

ביומינרליזציה – טכנולוגיות עתידניות בנות מאות מיליוני שנים – הרצאה של פרופ' ליאה אדדי

17.5.2016

שלום לכולם. חברים ידידים וחברים חדשים. מי שלא מכיר אותי, אני ליאה אדדי, מהמחלקה של ביולוגיה מבנית אבל זו הפקולטה לכימיה, ותיכף תבינו איך הנושא שאני אדבר אליו מכיל בבת אחת גם כימיה, גם ביולוגיה וגם פיזיקה.

אני אספר לכם קצת סיפורים שמגיעים מביומינרליזציה. זה נשמע כאן כמו ניגוד בין המילים, ביו – כולכם יודעים, זה חיים. ומינרל זה מחצב. זה אבן, זה משהו מוצק וגבישי שאנחנו לא מקשרים אותו לחיים בדרך כלל. אז מה זה ביומינרליזציה, זה באמת התחום שחוקר את כל התופעות שבהן בעלי חיים בונים שלדים לכל מיני מטרות שנראה בהמשך. זה תחום בעיניי מרתק, שאני חוקרת אותו הרבה מאוד שנים ביחד ובשיתוף פעולה הדוק עם פרופ' סטיב ויינר.

זה תחום שנוגע בהרבה שטחים. אנחנו קוראים לזה גלגל ביומינרליזציה בגלל שבעלי חיים ידעו ובנו את השלדים שלהם, למדו איך לבנות אותם כבר מאות מיליוני שנים, ובגלל שכאשר הבשר של בעלי חיים, כאשר הגוף שלהם מתפרק, מה שנשאר הרבה פעמים זה החומר הקשה, אז התחום הוא מאוד חשוב לאבולוציה, וגם לפלאונטולוגיה, גם לארכיאולוגיה כי הוא שומר על עדויות מהעבר. כמובן תחום הביומינרליזציה חשוב גם מאוד לאוקיינוגרפיה ולסדימנטולוגיה, כי הרבה חיות מהים בונות שלדים ושוב, השלדים שלהם נשארים ומאוד חשובים גם כן לשמירת שיווי משקל באוקיינוסים. ביומינרליזציה חשובה מאוד לאורתופדיה ורפואת שיניים, כי העצמות שלנו ושיניים שלנו הם תוצרים של ביומינרליזציה.

היום במיוחד אני אתרכז קצת בחשיבות של ביומינרליזציה במדעי החומר. שוב, בגלל שבעלי חיים בנו שלדים במשך מיליוני שנים, היה להם המון זמן לפתח שיטות כדי לבנות לא רק את החומר עצמו שמשמש שלד, אלא גם את השיטות, אסטרטגיות. יש אסטרטגיות רבות שאפשר לקבל מהן השראה כדי לבנות חומרים חדשניים, אנסה להראות לכם.

כפי שאמרתי, יש לביומינרליזציה תפקידים בשטחים שונים, נתחיל עם מה שאנחנו אולי הכי מכירים אולי, התפקיד של שלד תומך. כמובן אנחנו יודעים שאנחנו בנויים מהעצמות שלנו, בלי עצמות היינו שלוליות של מים ובשר על הרצפה. אבל יש גם חיות אחרות שיש להן שלד תומך, למשל אלמוגים, או חיות הים שנקראות גלימתיים, Tunicates, שיש להן מגוון מאוד רחב של שלדים. זו רק דוגמא אחת, יש גם ספוגיים, הספוג הזה במיוחד יש לו שלד שהוא זכוכית, בהרבה מאוד חיות ים השלדים בנויים זכוכית, כך שאפשר להגיד שהם חיים בתוך בתים מזכוכית.

בואו נסתכל על הספוג הזה טיפה יותר, יש פה סיפור רומנטי, בגלל שהספוג הזה נקרא גם סל הפרחים של ונוס, Venus flower basket, ומשתמשים בזה - ביפן ובתרבות האסיאתית - כמתנה לחתונה בשל העובדה שבתוך הספוג הזה חיים שני חסילונים, שרימפס, במשך כל חייהם. הם עוזרים לספוג בזה שהם מנקים אותו, והספוג עוזר להם בזה שהוא מביא להם אוכל, והם לא יכולים לצאת מבית הזכוכית שלהם, כשהם מתרבים, הצאצאים שלהם קטנים מאוד, והם יוצאים החוצה והולכים לחפש ספוג אחר כדי לבנות את ביתם שם. לכן הם סמל לזוגיות. כאשר אנחנו מסתכלים על השלד שלהם, אפשר לחשוב שהשלד הוא לא כזה מסובך שאנחנו לא יכולים לעשות דברים דמוי זה. זה למשל מגדל אייפל, נראה די

דומה בגדול. אבל מה שמיוחד מאוד בשלד הזה, ובאופן כללי בכל תוצרי הביומינרליזציה, שיש שליטה ובקרה מבנית על בניית החומר בכל מיני רמות ובכל מיני סדרי גודל.

אז בואו נתחיל עם הספוג כולו, שהוא בסדר גודל של 5 מילימטרים, פה רואים משהו דומה פחות או יותר כמו שראינו במגדל אייפל, אבל בסדר גודל אחר. אבל כל קורה היא לא קורה אחת, אלא צרור של קורות, וזה אנחנו רואים בסדר גודל של עשירות מילימטר. כשאנחנו עוד נכנסים לסדר גודל של מאיות מילימטר, רואים שכל קורה בנויה ממספר סיבים, בצורה מאוד מדוקדקת. כאשר מגיעים לרמה של מיקרומטר, כלומר מיליונית המטר, אנחנו רואים שכל סיב של כל קורה בנוי שכבות רבות שהן אחת על השנייה, ובין השכבות יש חומר שמשמש כדבק. זה חומר אורגני, וגם החומר הזכוכיתי עצמו יש לו מיקרו מבנה שלמעשה הוא מבנה ננו, הוא מבנה ברמה של אלפיות של מיליוניות של מטר. פה הבקרה המבנית והשליטה על כל שלב של הסדר גודל, זה מה שמופיע בתוך הביומינרליזציה. אם מסתכלים על עצם, שהוא קרוב לליבנו, זה גם בנוי כחומר מרוכב, לפי החוקים של החומרים המרוכבים הכי משוכללים. הוא בנוי סיבים של קולגן וגבישים של קלציום פוספט, שזה החלק הקשיח. אז חומר מרוכב זה באמת סיבים קשיחים שבנויים בתוך מטריצה רכה וביחד נותנים את האופי המאוד חזק וגמיש של החומרים המרוכבים וגם של העצמות שלנו.

במקרה הזה, הלוחיות הדקיקות שהעובי שלהן הוא פחות מאלפית מיליונית מטר, זאת אומרת הוא כמה ננומטרים בלבד, כמה אלפיות מיליוניות מטר, הן נוצרות בתוך תעלות שבנויות בסיבים של קולגן כאשר סיבי קולגן - שאגב זה חומר שמתחיל את הבסיס של העור שלנו ושל חלקים של הגוף שלנו, וזה נותן את הקשיחות לסיבים. בעצם העצם הוא לא רק חומר אחד, הוא משפחה של חומרים. מה שמשותף ביניהם זה הבסיס שזה הסיבים של קולגן עם הגבישים של אפטיט. אבל כמו בספוג, רואים היררכיה שלמה של סדרי גודל ושליטה מלאה בכל שלב של ההיררכיה. ככה מתחילים מסיבי קולגן וגבישים של apatite, שביחד נותנים את הסיבים של המינרלים, שבתורם מסודרים במערך סיבים, ומערכי סיבים מסודרים בסידורים שונים, תיכף נראה איך הסידורים השונים עדיין מתקפלים ובנויים בצורה כזאת של מוטיבים גיליים שקיימים בעצמות שלנו, ואלה מתאספים ביחד ליצור עצם שיכולה להיות עצם ספוגית או צפופה, הכל ביחד ברמה של סנטימטרים, ואנחנו מקבלים את העצמות שבנות את הגוף שלנו. ואם אנחנו מסתכלים על מערך שונה של בנייה של העצם, פה למשל יש את העצם העוברית, עצם שצריכה להיבנות מאוד-מאוד מהר, ולא צריכה לעמוד במשקל ובכוח שמופעל עליה. לכן זו עצם מאוד לא מסודרת, סיבים מאוד לא מסודרים.

זו למשל (בשקף) עצם עם סידור סיבים מקבילים, שמאוד טיפוסי לחיות צעירות. זו גם כן עצם שצריכה להיבנות מהר מאוד, בעלי חיים נולדים וצריכים כבר לעמוד על הרגליים, והם משתמשים בעצם פשוטה יחסית. לאט-לאט העצם הזאת מתקלפת עם סידור הרבה יותר מורכב, שזה הסידור של העצם הלוחיתית, זה גם טיפוסי לעצמות ארוכות שלנו, למשל העצמות שמחזיקות את המשקל שלנו.

הדנטין של השן, שהוא גם כן מאותה משפחה תחת השם עצם, הוא שונה לחלוטין. כולם חומרים מרוכבים ברמה כל כך גבוהה, שאנחנו לא יכולים לשחזר אותם בצורה מלאכותית.

נעבור לעוד תפקיד שאנחנו אמורים להכיר, תפקיד של הגנה, הגנה על הרקמה הרכה בגוף. זה שוב הולך מסדר גודל של מיקרון, דיאטומאות שהם שוב יצורים חד תאיים שחיים בתוך הים ובונים את ביתם מזכוכית, ופה (בשקף) זה עוד יצור חד תאי שבונה את השלד שלו מסיידן פחמתי בצורה מאוד מורכבת,

זוהי פורמניפירות. דוגמא של פרפרי ים, הן צדפות שחיות באמצע הים, בפלנקטון, לכן השלד שלהן, הקונכיה שלהן צריכה להיות חזקה מאוד, כי היא מקבלת את כל הסחיפה של הים, אבל היא צריכה להיות דקה מאוד, אחרת היצורים האלה היו שוקעים בתוך המים. המבנה הפנטסטי הזה, מבנה של סיבים בצורת ספירלה, שנכנסים אחד בתוך השני, אנחנו עדיין לא בדיוק מבינים אותו עד הסוף. יש את קיפוד הים וכל מיני דוגמאות אחרות.

עוד תפקיד מאוד חשוב זה התפקיד של טחינת אוכל. דיברנו על שיניים. כשאומרים שיניים, כמובן אנחנו חושבים מיד על השיניים של החולייתנים כמונו, אבל יש שיניים גם לחיות הרבה יותר פשוטות כביכול, שזה למשל קיפודי ים. קיפודי ים – אם אתם חושבים על זה, יש להם שיניים שצריכות לגרד ולאכול מתוך האבן. בגלל שהם מוציאים את האוכל שלהם מתוך אבנים, אז השיניים שלהם צריכות להיות חזקות יותר מהאבן. וגם החולייתנים וגם קיפודי הים בונים עוד פעם חומר מרכב פנטסטי של סיבים של מינרל שמוכנסים במטריצה שהיא גם כן מטריצה מינרלית.

אם אתם מסתכלים פה (בשקף), זה האמייל של השיניים שלנו, הוא בנוי משלושה מערכי סיבים שמוכנסים אחד בתוך השני בשלושת הכיוונים הניצבים, ותנסו לחשוב איך חומר יכול להיות חזק יותר מחומר שבנוי ככה. ואמנם זה החומר שחוץ מחורים בשיניים בגלל חיידקים, מחזיק לנו כל החיים. אם אנחנו מסתכלים על החומרים המלאכותיים, חומרים מלאכותיים תלת מימדיים אולי היום אנחנו יכולים לבנות אותם במדפסת תלת מימדית, אבל בגדול מאוד-מאוד קשה לבנות חומר שיכול להיות בר השוואה למבנה החומר של האמייל שלנו. אמנם הסיבים יכולים להיות בעצמם סיבים חזקים יותר, בגלל שזה חומר מלאכותי, אך בעיקרון מאוד קשה להשיג מבנים כאלה.

יש שיניים גם לכיטונים, שהם רכיכות שמוציאות את האוכל שלהן מתוך האבן, לכן הם פיתחו מערך של שיניים, מין לשון כזאת שהם מחזיקים אותה מגולגלת בתוך הפה, 100 שורות של שיניים, כל יום הם זורקים שורה אחת ובונים שורה חדשה בסוף. השיניים האלה מכילות מגנטיט, בדיוק כמו חומר מגנטי, זה משמש כחומר חזק לעזור להם לגרד את האבן.

זה מביא אותי ישר לתפקוד אחר של תוצרי ביומינרליזציה, שזה ניווט. יש לנו את יוני הדואר, שיש להן גושים של מגנטיט בשורש של המקור, הם עוזרים להם לנווט לפי השדה המגנטי של כדור הארץ, ויש את הסטטוליטים של דיונון או אוטוליטים של הדגים, האוזניים של הדגים שעוזרות להם לנווט ולשמור על שיווי משקל בתוך הים.

יש גם חיידקים מגנטוטקטיים שהם מאוד מוזרים, הם חיידקים אנאירוביים, לא אוהבים את החמצן, לא אוהבים את האוויר. לכן הם מחפשים תמיד לנווט בעומק המים, את זה הם עושים על ידי שימוש בשרשרת של גבישי מגנטיט, שהם מכוונים אותם בתוך השדה המגנטי של כדור הארץ. ופה יש לי הדגמה של כאלה חיידקים ששמו אותם בשדה מגנטי והם מחליפים את הכיוון של השדה המגנטי.

זה ריקוד מגנטוטקטי של חיידקים מגנטוטקטיים, ודווקא פה הם יכולים לתת השראה או שימוש ישיר של ניווט בתוך הגוף. זה קצת כמו הסיפור של אסימוב, שאפשר להכניס סירות זעירות בתוך הגוף ולנווט אותן ולהביא אותן על ידי שדה מגנטי למקום שרוצים כדי שיישאו איתן תרופות או דברים כאלה, זה הרעיון.

אנחנו מגיעים עכשיו לתפקיד באופטיקה. אפילו שכל היתר מרתק, אני חושבת שזה עוד יותר מרתק. אז אין הרבה מאוד דוגמאות, אבל כל אחת ואחת היא דוגמא פנטסטית. נחשוני ים, יש להם את הזרועות

הארוכות שהם מוציאים אותן בתוך הים, ועליהן יש שלד בצורת מניפה כזאת עם הגופיפים האלה, ומסתבר שלכל גופיף כזה יש גיאומטריה מדויקת של עדשה. התפקיד של כל עדשה זה לרכז קרינה בתוך מערך של עצבים ששזור בתוך השלד. זה מין עיניים כאלה שמשמשות להם לראות אם יש או אין אור שפוגע בהם.

הגופים האלה שנקראים ציסטוליטים הם גופיפים שנוצרים בתוך עלים של הרבה מאוד צמחים שונים, ואנחנו נוכחנו שהתפקיד שלהם זה אופטימיזציה של פוטוסינתזה, כלומר הם מפזרים את האור שפוגע בעלה מהשטח שיש בו יותר מדי אור אבל כל האור נבלע על ידי העלה הירוק, הם מפזרים את זה בתוך הרקמה למטה, וכך אפשר לנצל את האור הזה לפוטוסינתזה בצורה יעילה יותר ממה שאפשר היה בלעדיהם. פה (בשקף) יש דוגמא של עיניים, עיניים של סרטן הנהרות, והעיניים האלה בנויות עוד פעם בצורת מערך של עיניים, מערך של מאות יחידות של העין בצורה מרובעת, שבנויות עם מראות על הקירות, כמו שאתם רואים פה. אלה מראות, גבישים שמשמשים כמראות שעוזרות למקסימום של כמות האור האפשרי להגיע למקום שבו נמצאים הרטינה ועצבי הראייה. כאן (בשקף) אתם רואים את המערך הזה מהצד, רואים את הגבישים שמחזירים את האור.

ועכשיו מגיע הדבר שלדעתי הוא הדבר הכי פנטסטי שאי פעם ראיתי, (הסרט צולם ע"י Kay Maney, <http://www.liquidguru.com/> נלקח באישורו מהאתר). היינו באילת, ואספנו פלנקטון מפני הים, חזרנו עם החומר עם המים עם פלנקטון בתוך דלי, פתאום ראיתי שיוצאים שם ניצוצות מהדלי, ושאלתי – האם העיניים שלי נפגעו מאור השמש או שזה משהו אמיתי. ברכה, שאחראית על המעבדה באילת, אמרה: כן, כן, זה קופיפודים. לא ידעתי מה זה קופיפוד, בעברית הם נקראים שטרגליים. זה התרגום של קופיפוד, רגליים שטוחות. החבר'ה האלה – תסתכלו מה קורה כאן, רואים אותם ולא רואים אותם. זאת אומרת, כשהם זזים יש מצבים שבהם הם לגמרי שקופים, חושבים שהם לא פה, לא רואים אותם, ויש מצבים שהם נותנים אור חזק וכחול. אני אנסה להסביר לכם איך הם עושים את זה. התופעה הזאת שייכת לתופעה שבאופן כללי נקראת צבעים מבניים, וצבעים מבניים קיימים בהרבה מאוד בעלי חיים שונים. כבר במאה ה-17 רוברט הוק ניסה להסביר איך צבעים מבניים עובדים בתוך הנוצות של הציפורים, הם גם כן התפתחו לפני מעל 500 מיליון שנה והם יחסית נפוצים מאוד. הם קיימים בחרקים, בעכבישים, בציפורים כמו שראינו פה, גם בתולעים, בדגים ונדבר על זה, והם מבוססים על שטחים שמחזירים אור.

כדי להסביר את זה, אני צריכה רגע לעצור ולדון במה זה אור. אני בטוחה שכולכם יודעים שאור אפשר לתאר בתור גל, וזה חלק מכל הצורות של קרינה אלקטרומגנטית; ויש הרבה סוגים שונים של קרינה אלקטרומגנטית שמובחנים אחד מהשני באורך הגל. בשקף שלפניכם אפשר לראות את אורך הגל הטיפוסי של גלי רדיו שהוא בסדר גודל של בניינים עד אנשים. אחרי זה יש מיקרוגל, פה אורך הגל הוא סדר גודל של חיות קטנות עד סדר גודל של מחט. אחרי זה בא האינפרא אדום, שהוא סדר גודל של חיידקים או חיות חד תאיות, אולטרא סגול הוא כבר בסדר גודל של חלבונים ווירוסים, קרני X בסדר גודל עוד יותר קטן, והאור הנראה תקוע פה באמצע. האור הנראה יש לו אורך גל שהוא קצת יותר קטן ממיקרומטר, ממיליונית מטר, ואת זה העיניים שלנו התפתחו לזהות. אנחנו רואים את האור הנראה, כי העיניים שלנו עשויות כדי לקלוט את האור באורך גל כזה, לכן יש ספקטרום מסוים שאותו אנחנו מסוגלים לראות, שהולך מאורך גל של בערך 350 ננומטר עד לאור אדום, שזה בערך 700 ננומטר.

אגיד עוד שלאלקטרוניק יש אורך גל של 10 בחזקת מינוס 11 מטר, את זה אני אומרת כי הרבה אנשים שואלים אותי למה במיקרוסקופ אלקטרוני לא רואים צבע, זה בגלל שזה אורך גל אחר. אבל מה קורה כשאור פוגע בחומר? כשאור פוגע בחומר, האור שמורכב מכל המגוון של צבעים שראינו פה, בחלקו נבלע ובחלקו עובר הלאה או מוחזר. העובדה שעלים נראים לנו ירוקים, זה בגלל שהעלה בולע את כל אורכי גל חוץ מאשר הירוק שהוא מוחזר. בגלל שהירוק מוחזר וחוזר אלינו, אנחנו רואים את העלה בצבע ירוק. אז בדרך כלל הצבע נראה בגלל מולקולות, חומרים בתוך כל דבר צבוע שבולעים את האור. ולכן פה כל הצבעים נבלעו חוץ מהירוק. כשאנחנו מדברים על החזרה של אור כדוגמת מראה, האור המוחזר עבר השתקפות על המשטח של המראה וחוזר אלינו, והצבעים שלא נבלעו הם אלה של המראה; שום דבר לא נבלע, הכל מוחזר, כל הצבעים מוחזרים למראה, ואנחנו רואים אותם. עכשיו, מה זה צבעים מבניים? פה העסק כבר נהיה קצת יותר מורכב, אבל לא יותר מדי. צבעים מבניים נוצרים על ידי שכבות של שני חומרים שמסודרות בצורה מאוד-מאוד שווה, ויש להם מקדם שבירה או מקדם החזרה שונה אחד מהשני. אז מה קורה פה? האור פוגע במערך של השכבות האלה, חלקו מוחזר וחלקו עובר הלאה, ואז הוא יעבור השתקפות מהשכבה הבאה, חלקו עובר הלאה, עובר השתקפות מהשכבה הבאה. מה שיוצא החוצה זה אור שעובר התאבכות בונה. זאת אומרת שהפאזה של האור היא אותה פאזה, אם הגלים היו הפוכים הם היו מנטרלים אחד את השני, אבל בגלל שהם הולכים ביחד אז הם עוברים הגברה, וכמובן זה תלוי באורך גל. אז יש לנו החזרה מושלמת; אם העובי של השכבות מסודר כך שהאור שהוא בסדר גודל של אור נראה, אז אנחנו יכולים לראות אותו וזה מה שנקרא גביש פוטוני, גביש - בגלל שהוא מסודר, פוטוני - בגלל שהוא מחזיר אור. מה שאנחנו בונים ומשתמשים באופן מלאכותי זה מראות דיאלקטריות. נראה מה הן יודעות לעשות ומה בעלי חיים יודעים לעשות שזה טוב יותר ממה שאנו יודעים לבנות. יש כל מיני סידורים שונים, יש מחזיר אור שהוא סדיר ומושלם, זאת אומרת שכל העוביים של כל השכבות מסודרים היטב כדי לתת את האפקט, אבל הם גם כן מסודרים בצורה מושלמת והעובי שלהם תמיד אותו דבר. מחזיר אור כזה משמש אותנו לסיבים אופטיים, ללייזרים ולמפצלי קרינה. קופיפודים זה מקרה כזה, נראה את זה בסוף. יש גם סידור מצויץ, chirped. זה אריזה של שכבות עם עובי שהולך ומשתנה כל הזמן, נהיה יותר ויותר דק, זאת טכנולוגיה שמשמשת במראות לייזר סופר-מהירות למשל, זו בדיוק הטכנולוגיה שנותנת את הצבע לחיפושית כסופה. מצד שני יש מחזיר אור שהוא הרבה יותר מרושל, הרבה פחות מסודר. זה נותן מה שנקרא מחזיר אור בפס רחב, שמשמש לציפויים, למראות בעלות החזרה גבוהה, למחזירי אור בפס רחב – כפי שאמרנו - ואפילו לקוסמטיקה, כי אנחנו רוצים שהעור שלנו יהיה מבריק ויפה. בואו נראה מה עושים הדגים בקשקשים שלהם. פה רואים דג קוי יפני, דגים שיכולים להגיע למחירים של עשרות אלפי דולרים אם יש להם צבע של הדגל היפני. בשקף רואים דג שהוא לגמרי רק כסוף, אבל תראו איזה סוג של הברקה יש לו, הברקה של כוסף מאוד-מאוד חזק. הנה פה, אתם רואים את זה בקשקש. וממה זה בנוי? זה בנוי מתאים, רואים פה את התאים מתחת לקשקש, מה שמסומן בעיגול כתום זה תא, התאים מלאים גבישים של גואנין; הפסים האלה שאתם רואים הם גבישים דקים עם לוחיות דקיקות של גואנין, חומר שיש גם בחומר הגנטי שלנו, בדנ"א.

בשקף הבא אתם רואים את זה יותר טוב, זה בדג קוי אחר, תראו את הגבישונים האלה, זה תא והתאים עמוסים גבישים, התאים הם בשכבה אחת על השנייה. אנחנו יודעים למדוד בדיוק את המרחקים בין

הגבישים ואת עובי הגבישים, לכן אנחנו יכולים לאפיין את המחזיר-אור, אנחנו יכולים גם למדוד את האור המוחזר וגם להשוות את זה למה שאנחנו מחשבים שצריך להיות האור המוחזר, בהתאמה מאוד טובה. אם לוקחים בחשבון את כל הגבהים ואי הסדר, מקבלים ספקטרום של החזרה על כל האור הנראה, ובגלל זה הדג נראה כסוף. כסוף זה צבע אקוויולנטי לצבע הלבן של צבעים רגילים שאנחנו רואים, כשזה מוחזר כמו מראה זה כסוף, על כל הספקטרום של האור הנראה.

קשקשים של דגים הם אפילו טיפה יותר משוכללים בגלל שאם לגמרי לא היה סדר בסידור של הגבישים, אז היינו מקבלים מחזיר אור לגמרי כאוטי והצבע היה כחול, לא כסוף. והדג שאנחנו רואים פה בשקף הוא כסוף.

המצב הוא לגמרי שונה בדג שרואים בשקף הבא, הדג ניאון טטרה, שזה אחד הדגים שיש לנו באקווריום, דגיג קטן. כתוצאה מזה שאור פוגע בו, הוא משנה את צבע הפס הצדדי שלו מכחול לירוק. אז זה ממש גביש פוטוני, מה שנקרא גביש פוטוני מכוון על ידי אור; אנחנו לא יודעים לעשות את זה באופן מלאכותי. במקרה הזה הספקטרום הוא לא כל הנראה כי רואים צבע, אבל במיקום אחד ספציפי. לכן לא רק סידור הגבישים צריך להיות מאוד-מאוד מדויק ומאוד חוזר על עצמו, אלא גם אם משנה צבע, הוא צריך לשנות את המרחק בין הגבישים. מה שמסתבר שהגבישים עושים את זה במנגנון שדומה למנגנון של תריס ונציאני. גבישים עושים את זה ככה, אז המרחק ביניהם קטן יותר והאור המוחזר שונה וחוזרים אחורה, זה מנגנון מאוד משוכלל.

סופסוף נחזור לקופיפוד המופלא. תאמינו לי, כשראיתי את מערך הגביש הפוטוני מתחת לעור של החבר הזה, לא יכולתי להאמין. בשקף שלפניכם – שנמצא גם בפרסומת להרצאה – רואים קליפה של החיה, ומתחת לזה יש עמודים של גבישי גואנין, אחד על השני בצורה מושלמת, שהם גם נותנים מערך של משושים שמכסים את כל החלק התחתני של החיה. שוב אנחנו יכולים למדוד את העובי של הגבישים במדויק, יכולים למדוד את מרחק ביניהם, לכן אנחנו יכולים להבין איך הצבע נוצר.

אבל הסיפור לא נגמר פה. דביר גור שעבד על ה"בחורים" האלה שהם בצבע מג'נטה, וניסה לצלם אותם מתחת לאור חזק, אחרי הפעם ראשונה שהוא ניסה, הוא אמר לי: כנראה טרטתי את החיה המסכנה כל כך הרבה שהיא הפכה לצהובה. אמרתי: טוב טוב בסדר, תעזוב אותה. דביר בא למחרת בבוקר ואמר: את יודעת מה? היא חזרה להיות שוב סגולה, מג'נטה. ואז התחלנו לגרד את הראש ולחשוב האם יכול להיות בכלל שהצבעים שונים של הקופיפודים זה לא בגלל הצבעים הגנטיים שלהם, כמו שאחד מאיתנו בלונדיני והשני שחרחר והעיניים בצבעים שונים, אלא אולי זה משהו שמותנה באור. ובגלל שהחיות האלה הן נודדות בים, מלמעלה למטה וחזרה, אולי יש סיכוי שמה שגורם לצבעים השונים זה באמת האור. והנה עובדה, זה בדיוק ככה. זה קופיפוד, החיה שראינו קודם; דביר הדליק אור ואופס, הוא מאבד את הצבע לגמרי, נהיה שקוף לגמרי. אפשר ללכת קדימה ואחורה, וזה חוזר על עצמו. אותו דבר עם המסכן שהפך צהוב. הוא הופך צהוב באור, ובחושך הוא הופך בחזרה למג'נטה. זאת אומרת שהם מגיבים לתנאי אור באופן שהם יודעים לכוון את המרחקים בין הגבישים שלהם ואתם רואים את זה פה, מדוד ובדוק. כשזה מג'נטה המרחקים בין הגבישים הם יותר גדולים, אז האור המוחזר הוא תערובת של אור אדום וכחול, וכשהאור פוגע בו הוא מקרב בין הגבישים ואז האור המוחזר הוא צהוב. אותו הדבר בקופיפוד הזה (בשקף), מלכתחילה יש לו גבישים קרובים, אז האור מוחזר כחול. כשמדליקים את האור, זה בורח לאולטרא סגול ולא רואים אותו יותר, זה נהיה שקוף.

פה (בשקף) רואים ממש גביש פוטוני מכוון על ידי האור, משהו שאנחנו לא יודעים לעשות עדיין בצורה מלאכותית.

עוד דבר קטן לפני שמסיימים. למה הם צריכים את זה? קודם כל, הם צריכים להתאים את הצבעים שלהם לאור שמגיע לתחתית של אוקיינוס. אמרנו שהקופיפוד הוא כחול כשהוא למטה, וכשהוא למעלה במקום שיש אור, הוא שקוף. הוא מתאים את עצמו לאור שחודר לתוך העומק של הים. אבל זה לא מספיק. למה הוא עושה את זה בכלל? פה יש שני דברים פיקנטיים. הוא צריך להיות שקוף כשהוא עובר למעלה, בגלל שקופיפודים הם אוכל מצוין לכל מיני טורפים אחרים בים. לכן נוח לו להיות שקוף, כשהוא מגיע למעלה לאכול, שלא יראו אותו. בכל זאת, כדי להפגיש בין נקבות וזכרים, הם צריכים לראות אחד את השני בתוך הים, אז הצבע מיועד לזה. הפרט הפיקנטי הוא שהזכרים יש להם את הצבע ואין להם עיניים, ולנקבות יש עיניים והן לגמרי שקופות. ככה הנקבות יכולות לראות את הזכרים, והנקבות הן מוגנות תמיד על ידי זה שהן תמיד שקופות כי הן מתרבות, לכן הן צריכות להיות מוגנות תמיד. זה הסיפור של הקופיפודים.

עכשיו אני רק רוצה להראות רגע מה אנחנו יודעים לעשות בתחום הגבישים הפוטוניים שניתנים לכיוון על ידי אור. אנחנו יודעים לבנות גבישים פוטוניים שניתנים לכיוון גם בצורה מכנית וגם בצורה חשמלית. אנחנו לא יודעים לעשות גבישים כאלה שניתנים לכיוון על ידי אור. ניתן לחשוב על כל מיני שימושים אפשריים בהשראה של הגבישים שבונים הקופיפודים והדגים וכל מיני חיות אחרות.

עכשיו, צריך להיות לכם ברור שעבודה כזאת שהיא כל כך מגוונת אי אפשר לעשות לבד, ואלה רק הפרויקטים שרצים במעבדה שלנו כרגע (בשקף). אז ענת עקיבא עובדת על עצמות. אודליה נבו על קונכיות של פרפרי ים. גל מור קליפה עובדת על פורמיניפרה. מריה פיאונטוני על משקעי סידן בעלים. נטע וידבסקי על שלדים של קיפודי ים. קרן קהיל גם על קיפודי ים. בן פלמר על עיניים של סרטן נהרות. ניר פונט, דביר גור ובן לשם עובדים על גבישים פוטוניים בדגים ובחיות אחרות. אנה הירש מטפלת בחלק התיאורטי של הלימוד על מבנים של הגבישים, נטע ורסנו עובדת על הסתיידות עורקים וכולסטרול. מיכל שמש על אוסטאוקלסטיים, תאים אוכלי עצם שקשורים לאוסטאופורוזיס. זה הצוות, הם רק אלה שכרגע במעבדה שלנו.

אנחנו משתפים פעולה עם הרבה אנשים אחרים, למשל חוץ מסטיב שאמרתי שהוא שותף לכל פרויקט בביומינרליזציה, דן אורון לגבי כל האופטיקה, לזלי לייזרוביץ', ליאור קרוניק - תיאורטיקן. קרינה יניב

עוזרת עם דגי זברה, בני גייגר עם אוסטאובלסטים, אירית שגיא –

יש קבוצה אחרת של אנשים שאני לא יכולה שלא לציין אותה, כי אלו עמיתים שלנו שעובדים ביחידות של שירותי מחקר - אייל שמעוני, אותניה קליין, יפעת קפלן, ילנה קרטבלישווילי, קטיה רכב. גם אחרים, אני פשוט לא יכולתי לכתוב פה את כולם, הם אנשים פנטסטיים. טלי דעדוש, ולאד ברומפלד, ולדימיר קיש עם מיקרוסקופ קונפוקלי, ספי אדדי עם ה-light sheet, שיטה חדשנית.

אני מודה להם כמובן, מוקירה את העזרה של כולם. ואני מודה לכם על זה שבאתם לשמוע אותי. תודה רבה.