוריד (UF_6). תרכובת זו מכל מקום היתה מאוד קורוסיבית ואי אפשר היה להכניסה לתאי ואקום כי שום חומר לא עמד בפניה. הבעיה נפתרה בעזרת טפולון וחומרים הדומים לו שהיו היחידים שלא נפגעו מהקורוסיביות של האורניום הקסאפלואוריד.



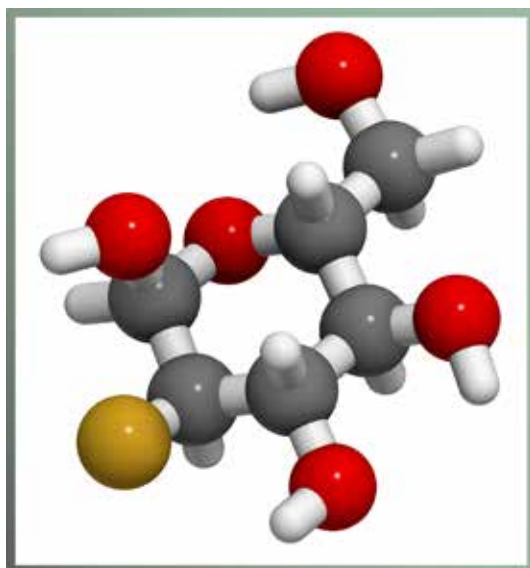
היחידה החוזרת ממנו בנוי הפולימר טפולון

אבל הפלואור מצא שימוש לא רק לצורכי מלחמה. אחד השימושים החשובים הראשונים ששינו את פני העולם ושיפרו את חיי האנושות ללא היכר היו הפראונים הראשונים, ששימשו בעיקר לקירור. בתי חרושת לקרח היו ידועים עוד במאה התשע-עשרה, אלא שהגזים ששימשו לקירור היו בעיקר אמוניה ודו-תחמוצת הגופרית (NH_3 ; SO_2). הבעיה הייתה שגזים אלו רעילים ובחלקם אף דליקים ואין ספור תאונות נגרמו בגינם וגבו את חייהם של אנשים רבים. שוב דופונט תרמה פתרון אדיר לאנושות. תרכובות

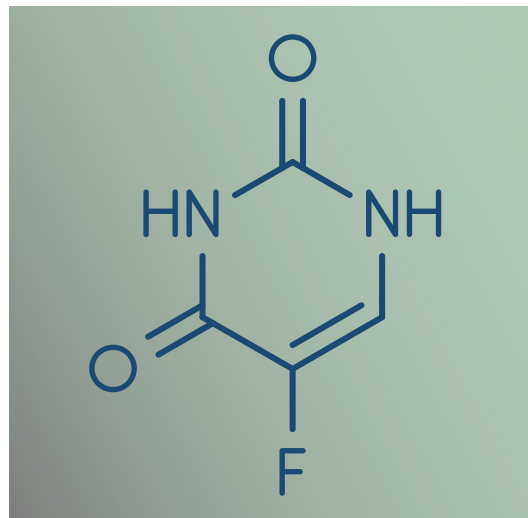
לפלאור תפקיד משמעותי מאוד גם במדע החמרים. קשה לדמיין מחשבים ללא מבודדים המבוססים על תרכובות פר-פלאור או לדמיין מנועים העובדים שנים רבות בלי הפסקה ללא שמנים המבוססים על חומרים המכילים יסוד זה. סיבים אופטיים ייחודיים (טפלו AF), חומרי שטח רבים, ציפויים ייחודיים, חליפות חלל וכולי וכולי - בכל אלה ניתן למצוא אטומי פלאור רבים. פולי או פרפלאורו פולימרים משמשים רבות גם בניתוחים, בעיקר כשיש צורך לעטוף או לחזק אברים פגועים כגון עורקים ראשיים או חלקי קיבה פגועים. היתרון האדיר של פולימרים אלו הוא שאינם רעילים, יציבים לכל החיים ולא גורמים לדחיה על ידי הגוף.

נוכח מגבלות היריעה, נסיים רק באזכור שטח חדש, יחסית, המתפתח במהירות - הוא טומוגרפיית הפוזיטרונים (PET). אפשר כיום בעזרת ציקלוטרון להכין איזוטופ לא טבעי של פלאור שהמסה האטומית שלו היא 18. זהו איזוטופ לא יציב, המשחרר פוזיטרונים (אלקטרונים חיוביים) וזמן מחצית חייו כשעתיים. כשחומרים המכילים איזוטופ זה פוגשים חומרים טבעיים, הרי הפוזיטרון המשתחרר מתנגש באלקטרון, והתוצאה היא שחרור קרינת גמא ייחודית שניתן לגלות באמצעות דטקטורים מיוחדים. הדבר הוביל בין היתר למיפוי מפורט של מוח האדם וכן לגילוי תאי סרטן במקומות שקשה לגלותם אחרת. בארץ, המרכז ליצירת חומרים המכילים את איזוטופ ה-F-18 הוא בית החולים הדסה ירושלים, בהנהלת פרופסור אייל משעני, ומשם הם נשלחים לרוב בתי החולים במדינה.

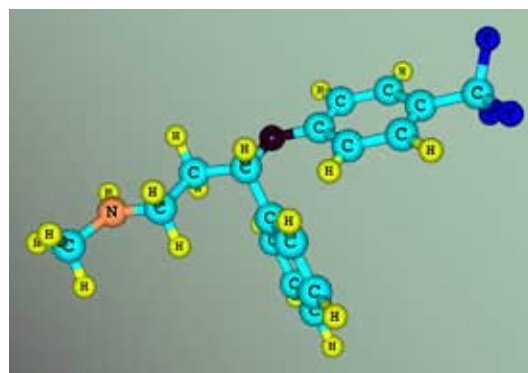
לסיום נציין כי ערכם של החומרים המכילים פלאור המיוצרים בעולם נאמד בלמעלה מ-200 ביליון דולר בשנה. אכן זהו נימוק משכנע לחשיבותו של יסוד זה הנמצא בפינה הימנית העליונה של הטבלה המחזורית.



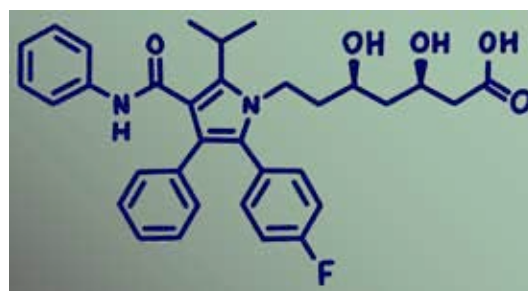
פלאורודאוקסי גלוקוז, משמש כחומר למיפוי המוח ולאייבוחן תאי סרטן שונים



5 פלאורו אורציל שמהווה בסיס להכנת תרופות כימותרפיות



תרופה אנטי פסיכוטית - פרזוק



ליפיטור, תרופה להורדת כולסטרול בדם.

תקצר היריעה מלפרט את כל הטכנולוגיות שמשמשות בפלאור, אך איננו יכולים שלא להזכיר את הדם המלאכותי (כגון פרפלאורו-דקליון), המאפשר העברת חמצן לתאים וסילוק הפחמן הדו-חמצני מהם. השימוש בחומרים אלו נעשה כשיש מחסור בדם מתאים, כגון בזמן ניתוחי חירום ובמקרים אחרים. ואם אנו נוגעים בניתוחים, הרי שחומרי ההרדמה היום, הבטוחים עשרות מונים יותר מחומרי ההרדמה של הדור הקודם, מכילים אטומי פלאור רבים (כגון איזופלאורן - $CF_3CHClOCHF_2$, דספלאורן - $CF_3CHFOCHF_2$).