

אבולוציה מראשית החיים ובמהרה בימינו – פרופ' דן תופיק

הרצאה במסגרת "זמן מדע", 16.2.2016

צהריים טובים. שמי דן תופיק, מדען במחלקה למדעים ביומולקולריים. המחקר שלי ממוקד באבולוציה של חלבונים. אני אספר על הדברים שאנו מבינים וגם על החידות המרכזיות בתחום הזה, כידוע, אנחנו מתפרנסים לא מלתת תשובות אלא מלהמציא שאלות. ולהבין מה השאלה המהותית בכל תחום מחקר, זה מהווה בעצם את הציר המרכזי של מציאת תשובה מעניינת לשאלה מעניינת.

גיבור היום הוא צ'רלס דרווין, האיש החביב הזה שרואים בשקף. אבולוציה היא שטח משונה; במדע, ובייחוד בביולוגיה, מה שקרה לפני 5 שנים הוא לא רלוונטי, ואילו אנשים שעוסקים באבולוציה מצטטים את האיש הזה שעדיין רלוונטי עד היום. כאשר מדברים על אבולוציה ועל דרווין יש מיס-קונספציה שנטועה כמעט בכל אדם שהוא חדש בתחום של אבולוציה, אם אגיד לכם מה המילה ראשונה שעולה לראש כשאומרים דרווין, 90 אחוז יגידו הברירה הטבעית, החזקים שורדים, מוטציה וסלקציה, כל זה נכון, אבל הם משניים. בעצם המהפכה האמיתית של דרווין טמונה בשתי המילים הראשונות של שם הספר – מוצא המינים. ההמשך שזכה לפופולריות ותשומת לב זה הסיפור של הברירה הטבעית והשאר גזעים מחוננים במאבק החיים, המאבק להישרדות. אבל הנקודה המרכזית החדשה בתיאוריה שלו מאוירת במה שנקרא העץ הזה (בשקף), שבעצם בא מתוך טיטוט של מאמר שדרוין לא פירסם, הרעיון שלאוסף שלם של מינים שונים שחיים היום על פני כדור הארץ יש מוצא משותף, אב קדמון משותף שממנו התפצלו. הרעיון של אב קדמון משותף זה מספר אחד בתרשים הזה, שלו אפשר לייחס את המוצא לאוסף שלם של מינים שלמים שנראים היום שונים לגמרי וחיים בסביבות שונות, שמוצגים פה ב-A,B,C,D. זאת המהפכה הטבעית שלו, וזו השאיפה של כל חוקר אבולוציה – לרשום עץ אמיתי לאוסף של מילים או מולקולות או חלבונים שנמצאים באורגניזמים שונים לגמרי וממלאים תפקידים שונים. על זה תשמעו היום.

איך דרווין ואלה שצועדים בעקבותיו מייחסים מוצא משותף או אב קדמון? הדרך שדרוין אימץ, שלא שונה ממה שאני עושה, מבוססת על דמיון. ההנחה היא שאם קיים דמיון בין שני מינים או בין פרטים מסוימים בתוך שני מינים, הדמיון מצביע על מוצא משותף.

הדוגמאות המשכנעות ביותר של דרווין לקיום אבולוציה, היה בביות. אפשר לראות דמיון ויזואלי בין עשרות פרטים, למשל בין אלפי מינים של כלבים ובין זאב שהוא אב קדמון של כל מין של כלב שנמצא היום על פני כדור הארץ.

את הדמיון הזה ניתן לקחת לרמה אחת גבוהה יותר ברזולוציה, לרמת הדנ"א או הגנים, כי לא רק שחיצונית כל הכלבים נראים כמו זאב, אלא שאם נרצף גן מסוים שקיים אצל כל המינים האלה ואצל מינים אחרים, נראה דמיון מאוד ברור ומובהק ברצף הגן הזה בין מינים שמשתתפים או מחלקים מוצא קדמון משותף.

פה נכנס כמובן הדנ"א שכולם שמעו עליו, אבל בעצם בשביל אנשים כמוני דנ"א זו מולקולה די משעממת, כי היא בסך הכל מספקת קוד ליצירת חלבונים. חלבונים מקיימים את כל הפונקציות הנדרשות לקיים חיים בתא בודד ובכל אורגניזם, הדנ"א מספק אינפורמציה לבניית חלבונים שמקיימים את כל הפונקציות המבניות והביולוגיות לקיום חיים.

לחלבונים יש מבנה מאוד מורכב שמכתיב את פונקציה שלהם. מה שאני עושה במעבדה שלי, ומה ששוחחתם עליו בהרצאות קודמות, זה לשחזר במעבדה את התהליך האבולוציוני שמביא ליצירת חלבון עם מבנה ופונקציה חדשים. כיוון שעשינו את התהליך הזה במעבדה, אפשר להסתכל לא רק על נקודת המוצא אלא על כל שלב

בתהליך, שלבים שמאופיינים בשינויים או מוטציות בדנ"א, שמצטברים עד שמקבלים רצף חדש שמקודד למבנה חלבון חדש עם פעילות חדשה. זאת הדרך שבה אני מתפרנס מאז שהגעתי לכאן למכון. אפשר לקחת חלבונים קיימים ולנסות לשחזר, קודם כל להסיק שיש ביניהם קשר אבולוציוני, מוצא משותף – על זה נדון בפרוטרוט בהמשך – וגם לנסות לשחזר את האב הקדמון, לנסות להבין איך היה נראה הזאב הזה, בפרטי פרטים, שממנו נוצרו כל מיני הכלבים שאנחנו מכירים היום.

אז כמו דרווין, הקריטריון שלנו להכיל מוצא משותף הוא דמיון מבני. בשקף רואים את שלושת החלבונים שנמצאים בחיידקים שיש להם תפקידים שונים לחלוטין; למשל, שתי הקבוצות האלה מפרקות מולקולות בשם לקטונים, הקבוצה הזאת מתמחה בפירוק לקטונים שהם חיישנים כימיים לתקשורת בין חיידקים. החיידקים שאני סוחר, רובם משחררים את המולקולות האלה שאומרות: נשבר לנו מהריח, בואו נקרע לו את הצורה. האנזים הזה מפרק חומר מדביר חיידקים שנמצא בקרקע. דוגמא לפונקציות שונות אבל דמיון מבני – אתם רואים את השלד של שלושה חלבונים מוצבים אחד על השני – הדמיון מחשיד במוצא משותף. אם ניכנס לפרטים, לדבר שנקרא האתר הפעיל של החלבונים האלה שכולם אנזימים, אז המנוע או לב החלבון הוא זהה לגמרי. בשבילנו זה אומר מוצא משותף. אפשר ללכת שלב אחד הלאה, שזה מה שאנחנו עושים, ולשחזר את האב הקדמון שממנו התפצלו שתי משפחות החלבונים האלה, שהיום עושים שני דברים שונים לגמרי מבחינה ביוכימית.

אז אפשר ללכת על קרקע מוצקה. אבל כמו במדע, תמיד במדע אתה מנסה לדחוף את זה לקצה, ואז אתה מסתכל למטה וזה מפחיד. למה? כי האבולוציוניסטים הבינו במהלך השנים שדמיון הוא קריטריון מאוד משכנע לקרבת משפחה, למשל – אני לא, אבל אם אשתי היתה פה היא היתה יכולה לדוג שני אחים או שתי אחיות או שני בני דודים בגלל דמיון בפנים. אז באמת, אם אסתכל על מבנה עצמות הגפיים של אוסף שלם של יונקים – מלווייתן שמשמש בסנפיר, דרך עטלף, דרך חתול או סוס – אז הדמיון במבנה האנטומי של עצמות הגפיים, אפילו שהגפיים נראות שונות לגמרי, מצביע על מוצא קדמון משותף. ואכן אנחנו יודעים שלווייתן, עטלף וחתול כולם יונקים, ויש ביניהם קשר אבולוציוני הדוק. והם גם התפצלו רק לפני כ-100 מיליון שנה, שבמונחי אבולוציה זה לפני 5 דקות.

אבל טיעון של דמיון או מוטיב משותף שאנחנו מוצאים באוסף שלם של מינים הוא מסוכן. למה? אראה לכם את שלושת המינים האלה (בשקף); יש ביניהם דמיון כללי בצורה, וספציפית הסנפירים שלהם נראים זהים לגמרי, אבל זה לא מקרה של התפצלות מאב קדמון משותף, לא מין אירוע מובהק ויחסית קרוב בזמן. למה? כי הראשון הוא יונק, השני הוא בכלל זוחל והשלישי דג. במהלך האבולוציה – זה עץ שמתייחס למין הכי עתיק שממנו התפצלו – במהלך התפצלות המינים הסנפירים אבדו, התפתחו גפיים, ואצל יונקים ימיים הגפיים עברו שינוי לסנפירים. אז יש לכם פה דוגמא לכך שדמיון לא מראה על מוצא משותף, ויש עשרות דוגמאות שהדמיון מתעתע. כי כאשר יש צורך של הטבע למצוא פתרון לבעיה מסוימת, אנו יודעים שאופי הפתרון וצורתו מוכתבים מדרישות הנדסיות. שלושת המינים האלה צריכים לחיות במים, והדרך ההנדסית הכי נוחה ופשוטה לתמרן במים היא סנפיר; כל אחד מצא דרך אחרת לפתח סנפיר, והדמיון נגזר מהצורך למצוא פתרון הנדסי לבעיה מסוימת ולא ממוצא משותף, לא מאב קדמון משותף.

אז האבולוציוניסטים המציאו מונח – השד שלנו שנשלף מהבקבוק בכל דיון נקרא התכנסות. בעוד שהתיאוריה של דרווין והשחזור האבולוציוני נגזרים מהנחת התפצלות מאב קדמון משותף, אנחנו חייבים לפסול את האפשרות של התכנסות. כלומר הדמיון שאנחנו רואים הוא לא תוצאה של התפצלות אלא של פתרון דומה

במינים שנוצרו באופן בלתי תלוי. כשאנחנו הולכים לעולם החלבונים – שזה הדין היום – אנו רואים התופעה הזאת זהה לחלוטין. אראה לכם שני חלבונים ממשפחת הפרופלור (בשקף); כל דבר כזה נקרא להב, הם דומים, פה יש 6 להבים, פה יותר להבים ופה יש תוספת. אם הייתם מראים לי את זה, הייתי אומר שהם התפצלו מאותו חלבון, אחד איבד להב או הוסיף להב וגנב חתיכה מאיזשהו מקום, והאבולוציה יצרה שני חלבונים עם שני תפקודים ביוכימיים שונים ועם מבנה זהה. אבל המשפחה הזאת היא תעלול שהטבע שולף מהכיס באופן בלתי תלוי מהעובדה שבמין דומה וקרוב יש חלבונים כאלה.

איך יכולים לדעת דבר כזה? אנחנו הולכים לגנומים של מינים שונים, אלה במקרה חיידקים, רואים בהם הרבה חלבונים כי הם משתמשים במערכת חיסון והעברת סיגנלים, רואים חלבונים שיש להם חתימה של הלהבים האלה חוזרים אחד אחרי השני וצמודים זה לזה – רואים פה 6 אלה – אבל פתאום רואים חתימה בגן אחר שהוא בכלל לא פרופלור, יש לו מבנה אחר לגמרי. ואז יש לנו עדויות, אמנם לא ישירות נסיבתיות, שהפרופלורים האלה נוצרו במין הספציפי הזה לא מזמן, לפני כמה מיליוני שנה, על ידי העתקת חתימה והכפלה של העתקה והכפלה, העתקה והכפלה. כשיש הנחה כזאת אפשר לבדוק אותה ניסיונית, וזה מה שעשינו לאחרונה – שיחזרנו את התהליך, וכתבנו על כך במאמר שהתפרסם לפני שבועיים. מצאנו חתימה כזאת, הראינו שאפשר לחתוך אותה בחלבון מסוים שאינו פרופלור, ובאופן ספונטני היא מרכיבה את עצמה למשהו דמוי פרופלור, ואז היא עוברת הכפלה וחיבור בין הלהבים עד שהיא נותנת פרופלור מושלם. במקרה הזה שיחזרנו חלבון שהוא חלק ממערכת חיסונית של סרטן יפני מסוים, הוא היה צריך לייצר חלבון שקושר ותוקף חיידקים. באמצעות תהליך של לגנוב חתימה, להכפיל ולחבר אותה, הוא יצר פרופלור חדש שאין לו שום קשר אבולוציוני לפרופלורים שרואים במינים אחרים שעושים תפקיד דומה מאוד. יש פה דוגמא להתכנסות, הרבה מינים יצרו חלבונים שנראים דומים אבל במנגנון אבולוציוני בלתי תלוי.

מן הסתם אפשר להרגיש שכל עוד אנחנו נמצאים באירועים לא עתיקים יחסית, בסדרי גודל של בין עשרות שנים – כמו אנזים שמפרק מדברי חרקים – ל-100 מיליון שנה, שאז הופיע היונק שהוא האב הקדמון של כל היונקים הקיימים, אז לשחזור פחות או יותר יש ידיים ורגליים. הבעיה מסתבכת כשאנחנו נעשים שאפתנים ורוצים ללכת אחורה בזמן. פה בשקף יש סקלה של 1, 2, 3, 4 במיליארדי שנים, עשר בתשיעית, כל השחזורים האבולוציוניים שעשתה המעבדה שלי ומעבדות אחרות הם באזורים של 100 מיליון שנה, ואולי כמה דברים כאלה שנכנסים לאזור הזה – נגיד שזה מיליארד שנה. אבל אם אנחנו רוצים לדעת מה קרה פה לפני 3.87 מיליארד שנה שאז החיים התחילו, איך נוצרו החלבונים הראשונים – כאן מתחילות הצרות. כי איך נחליט עכשיו מי המינים או מי החלבונים שהתפצלו מאב קדמון משותף, איך אני מסדר את זה למשפחות ולדור ראשון, שני, שלישי ורביעי כדי לבנות עץ נכון. אם אני מחליט שלמישהו שם בסוף ולי, יש לנו סב משותף, אפשר לבנות על זה תיאוריה אבל העובדה הבסיסית לא נכונה.

זה אתגר לא פשוט, כי לדמיון במבנה צריך להתייחס בחשדנות רבה; זו שוב דוגמא לא של התכנסות, שזה פתרון ארכיטקטוני דומה. העובדה שיש פה שורות של כיסאות והאולם הזה נראה כמו אולם הרצאות באוניברסיטה העברית, זה לא אומר שאותו אדריכל תיכנן את שני האולמות, אלא שכך בונים חדר הרצאות. כלומר, על מבנה אי אפשר לסמוך; יש רצף דנ"א, אפשר להשוות רצפים. לפעמים, אם החלבונים קרובים, אם הם התפצלו לפני עשרות או מאות מיליוני שנה, אפשר עדיין לראות דמיון ברור ברצף. אם החלבונים מורכבים מ-200 חומצות אמינו, אנחנו אומרים שאם 50 מהן זהות לחלוטין בחלבון שבא ממני, מחיידק, מדג או מעוף, אז החלבונים האלה נגזרו מאב קדמון משותף. אם רבע מהן זהות לחלוטין, סטטיסטית הסיכוי שבמקרה כולן

התכנסו לאותה חומצה אמינית הוא קטן. אבל מה אם יש רק עשר או רק שתי חומצות אמיניות זהות? זה מקרה או התכנסות? יכול היות מצב שהתפקיד הספציפי הזה דורש חומצה אמינית ספציפית בעמדה מסוימת וזהו. אז חלבונים, בלי שום קשר אבולוציוני, גמרו בכך שיש להם מבנה דומה וחומצה אמינית אחת זהה. זה לא אומר שהם התפצלו מאב משותף.

אני לא יודע כמה התרשמתם מההרצאה הזאת והרצאות אחרות, אבל במדע - הגאולה היא בפרטים, היא בפרטי פרטים. אז אנחנו חשבנו שנוכל להסתכל על האנטומיה של חלבונים. זאת אומרת לא להסתכל רק על כך שכל הגפיים האלה של הלווייתן והציפור נראות דומות, אלא נסתכל בפרטי פרטים של חיבורי העצמות, לראות האם מדובר במשהו זהה שנגזר מזה שכולם התפצלו מאב קדמון משותף או התכנסות שבאה לפתור בעיה הנדסית.

מאחורי החלק האחרון של ההרצאה עומדת סטודנטית לדוקטורט שסיימה, אגנס טוט-פטרוסקי, ופוסט דוקטורנטית בשם פאולה לאורינו, לקחו על עצמה משימה מאוד לא קלה של לחטט בתוך המחסן הזה של חלבונים, כדי למצוא סימנים שהם בני 3.7 מיליארד שנה פחות או יותר, אל תתפסו אותי על שנה-שנתיים.. העיקרון באבולוציה הוא, שככל שאלמנט יותר נפוץ ונמצא בכל אורגניזם חי, כנראה הוא עתיק יותר. אז בואו נכיר את מר רוסמן, יהודי חביב שזיהה לפני 40 שנה ארכיטקטורה של חלבונים שמכונה Rossmann fold, מבנה שחוזר על עצמו בעשרות אלפי חלבונים, בסידור מרחבי של חלבון. לזה קוראים beta strands, לזה קוראים helix, לא אכנס לפרטים, יש פה מבנה ארכיטקטוני שרואים אותו בעשרות אלפי חלבונים שונים. החלבונים האלה, שיש להם מבנה של Rossmann fold, נמצאים היום לא רק בכל אורגניזם שנמצא על כדור הארץ, יש עשרות חלבונים שיש להם הארכיטקטורה זאת ויש להם גם אוסף שלם של פונקציות ביוכימיות מאוד מגוונות שהן חיוניות לחלוטין.

המסקנה מכל הדברים האלה היא שאפילו לפני שהופיע התא הראשון, האורגניזם ראשון, צורת חיים הבסיסית ביותר היתה בארכיטקטורה של Rossmann, ומִהְרוֹסֵמֵן הקדום הזה התפצלו כל עשרות אלפי המשפחות שאנו מכירים היום. אז התיאוריה הזאת קיימת, אבל הבסיס העיקרי שלה הוא בעיקר העובדה שרואים את זה בכל מין, בעשרות אלפי משפחות. כלומר, הנפיצות גדולה מאוד אבל היא נסיבתית, כי האלטרנטיבה של התכנסות לא נפסלה עד היום וגם לא נבדקה בצורה רצינית עד היום.

אז פאולה ואגנס צללו לזה, זיהו בחלבונים האלה אלמנט מאוד מעניין. רוב הרוסמנים מבצעים את הפונקציות הביוכימיות בעזרת קו-פקטור, מולקולות קטנות שהן בסיסים של רנ"א, שהחלבונים גנבו אותן כדי לסייע בביצוע פונקציות ביוכימיות. כל הקו-פקטורים אלה מכילים מולקולת סוכר שנקראת ריבוז, וכמעט בכל רוסמן, פאולה ואגנס מצאו שהריבוז, שיש לו שני חמצנים שמסומנים באדום, מוחזק על ידי חלבון, על ידי משהו קרבוקסילי חומצי, על ידי קשר דו-שיני – זה שני הקווים הצהובים – דו-שן וכל רוסמן שיוצא. ראינו את זה ואמרנו: זה העמוד, היסוד שעליו נבנה הרוסמן, הקשר הדו-שיני הזה בין הריבוז של הקו-פקטור לבין החלבון. אבל אז אתה שואל את עצמך אולי זו דרך מאוד טובה לקשור ריבוז שיהיה פה קרבוקסיל, שיהיה פה קשר כפול ולא רק אחד, זו דרך טובה ונכונה לקשור ריבוז וכל מיני חלבונים שנוצרו באופן בלתי תלוי והתכנסו לתוך הדרך הזאת. המשכנו לחטט בתוך האנטומיה של הקשר בין חומצה אמינית אחת קרבוקסילית ושתי קבוצות הידרוקסיליות של ריבוז. במשך שנתיים שתי החוקרות ואני פשוט התמקדנו בפחות או יותר 4 אטומים. מה ראינו? דבר ראשון, ראינו שבנוסף לזה שכל הרוסמנים יש להם את הקשר הזה, השייר הקרבוקסילי נמצא תמיד באותו מקום בארכיטקטורה, בסוף הסטרנד השני של חלבון; זה הכדור האדום, המיקום קבוע ולא משתנה. יתרה

מזאת, כשאתה בודק כל חלבון שהמבנה שלו ידוע לנו היום – ומדובר באלפי חלבונים שונים – אתה רואה שהאינטראקציה הזאת נמצא ב-54% מהרוסמנים. ואם אתה מסתכל על כל שאר הארכיטקטורות שקושרות ריבז, מוצאים את זה ב-1.7%. הסבירות שתמצא את האינטראקציה הזאת ברוסמנים היא הרבה יותר גבוהה מאשר בארכיטקטורה אחרת. אם אתה מוצא את זה בארכיטקטורה שאיננה רוסמן, השייר לא יהיה ממוקם בקצה הסטרנד השני, אלא במקום אחר. פה רואים קצה של עץ. נראה שברוסמנים לא רק שהאינטראקציה חוזרת כל הזמן אלא המיקום שלה קבוע, והשילוב של אינטראקציה ומיקום לא קורה בארכיטקטורות שאינן רוסמן.

עוד מסתבר לנו שלא רק המיקום של שייר הקרבוקסיל הוא קבוע, אלא בחלבונים שהם רוסמנים הזווית בין הקרבוקסיל (רואים את זה בשקף) לבין הריבז, הסוכר של הקו-פקטור, הזווית קבועה. בכל הרוסמנים היא באזור ה-130 מעלות, כך זה במאות מבנים שטרחנו והסתכלנו בהם על הזווית. כאשר אתה מסתכל על האינטראקציה בחלבונים שאינם רוסמן, רואים מנגד שלם של זוויות שאינן 130 מעלות.

אנחנו השתכנענו, הבעיה שנשאר החלק הקל של לשכנע אחרים... היינו מרוצים, שלחנו מאמר לעיתון די מוביל שכותרתו בישרה: טביעת אצבע בת 3.8 מיליארד שנה, שמעידה על מוצא קדמון משותף של כל חלבוני רוסמן. המאמר הזה כל כך עניין ועיצבן – בדרך כלל כתבי עת שולחים מאמרים לשניים-שלושה סוקרים, המאמר הזה חזר חזרה והצבע ירד לי מהפנים; היו שם תגובות של חמישה סוקרים שכל אחד כיוון אלינו לא אקדח אלא ארבעה תותחים טעונים. כל אחד היתה לו סיבה טובה למה הוא הגיב כך – המיקום הקבוע, הזווית הקבועה – אבל השורה התחתונה היתה: לא קנינו את זה. הם אמרו: בסדר, אולי זה הפתרון ההנדסי הנכון בשביל להצמיד את הקו-פקטור, את חלק הריבז הזה שמשותף לכל הקו-פקטורים שהרוסמנים משתמשים בהם לאתר הפעיל של רוסמן; כמו הסנפירים של הדולפין, הדג והזוחל הימי, זה הסנפיר של עולם החלבונים. אבל לא שיכנעת אותנו.

רק אחד מהם, חוץ מלשפוף עלינו קיתונות זעם, היה לו רעיון מעניין. הוא אמר: תלכו ותעשו חישובים. לא אתם, אלא מי שמומחה לכך, תוכיחו שזה לא הפתרון היחיד או לא הפתרון הטוב ביותר. פנינו במצוקתנו לפרופ' בשם טרולר, מומחה לחישובי כוחות וחלבונים, אחרי כמה חודשי עבודה הוא וצוותו ייצרו את העקומה הזאת (בשקף) שנורא שמחנו לראות. העקומה מראה מהי אנרגיית הקישור של האינטראקציה בין שייר קרבוקסילי של חלבון לבין קבוצות הידרוקסיל של ריבז. כל הדברים האלה הם בתחום הטעות, אפשר להתייחס אל זה כאל קו ישר פחות או יותר, הוא מראה שלקשר הזה יש אנרגיה מאוד חיובית והוא חיוני לקישור הריבז, אבל עוצמת הקישור לא תלויה כמעט בזווית. במנגד זוויות בין 10 ל-170 מעלות, אנרגיית הקשר כמעט זהה. הרוסמן נפל לתוך מיני בור כזה, לא בור אלא באמפ באדמה, זו הזווית שרואים פה. יש אוסף שלם של פתרונות. מדובר בפתרון אחד טוב, אבל לא יחיד; יש עוד פתרונות. בעצם עם העדות האחרונה הזאת הצלחנו – אני מקווה – לשכנע, בכל אופן המאמר התקבל ברוך ה'. הצלחנו לשכנע שיש לנו טביעת אצבע שנגזרת מאב קדמון של רוסמן ולא התכנסות של חלבונים שנוצרו באופן בלתי תלוי.

הסקמה הזאת (בשקף) מתארת עשרות אלפי משפחות ששום אורגניזם על פני כדור הארץ לא מסוגל לחיות בלי החלבונים אלה, שכפי שאמרתי הם מקיימים אוסף תפקידים ביוכימיים חיוניים לגמרי. הצלחנו לייחס לכל המשפחות האלה אב קדמון משותף אחד. לא רק זה, אלא שבעבודה מקבילה מצאנו עוד חתימה כזאת שהיתה ידועה קודם אך הצלחנו לבסס אותה.

אם כך, יש לנו שני אבות מייסדים לעולם החלבונים, אלה האבות הקדמונים המשמעותיים של עולם החלבונים. היום כשאנחנו מסתכלים על האלמנטים האלה, שהם קטנים יחסית כמו שרואים פה בשקף, אם אתם זוכרים את המבנה של הרוסמן כולו, אנחנו רואים אותם באוסף שלם של חלבונים עם מבנים שונים לגמרי, עם תפקידים שונים לחלוטין. אבל עדיין, בעזרת אנטומיה מולקולרית שהראיתי לכם, אפשר לייחס את המקור של האלמנטים אלה בכל אחד ואחד מהחלבונים האלה לאב קדמון משותף. התיארוך של האב הקדמון הזה, בגלל המגוון של החלבונים והנפיצות שלהם בכל המינים, התיארוך שלו הולך לתא הראשון, לאורגניזם הראשון. אני חושב שיש לנו היום בסיס מדעי מוצק ושיטתי לייחס אב קדמון לשורה שלמה של חלבונים שהדמיון הרצפי והמבני ביניהם הוא קלוש ביותר, והבסיס הזה מאפשר לנו ללכת לשלב השני שהוא יותר מרתק והרבה יותר מאתגר, השלב של שחזור. כרגע אני חושב שהנושא המרכזי במעבדה שלי, שאנחנו מקווים לעסוק בו בשנים הקרובות, הוא לנסות לשחזר את הראשון לחלבונים, חלבון פרימיטיבי שמכיל את החתימות שדיברנו עליהם, את הקשר הדו-שיני עם ריבוז, שממנו קרוב לוודאי נגזרו – כמו שאמרתי לכם – החלבונים הכי מרכזיים שנמצאים היום בכל מין ומין על פני כדור הארץ. ועל זה אולי נדבר בהרצאה הבאה. תודה רבה.