

## הפודקאסט: מסע הקסם המדעי, מבית מכון ויצמן למדע

### חיים, שבבים ומחשבים

יבשם עזגד עם פרופ' רועי בר זיו וליאור בן גיא

יבשם עזגד : מה הקשר בין מדע לאומנות? מה דומה ומה שונה בין מדען לאומן? האם הם באים מאותו מקום? מה הם מחפשים? לאן הם רוצים להגיע? אני יבשם עזגד ואתם מאזינים לפודקאסט מסע הקסם המדעי המביא חדשות מדע ותרבות בשפה ידידותית מחזית המחקר והיצירה במכון ויצמן למדע. הפעם בסדרת המפגשים בין מדע לאומנות אנו מארחים את פרופסור רועי בר זיו מהמחלקה לפיזיקה כימית וביולוגיה במכון ויצמן למדע, ואת האומן הישראלי המושגי העכשווי הכמעט עתידני שכותב בימים אלה את עבודת הדוקטורט שלו באומנות והוא מלמד באוניברסיטת גולדסמידס בלונדון, ליאור בן גיא. שלום לשניכם.

פרופ' רועי בר זיו : שלום בוקר טוב. ליאור בן גיא ופרופ' רועי בר זיו חולקים עניין משותף, החיים. כלומר, תהליכי החיים המינימאליים, התמציתיים הבסיסיים ביותר ודרכי ההתפתחות שלהם. שניהם בחרו באופן בלתי תלוי לחקור את החיים באמצעות חיקוי. תכף ננסה לברר איתם מדוע בחרו בדרך זו, מה דומה ומה שונה בין העבודות של שניהם, והאם וכיצד יכול חיקוי להוביל ליצירת תופעות חדשות ואולי אפילו לעצב את העתיד. פרופ' בר זיו, אתה בונה מערכות ביולוגיות מלאכותיות על שבב. האם תוכל לספר לנו על כך?

פרופ' רועי בר זיו : כן בשמחה. הגעתי לביולוגיה דרך ארוכה כפיזיקאי ניסויי וכמו הרבה אחרים שבאים מהמדעים המדויקים, המערכות הביולוגיות הם מדהימות, הם מסקרנות והם מאד מאד ייחודיות בכך שהן מורכבות מאד. יש קוד גנטי אוניברסאלי שהתאים נמצאים בתוך קרום, יש שכפול הקוד, מחזור חיים, חלוקת תא, חילוף חומרים, מטבוליזם, התפתחות, גדילה, מערכות בקרה ביוכימיות מופעלות על ידי מאות ואלפי גנים. כמערכת של חומר היא מאד מאד מסובכת ומורכבת והיא כמובן יודעת לעשות חישובים ואבולוציה ועיבוד אינפורמציה. התהליכים האלה מאד מאד מורכבים ומצומדים ולפיזיקאי זה מאד מאד מסובך. אז או שחוקרים את זה בהקשר שבהם מערכות חיות נמצאות כמו הרבה אחרים. מבחינה תיאורטית, חישובית, ניסויית. למדוד מה שאי אפשר למדוד. או להוציא דברים מהקונטקסט ולבודד אותם ולחקור אותם מחוץ לתא. וזה לאורך השנים נקרא ביוכימיה או ביופיזיקה שבה לוקחים אלמנט אחד וחוקרים אותו בצורה מבוקרת מחוץ לתא, במבחנה. יבשם עזגד : מתוך תקווה שיום אחד אחרי שנפתור את כל הבעיות הקטנות, נרכיב בחזרה את התמונה הגדולה.

פרופ' רועי בר זיו : יפה. בדיוק. אז כרגע הגישה שלנו היתה ב-15 שנה האחרונות זה לנסות לחשוב על הדבר הבסיסי ביותר שנמצא בתוך תא. לצורך העניין, נפריד את כל הדברים, נשאר את העיקר. נשכח מאבולוציה, נשכח מחלוקת תא, נשכח משכפול. הדברים שעושים

אותם במערכת חיה לחלוטין. לחשוב על הריאקציה הבסיסית ביותר של שעתוק הקוד ותרגומו לחלבונים כמשהו שננסה להוציא אותו מחוץ לתא ונשים אותו במערכת תאית מלאכותית ולחקור אותו. והרעיון הוא כשיטה ניסויית חדשה, לחקור תהליכים ביולוגיים מורכבים הקשורים בביטוי גנים בעזרת מספר רכיבים מינימאלי כדי לקבל תופעות מורכבות. במובן של כמו שפיימן ניסח את זה, הפיזיקאי התיאורטי הידוע, "אני מבין את מה שאני יכול לבנות". זה גישה פיזיקאלית ניסויית בביולוגיה.

יבשם עזגד : שהוא היה אגב תיאורטיקן.

פרופ' רועי בר זיו : תיאורטיקן לחלוטין. אני לא בטוח שהוא התכוון לביולוגיה כשהוא אמר את זה אבל זה באמת היה קצת בתחילת הדרך שלנו, חווינו לא מעט סימני שאלה על הגישה הזו, האם ניתן לשחזר תהליכים ביולוגיים יותר ויותר מורכבים מחוץ לתא. אני שמח לספר שזה עובד.

יבשם עזגד : אוקי. ליאור, האומנות שלך נוצרת, מתחוללת ומציגה את עצמה במערכות ממוחשבות. היא לא מבוססת על ציור או על פיסול או על צילום, האומנויות שאנחנו רגילים לראות בגלריות. האם תוכל לספר לנו על כך?

ליאור בן גיא : כן, בהחלט. אני הגעתי דרך, עברתי איזושהי דרך של לעסוק במחשבים בתור מתכנת גרפיקה. אני התחלתי להתעסק במערכות חיות. אני קורא להם מערכות חיות אבל בפועל אין בהם באמת דבר חי אלא הם מנסות להתחקות אחר התנהגויות שאנחנו נוהגים לראות בעולם הטבעי. אני חושב שדוגמא טובה לזה זה להקת ציפורים שיש לה איזושהי התנהגות קולקטיבית שהיא יותר מסך חלקיה. כל ציפור יש לה את ההתנהגות שלה אבל היא מבצעת הרבה אינטראקציות עם הציפורים שמולה. ואפשר לראות במערכת כולה, בלהקת הציפורים כולה כאיזושהי התנהגות גדולה, מורכבת יותר. את התופעה הזאת ניתן לחקור באמצעות תוכנה, באמצעות הדמיה ולאט לאט אולי גם קצת להתרחק מהעולם הפיזי. להתרחק מציפורים ולדבר על ההתנהגות עצמה של flocking או swarming. אז זו איזושהי דוגמא נפוצה לסוג ההתנהגויות שמעניינות אותי ובאמצעותם אפשר לקיים איזושהו דיון שאני לוקח אותו יותר לשדה של האומנות. אני יותר, אפשר להגיד שאני מונחה יותר על ידי האסתטיקה מאשר על ידי שאלת מחקר כזאת או אחרת. החיפוש שלי הוא אסתטי.

יבשם עזגד : האם זה יהיה נכון לומר שהעבודה שלך מתחילה מאיזושהו סוג של התבוננות בטבע, עוברת למשהו מאד לא קשור לטבע כמו תכנות ומתמטיקה ובסופו של דבר חוזר ובכל זאת מראה לנו משהו על הטבע.

ליאור בן גיא : אז קודם כל תכנות ומתמטיקה בעיני מאד קשורים לטבע. הם למעשה, אני רואה בזה, גם המתמטיקה שזה התחום שלי אבל זו שפה לתאר את הטבע בשבילי בראש ובראשונה. במובן מסוים כל מה שאנחנו הולכים לעשות זה לתאר את מה שאנחנו רואים סביבנו וזה גם מה שאני עושה. אני חושב שאולי מה שקצת מייחד אותי, מה שהייתי רוצה שקצת ייחד אותי זה שאני מוכן להתרחק יותר ממה שאני רואה מסביבי גם אם אני לא בהכרח יודע להגדיר את זה בזמן שאני עושה את זה, מתוך מחשבה שזה עלול להניב תוצאות שהן חדשות עבורי או מפתיעות.

יבשם עזגד : התופעות הן תמיד חזותיות או שהן-

ליאור בן גיא :

לא. ממש לא תמיד חזותיות. לפעמים התופעות עצמן מסתכמות בסט נתונים שנאגר והוא קיים כמספרים ו, או שאני אמחיש אותו מאוחר יותר או לעולם לא. זה בהחלט יכול לצאת לביטוי בצורה של סאונד או גם בצורה שמכתיבה התנהגות של קבוצה של אנשים. זה יכול לצאת לביטוי במחול, אני לא חושב שיש מדיום אחד ספציפי שאפשר לעסוק בו. להפך, ככל שיותר מעשירים את טווח האפשרויות, אני יותר מתרגש מזה.

יבשם עזגד :

כן. רועי, קודם תיקנת אותי, אמרתי שאתם בונים מערכת חיה ואמרת לי "לא, זו מערכת מלאכותית ביולוגית". כלומר, אתם מחקים את הטבע. למה בחרתם לעשות את המחקר שלכם באמצעות חיקוי? למה אתם לא מנסים לברוא חיים?

פרופ' רועי בר זיו :

זה, בראש ובראשונה אנחנו מדענים שמחפשים תשובות לשאלות ואני רוצה להתחבר למה שליאור אמר, יש בעבודה שלנו הרבה אלמנט של אסתטיקה והדמיה וחיפוש אחר תכונה קולקטיבית, תכונות קולקטיביות במערכת ולא מעט תכונות שתכף נדבר עליו. הרעיון הוא באמת בראש ובראשונה שיטה שמפשטת, מחפשת דרך לפשט ולמדוד דברים שהם מורכבים מאד ומצומדים מאד במערכת חיה. לכן אין לנו פה איזושהי שאיפה לברוא חיים, זה לא הכיוון בכלל. יש אולי מדענים שחושבים על איך לברוא, לעשות הנדסה גנטית מתוחכמת שתיצור תא מלאכותי ממש דה-נובו, מהתחלה ועד הסוף של תאים מינימאליים. יש לא מעט מדענים שחושבים על כך, וזה מאמץ רציני שעומד בזכות עצמו. השיטה שלנו בראש ובראשונה חושבת על דרך ללמוד על דברים ובחרנו באמצעים פיזיקאליים לעשות את זה והרעיון היה להשתמש בשבב של סיליקון כחומר שאפשר לעשות בו עיבוד שבבים מיניאטורי באמצעים של מיקרו-אלקטרוניקה ויש לא מעט ויזואליזציה והדמיה במערכות האלה. זה הכל פרוש-מרחב. ולחשוב כמו בסיליקון, כמו בתעשיית המיקרו-אלקטרוניקה, שיש רכיבים פזורים במרחב ועושים אינטראקציה אחד עם השני. חשבנו על התאים שלנו כעל מעין חדרים קטנים בתוך יצוקים, חצובים בתוך סיליקון. מיניאטורים קטנים שבתוכם אנחנו מחברים בדילים של DNA. למשטחים המיניאטורים אנחנו מחברים באמצעים כימיים, פיזיקאליים, אופטיים, גדילים של DNA. מייצרים חדרים קטנים שיש להם קשר לסביבה החיצונית והם מקבלים דרך הנוזל שנכנס ויוצא פנימה בפעופע, את כל חומרי הריאקציה הבסיסית ביותר שקורית בתא חי. שזה שעתוק ותרגום כמובן מה-DNA ל-RNA ולחלבונים בעזרת כל המערך הביולוגי המינימאלי, מהריבוזום עד אנזימים נוספים שעובדים יחד אתו. אבני הבניין המולקולאריים שצריך בשביל לייצר RNA וחלבונים מקורות אנרגיה מולקולאריים. אנחנו בעצם בעזרת ה-DNA המקובע יוצרים מעין סימולטור לתא או ריאקטור שמתוכנת גנטית על ידי אותה תכנית גנטית שאנחנו מצמידים לרצפת התא המיניאטורי הזה, ובעזרת חילוף חומרים שקורה עם הסביבה, אנחנו מבצעים, מתכנתים, בין אם זה על ידי הגנים שאנחנו שמים בתוך הריאקטורים או על ידי הגיאומטריה של התא, הצורה שלו. את הפעולות הדינאמיות שקשורות בביטוי חלבונים לראשונה מחוץ לתא בצורה מבוקרת. הדגמנו לא מעט פונקציות פשוטות אמנם אבל חשובות שקורות בתוך תהליכים. כמו למשל לשמור על הומאוסטזיס, ריכוז קבוע של משהו שאנחנו מייצרים. או ליצור, לתכנת מערכת שיש לה תופעה מחזורית בזמן. שהריכוזים של חלבונים שאנחנו מייצרים מבוקרים על ידי רשת גנטית.

יבשם עזגד : קצב הייצור שלהם.

פרופ' רועי בר זיו : קצב הייצור למשל עולה ויורד בזמן. ואנחנו מודדים ריכוזים שעולים בזמן בצורה מחזורית. כמו השעונים שלנו של יום ולילה, אנחנו שחזרנו תופעה כזו של מערכות מחזוריות, תופעות מחזוריות בתוך התאים שלנו. וכמו שליאור ציין בהקשר של ציפורים, גם אנחנו חיפשנו דרך לאפשר לתאים שלנו לתקשר אחד עם השני. תדמינו מערך של תאים חצובים בתוך סיליקון שכל אחד הוא ריאקטור קטן שמתוכנת על ידי מה שצורב בתוכו, הקוד הגנטי שלו צרוב. הם מחוברים כולם בנקיקים קטנטנים שחצובים בסיליקון וכל אחד מייצר לא רק מה שיש בתוכו אלא גם מעביר סיגנלים, אותות כימיים לשכנים שלו. ובצורה כזו אנחנו רואים מופעים בזמן ובמרחב, הדמיה, ומתכנתים את המערכת ליצור תבניות מרחביות שמשנות בזמן בהתאם לקוד הגנטי ולמערך המצומד של התאים. זה היה קפיצת מדרגה.

יבשם עזגד : מהו המידע שעובר בין תא לתא ברשת הזאת?

פרופ' רועי בר זיו : מולקולות ביולוגיות, חלבונים, RNA שאנחנו מייצרים בתוך התאים שלנו שהם מפעפעים בחוץ. הכל בסביבה נוזלית מיניאטורית קטנה, מיקרופלואידית כמו שזה נקרא. כן בבקשה.

ליאור בן גיא : מסודרים בצורה של גריד או שהם מרחפים?

פרופ' רועי בר זיו : מצוין. אז זה בדיוק העניין. אתה הבנת נכון. זה בדיוק מסודרים או בצורה של מערך מסודר כמו סריג חד ממדי או היום דו ממדי.

יבשם עזגד : זה היום דו ממדי.

פרופ' רועי בר זיו : המערכת היא בבסיסה דו ממדית.

ליאור בן גיא : כמו סנלר רוטומט.

פרופ' רועי בר זיו : זה ממש סנלר רוטומט אבל אמיתי. אמיתי. זאת אומרת יש פה ריאקציות ביוכימיות שקורות על השבב בממדים של תאים מ-DNA עם ריבוזום אמיתי. לא על מחשב אלא אמיתי בתוך הציפיים שלנו. זה ציפיים ביולוגיים שהם יודעים לייצר דברים אוטונומיים פחות או יותר. זה באמת לקח יותר מכמעט 15 שנה להקים את כל המערך הניסויי, הטכניקות שקשורות בלייצר, לבנות, למדוד, לנטר, להבין מה קורה שם. ולאט לאט בנינו את כל אבני הבניין. היום אנחנו יכולים לתכנת את התאים שלנו בכל מיני מערכים מצומדים, למגוון רחב של תופעות ביולוגיות מבאמת סינכרון של תופעות שקורות בין תאים ליצירת מכונות מולקולאריות וכולי.

יבשם עזגד : ליאור, הדרך שאתה מייצר את העבודות שלך, דרך החיקוי. אתה אמרת לי, החיקוי כשלעצמו לא מעניין, מה שמעניין זה ליצור תופעות חדשות באמצעות החיקוי. איך עושים את זה? בדרך כלל אתה נוטה לחשוב שחיקוי הוא חיקוי. זה לא מביא דבר חדש.

ליאור בן גיא : אני חושב שקודם כל אני קצת מתרגש ממה ששמענו עכשיו. יש לי כל כך הרבה שאלות. אני חושב שזו באמת דוגמא טובה לזה שחיקוי קודם כל הוא מציף הרבה מאד אפשרויות חדשות. אם ניקח מערכת בטבע או אפילו דברים מאד פשוטים, ניקח משהו שהוא, שריפה ביער. אוקיי? זה דבר שהוא קורה כל הזמן ולא היית מדמיין אותו כמשהו שהוא בהכרח אני לא יודע, בטח חוויה אסתטית אבל תלוי מאיזה קנה מידה תופסים אותו. אבל אפשר לקחת את ההתנהגות הזאת ולייצר על בסיסה תופעות שהן

- חדשות, שהן לא בהכרח קשורות, אין לנו אסוציאציה מינית לשריפה ביער, אבל לוקחות את ההתנהגות הזאת שיש לך, נגיד גריד של תאים כמו שרועי תיאר וכשאחד נשרף אז השריפה יכולה להתפשט לתאים שסביבו.
- יבשם עזגד : אז מישוהו צריך להגיד להם, במקרה שלך זה תכנות ממש.
- ליאור בן גיא : זה תכנות.
- יבשם עזגד : צריך ממש להגיד לו, אם אתה רואה אש בשני צעדים ממך, תידלק גם אתה או לא או כמה.
- ליאור בן גיא : זה בדיוק זה. אבל זה הרבה יותר פשוט ממה שאנשים חושבים מלכתחילה. יש איזשהו משפט של אם-אז, יש אותי ואת האנשים או העצים או מה שזה לא יהיה. איזה מטאפורה שתבחר שמסביבי. ויש לי אוטונומיה מאד מאד בסיסית. לצורך העניין אפשר לדמיין פיקסלים שנמצאים בגריד ואם אני מסביבי יש שמונה פיקסלים ולפי הערכים שלהם אני אחליט איזה צבע אני צריך להיות. העניין הוא שזאת, זה אלגוריתם מאד פשוט, ניתן בשורה אחת של קוד לכתוב אותו. אבל ברגע שאני מייצר מצב כזה, אז יש פתאום משמעות לפידבק. בגלל שמי שלידי אדום ואז אני מחליט להיות כחול. אבל אז הוא ראה שאני נהייתי כחול, יש איזושהי אינטראקציה בינינו. מתוך הדבר הזה יכולים להיווצר מה שאפשר לקרוא להם high order structures. מבנים בעל קנה מידה או סדר גבוה יותר והמבנים האלה יכולים לקבל מורכבות שהיא מאד מאד מפתיעה, כך שבשורה אחת של קוד ניתן להגיע למבנים מאד מאד מורכבים עם תופעות שלי בכל אופן לפעמים מאד קשה להסביר. וזה המקום שבו החיקוי הופך להיות יותר מהמקור בשבילי. לא בהכרח כי יש לו יותר ערך בסופו של דבר. בתור מתכנת הדברים שאני מייצר הם פשוטים לעין ערוך מהעולם הפיזי, מהחיים. אבל בכל זאת היחס בין החוקיות המאד פשוטה שאני מייצר לבין המורכבות שיוצאת בסוף לידי ביטוי בסופו של דבר בתוכנה, זה דבר שהוא קסום בעיני וקשה לי לדמיין איך יימאס לי לחקור את זה. ניתן לקבל ממנו אני חושב חוויות, הוא מציע הזדמנויות אסתטיות או גם חוויות שהם טוב, כאמור לא בהכרח קשורות למקור. בהחלט יש להם ערך בפני עצמן. הן תופעה חדשה.
- יבשם עזגד : כלומר, אתה לא גורם למערכת לייצר משהו שיש לך את הדימוי שלו בחזון בראש.
- ליאור בן גיא : אם אפשר כמה שפחות.
- יבשם עזגד : זהו, אתה נותן להם להתחיל. נותן למערכת להפתיע אותך למעשה.
- ליאור בן גיא : אני חושב שזה, יש ז'אנר שלם של צורת אומנות, generate of art, אומנות גנרטיבית אם תרצו. אני חושב שהדוגמא הטובה היא זה שאני לא מתכנת את המוזיקה אלא את המלחין. אני מתכנת את הכוחות שפועלים על מלחין והוא בעצמו ייצר את האומנות. אני הגדרתי איזשהו סט חוקים ואני נותן להם לרוץ בפני עצמם. וכמובן שזה לא רנדומאלי לחלוטין אלא אני בתור מתכנת אני נע בתוך מרחב אפשרויות וכל פעם מנסה להצר את החוקיות באופן שיניב תוצאות שאני חושב שהן מעניינות או שישלחו אותי לדרך יותר מעניינת בתור אומן.
- יבשם עזגד : חוק כבוד המערכת וחירותה.
- ליאור בן גיא : אפשר לומר, כן.

יבשם עזגד :

נדמה ששניכם, גם רועי וגם ליאור אתם בשתי העבודות שלכם, שתי תחומי העבודה האלה, היצירה, יש מקום מאד מרכזי למושג הרשת וגם לצורך בסנכרון. אז אולי רועי, אולי תספר לנו קצת על ההיבטים האלה.

פרופ' רועי בר זיו : כן. כמו שליאור אמר, המערכת שלנו ממש דומה לרשת מרחבית של תאים שמצומדים

במרחב. כל אחד בשני ממדים וכל אחד רואה את השכנים הקרובים לו ומה שהוא מייצר בפנים יכול לפעפע החוצה עם השכנים הקרובים ואולי גם לזלוג לשכנים היותר רחוקים בהתאם לכמה חזק האות הכימי שאנחנו משדרים. המבנה המרחבי הזה, כאשר בכל אלמנט בסיסי, בכל תא יש איזושהי רשת גנטית, ופה הרשת הכוונה היא לרשת במובן האבסטרקטי של המילה. כלומר, רשת זה אוסף של גנים, מספר גדילים שונים של DNA שעל כל אחד הרצף הגנטי הוא מקדד לאיזושהו חלבון או מולקולה ביולוגית שכאשר היא נוצרת בתוך התא, היא מפעילה פידבק, משוב על למשל ייצור של מולקולה אחרת. בדיוק כמו שקורה בתוך תאים. התאים שלנו הם תאים חיים, או חיידקים לצורך העניין פשוט יותר, מגיבים כל הזמן לסביבה שלהם ולסיגנלים פנימיים והם משתמשים ברשתות גנטיות די מורכבות ועשירות מאד, רבות, למגוון רחב של שינויים ואדפטציות שהם צריכים לעשות בזמנים קצרים, בזמנים החוקיים. והרעיון הוא בלהוציא דברים מחוץ לתא זה בדיוק לנסות לחקות או לשחזר, בעיני חיקוי ושחזור זה דברים שקשורים אחד בשני, את הקונספט הזה של רשתות. רשת גנטית ביוכימית שיש בה פידבק אינהרנטי, אחרת הדברים לא מתקדמים בצורה, אין מורכבות. וברגע שאנחנו מצליחים לשחזר למשל רשת שהזכרתי קודם, רשת גנטית שמינימום שלה זה שני אלמנטים, אחד מפעיל את השני והשני חוסם את הראשון. זה הרשת המינימאלית, במובן של יצירת חלבונים. ששני גנים שכאמור מחוברים בפידבק, במשוב, ככה זה מערכת מינימאלית שיכולה להיכנס לאוסילציה. זאת אומרת, המופע בזמן שלה הוא מופע מחזורי, ריכוז עולה ויורד של כל אחד מהחלבונים בזמן מחזור שנקבע על ידי היחס, יחסי הגומלין בין האלמנטים בתוך הרשת אבל גם במקרה שלנו על ידי גודל התא שחצוב בסיליקון. ככל שהתא יותר קטן, כך התנודה יותר מהירה. זמן המחזור יותר קטן. זה היופי, פה הפיזיקה נכנסת, הגיאומטריה מכתובה זמנים אופייניים לריאקציות כימיות או ביו-כימיות שקורות בתוך התאים. כאשר לקחנו אוסילטורים, מתנדים ביוכימיים שמקודדים על ידי גנים בתוך כל תא וצימדנו אותם במרחב, התקבלו תופעות שהן מאד מאד גנריות בטבע שקשורות בסנכרון. סנכרון זה דבר שאנחנו רואים בכל מיני מערכות חיות, בכל מיני סקאלות. מגחלילית עד חיידקים. תאי לב שמצומדים ביוכימית ומכנית שיוצרים תנודה קוהרנטית וכולי מסונכרנת. זה דברים שאנחנו נותן לנו הזדמנות ממש לחקור מערכת כזו מהרמה של הקוד הגנטי של הרכיבים עצמם, ואלמנטים הבקרה, דרך מה קורה בכל תא כעת זמן מחזור תלוי בפרמטרים המיקרוסקופיים של המערכת ועד סנכרון של הרבה מאד תאים ביחד. וראינו פה באמת שיש מעבר לסנכרון. ככל שהמערכת יותר מצומדת בצורה יותר חזקה, הצימוד יוצר סנכרון יותר משמעותי, יותר חזק. גילינו למשל שבמערכת ביולוגית כזו או ביוכימית כזו האיטי תמיד מכתוב את קצב הסנכרון.

מעניין. מדוע? מדוע דווקא האיטי? יבשם עזגד :

פרופ' רועי בר זיו : כן. כי זה באופן ספציפי במקרה הזה זה קשור בכך שהמשוב הוא משוב שלילי. זאת אומרת התהליכים בנויים על ידי משוב שלילי שחייב להיות בשביל לקבל תנודה מחזורית. ברגע שיש משוב שלילי אז מי שאיטי הוא זה שמכתיב את קצב הסנכרון. הוא זה שמכתיב את ה...  
 יבשם עזגד : האחרים מתחשבים בו.  
 פרופ' רועי בר זיו : לגמרי. כמו ש-  
 יבשם עזגד : סוג של נימוס.  
 פרופ' רועי בר זיו : נימוס כמו שמתאר סבא הולך עם הנכד שלו, כמובן שהסבא יכתיב או מי שהאיטי בין השניים יכתיב את קצב ההליכה. בכל מקרה, הרעיון הוא שלקבל סנכרון שזה תופעה מרחבית עם הרבה מאד עושר דינאמי, קשה, ומשהו שאפשר לתכנת על ידי פרמטרים מיקרוסקופיים כמו באומנות של ליאור. גם אנחנו יכולים לתכנת את הגנים שלנו ואת הציפ שלנו לקבל מופעים של סנכרון שמאד מאד מרהיבים. החלק האסתטי של העבודה שלנו הוא קריטי. אנחנו מסתכלים על הציפ ורואים את הגנים עולים ויורדים בעזרת סמנים של אור שאנחנו מכניסים פנימה. אנחנו רואים בדיוק את התנודות ורואים איך הגלים מתפשטים ממקום למקום כשמתבצע סנכרון כזה.  
 ליאור בן גיא : אני, אני רוצה גם להתייחס לנושא הרשתות שזה באמת, זה באמת משהו שהוא מאד משותף. יש כמה מאפיינים אני חושב במושג רשת, במיוחד היום אני חושב. מה זה ההיווצרות של האינטרנט ופתאום היה מאגר מידע שיכלנו לבחון אותו, לבחון את המבנה שלו והגיעו לזה שיש איזשהם תכונות אוניברסאליות שקיימות. אז יש איזשהו דבר מלאכותי לחלוטין שיצרנו ופתאום בחנו אותו וגילו שהוא מבחינה טופולוגית די דומה להרבה מאד דברים שקיימים מסביבנו בטבע. אז יש הרבה משמעות פה להיררכיה וזה דבר שמעניין לחקור אותו.  
 יבשם עזגד : האם יהיה נכון לומר שהעבודות של שניכם רועי וליאור, מתנהלות כשהן במרחק גדול משיווי משקל תוך שאיפה כמעט בלתי מושגת אפשר לומר, להגיע לשיווי משקל.  
 ליאור בן גיא : אני חושב שה, אתה יכול להגיד שהרבה דברים מעניינים או הדברים המעניינים בעולם שלנו הם קצת מחוץ לשיווי משקל. אני בעצמי איזושהי תופעה שפועלת באיזשהו chemical imbalance כזה. אני תופעה בעצמי כימית שהיא כל הזמן ללא שיווי משקל ושם נמצאים הדברים המעניינים. מה שהוא לא כזה הם דברים סטטיים. אלה אבנים, אבל גם אבן לצורך העניין הגיעה לתצורה שלה כתוצאה מאיזשהם תהליכים שהם לא מאוזנים. אז אני הייתי אומר שאני דווקא מנסה להתחקות אחר דברים שהם מחוץ לשיווי משקל. רועי מקודם הזכיר איזושהי תנודתיות. מערכת שיש לה תנודתיות. אז אפשר לדבר על מערכות כימיות, מהצד שלי זה יהיה יותר נכון אלגוריתמים שמנסים להתחקות אחר התופעה עצמה באופן מופשט. לצורך העניין reaction refusion שזה לעשות משוואות של אנטורינג שהניב אני חושב מחקר אסתטי שלם מלבד זה שמדע הוא יכול להסביר כל מיני תופעות ויזואליות כמו פסים ונקודות שמוכרות אצל בעלי חיים וגם אצל דברים לא חיים ובאמת מתקיים איפשהו לפעמים על ספקטורים שבהם. משהו שהוא חי והוא לא כל כך חי. אני אישית מתעניין בהם ברמה המאד מופשטת. לא מעניינים אותי ה-instances, לא מעניינות אותי הדוגמאות של הדברים האלה של מערכת למשל באי שוויון משקל, מעניין אותי אי שיווי המשקל

בפני עצמו בתור התנהגות מופשטת. והמחשב מציג בפני אפשרויות מאד די בלתי מוגבלות לחקור את התופעה הזאת בפני עצמה.

יבשם עזגד : כן. איך אתה רואה את זה רועי?

פרופ' רועי בר זיו : כן. זה באמת מעניין. התאים חיים הם פועלים רחוק מאד משיווי משקל ולמעשה כאשר אתה מת רק אז הוא יורד לשיווי משקל. האופן שבו זה עובד, בטבע בכלל להיות מחוץ לשיווי משקל יכול לקרות בהרבה מאד אופנים. זה יכול להיות מפל טמפרטורה או זרימה שקורית באטמוספירה, פחות יכול להיות כאמור בשיווי משקל בהרבה מאד דרכים. במערכת חיה, המערכת יוצאת משיווי משקל בסקאלה הקטנה ביותר. וזה קורה באמצעים כימיים כאשר אותם מכונות מולקולאריות או אנזימים שצריכים לבצע פעולות, נדרשים למולקולות שהן עתירות אנרגיה, כמו ATP, מולקולות שנמצאות כמו בטריה בריכוז מאד מאד גבוה, הרחק משיווי משקל. מולקולות של הדלק.

פרופ' רועי בר זיו : הדלק המולקולארי האוניברסאלי שיש בתאים שלנו, ה-ATP. מולקולות שהן, בלעדיהן התאים לא יכולים לבצע את התהליכים ולכן אתה כל הזמן עסוק בלשמר את הבטריה בריכוז גבוה כדי שהיא תוכל, שאתה יכול לבצע כל הזמן תהליכים. עכשיו, מדוע זה ככה? מכיוון שהתאים נמצאים בממדים מאד קטנים ששמה, בנוזלים הכל רועש מאד. אם היינו יושבים בתוך תא אז אף אחד מאיתנו לא היה יושב בשולחן והכל פה היה מגיגל ורועד בתנועה בראונית מאד משמעותית. כלומר, הטבע בממדים מאד מאד קטנים, בנוזלים, מולקולות הן מאד מאד רועשות. והרעש הזה מכניס המון המון חוסר דיוק. וכדי להתגבר על חוסר דיוק ולייצר תנועה כיוונית בזמן שמהו קורה כנגד הנטייה הטבעית לאנטרופיה, לאי סדר, אז הטבע המציא שיטה שבה השימוש בכמו פאקמנים קטנים שצורכים אנרגיה, הריבוזומים וכל שאר האנזימים משתמשים באנרגיה כדי ליצור סדר בזמן ובמרחב בתוך התאים. וזה משהו שהוא אינהרנטי לתאים חיים. ככה יש עיבוד אינפורמציה, ככה יש חישוביות. כלומר בלי צריכת אנרגיה, אין לנו בעצם יכולת לחיות. זה מאד מאד בסיסי בכל התאים, מחיידקים ועד כמובן אורגניזמים מורכבים כמונו וכולי. וזה אחד הדברים שיוצאים מפיזיקה למערכת ביולוגית. העובדה שהמערכת היא מחוץ לשיווי משקל ובו זמנית היא יודעת להיות מאד מדויקת ומאד אופטימאלית ויודעת לבצע חישובים מהסוג שאנחנו לא כל כך מכירים. זה לא חישובים דיגיטאליים, זה לא חישובים נירונאליים. זה, התאים הם כמו חיידקים. הם עושים חישובים אחרים לגמרי. חישובים כימיים, חישובים דרך ריכוזים, דרך מפלי ריכוזים. וזה משהו שאנחנו מאד מעוניינים להבין. כי אם אנחנו נבין אותם למשל על ידי שחזור וחקוי במערכת מלאכותית, אז אולי גם נוכל לתכנת מערכות כאלה, לבצע חישובים, זיכרון, למידה מהסוג שמערכות חיות עושות. יום אחד זה יהיה היברידי, לא רק חי. אני אזכיר פה שאנחנו לאחרונה התחלנו לעבוד עם סיליקון כחומר אלקטרוני ולממש את הממשק שחיפשנו במשך שנים בין החומר האלקטרוני הסיליקוני לבין הנוזל והריאקציה הביולוגית שקורית ממש על משטח הסיליקון. והצלחנו להראות שבעזרת שדות חשמליים שנוצרים עם אלקטרודות שנמצאות על המשטח, אנחנו בעצם יכולים לעשות הפרעות לריבוזום פעיל בסמיכות למשטח. ממש לקחת אותו מפה, להפעיל עליו כח חשמלי, להזיז אותו כנגד



האנטרופיה שלו ולגרום לו להפסיק לעבוד. זה משהו שאנחנו הראינו לאחרונה וזה פותח פתח לבוא ולהתחיל לחשוב על חישוביות ואנרגיה וסדר ושיווי משקל או יציאה משיווי משקל במערכת מלאכותית שהיא ביולוגית.

יבשם עזגד :

שניכם עובדים בתכנות. תכנות ביולוגי, תכנות של מחשב בשפת מחשב זו או אחרת. האם המדיום הזה של התכנות יש לו משמעות מבחינת העבודה, מבחינת התוצר? או אפשר לנסח את זה אחרת, בתקשורת נהוג לומר שהמדיום הוא המסר, כאן השאלה היא האם המדיום משפיע באיזושהי צורה על המסר? זו שאלה קצת יותר צנועה אבל עדיין מאד מאחדת גם את המדע וגם את העבודה שלך, ליאור.

ליאור בן גיא :

אני חושב שבאמת זו נקודה, זו איזושהי נקודה קריטית בהבדלים בין מה שאנחנו עושים. אני, אפשר להגיד שאני פועל מחוץ למגבלות החומר. כלומר, אני מתכנת על מחשבים פיזיים, אבל המערכות שאני עוסק בהן הן מופשטות לחלוטין. אני לא מוגבל הדברים שאני מתכנת לא מוגבלים לכללי הפיזיקה אלא אם כן אני בוחר להכניס אותם לשם. זה אומר בפועל שהחיים שלי הם הרבה יותר קלים מאשר החיים של מדענים. כל התופעות בעצם רועי צריך להתמודד עם עולם שלם של מגבלות בשביל שהמערכות האלו יוכלו לתפקד. יש חוסר איזון כימי ויש כל מיני דברים שמגיבים אחד לשני ולא מגיבים אחד לשני. אני בעצם צף במרחב אלגוריתמי חסר מגבלות לחלוטין וכל מה שאני יכול לדמיין אותו, "אני יכול להבין מה שאני יכול לבנות", זה לחלוטין תקף גם בתכנות. אז יש לי איזושהי פריווילגיה אדירה שאני בעצם פועל מבלי מגבלה בכלל. מצד שני, יש בזה בעיה מאד גדולה. אני צף במרחב אפשרויות בלתי מוגבל. מגבלות זה דבר חשוב מאד והרבה פעמים אני מגיע למצב שאני צריך לייצר לעצמי את המגבלות האלה. או מבחינה קונספטואלית או מבחינת אתגרים טכניים כדי שיהיה משהו שבכל זאת יכתיב את היצירה. שבכל זאת יכווין אותי לאיזושהי יצירה בעלת משמעות. אני חושב שבאמת מגבלת החומר היא ההבדל המהותי כאן וזה למעשה המדיום. מחשבים הם פשוט אפיק בשבילי לייצר את הדברים האלה ולעסוק בתהליכים. המחשב עצמו הוא לא הנושא, אלא יותר העולם המופשט שבתוכו אני עוסק.

פרופ' רועי בר זיו :

זה מאלף. אני רוצה להתחבר בדיוק לנקודה הזו שהיא גם מחברת וגם מראה את השוני. ואני אתייחס לפרויקט מסוים שאנחנו עובדים עליו במעבדה, שזה שחזור של פסי הרכבה של מכונה ביולוגית כמו הריבוזום. זה משהו שאנחנו עובדים עליו כבר מספר שנים, יש לנו עליו התפתחות משמעותית לאחרונה. וזה ממחיש את העובדה שזה משהו שאי אפשר לעשות על המחשב. אני אדגים, כלומר הריבוזום שעדה יונת קיבלה עליו את הפרס נובל, זה המכונה החשובה ביותר בתא. היא זו שמתרגמת את הקוד הגנטי לחלבונים בצורה אוניברסאלית והמכונה עצמה בנויה מחלבונים ומ-RNA. כלומר, היא מכונה שלא רק מייצרת את הרכיבים, את החלבונים בתא, כל החלבונים בתא, אלא גם את החלבונים שלה עצמה. הקוד הגנטי עובר שעתוק ותרגום גם למכונה עצמה. זאת אומרת, המכונות עסוקות בלשכפל את עצמן כל הזמן. זה חלק מהבסיס של החיים. עד לפני מספר שנים, זה היה כמעט Sienese fiction לחשוב שאפשר לשחזר כזה דבר מחוץ למעבדה, מחוץ לתא חי, ולנסות להעביר את זה למעבדה, לשחזר את זה. אנחנו עובדים על זה, ויש לנו התפתחות כאמור משמעותית.

זה משהו שאי אפשר יהיה לעשות על המחשב. כי עוד לא קיים מחשב דיגיטאלי שיודע לייצר מולקולות ביולוגיות. ואיש עוד לא יודע איך, איך זה קורה בתוך התא. צריך להיכנס פנימה ודמיין שאנחנו שוחים וצפים שם בתוך הסביבה המיניאטורית הזו, בין הקוד הגנטי המאד מאד סבוך ומורכב ועשיר, עם מכונות קיימות שעסוקות בלייצר חלקים חדשים, והחלקים האלה באופן אוטונומי ועצמי בתוך הבלגן והרעש והאי סדר הזה, עוברות הרכבה אוטונומית למשהו חדש שהוא גם פונקציונאלי בצורה אופטימאלית, וכל זה קורה מהר ויעיל מאד. זה משהו שעדיין לא יודעים לעשות על המחשב. כמו שמערכת החיסון שלנו יודעת לייצר תגובה למקרים שהיא חווה ולזכור את זה ולשמור את זה, וזה משהו שאנחנו יכולים לעשות כמו שימוש רק מחוץ למחשב. המולקולה הזו כמו נוגדנים זה משהו שמחוץ למחשב. זה האסנס של מערכת חיה. נכון שיש המון הקבלה בין החישוביות שאנחנו עושים במחשבים או במוח או בתאים או במערכת החיסון. יש, חייב להיות איזשהו אלמנט אוניברסאלי שקשור בחישוביות. זה ברור לגמרי וזה אני חושב החיפוש הגדול. השאלה הגדולה ביותר, כיצד לבצע חישוביות, כיצד הטבע מבצע חישוביות. שאנחנו היום יודעים לעשות, מקבלים את זה כמובן מאליו בסיליקון, בצ'יפים על מחשבים, לבין מה שהאבולוציה בנתה בצורה כל כך יעילה על פני מיליארדים של שנה, זה יהיה יומרני לבוא ולומר שאנחנו יכולים לחקות את זה בכמה עשרות שנים במבחנה. אבל אפשר לעשות צעדים מדודים לקראת הבנה של הקונספט הזה של חישוביות ואינפורמציה שמגולמת במערכת חיות. זה האתגר המשמעותי ביותר.

יבשם עזגד : זאת אומרת שיש פרנסה לעוד הרבה שנים.

פרופ' רועי בר זיו : Big time.

יבשם עזגד : טוב, רועי, איזה ילד היית? איך פתאום החלטת שאתה רוצה לעסוק במדע?

פרופ' רועי בר זיו : תראה, גדלתי בדרום, בבאר שבע, ככה בקצה של העיר. אני חושב שהייתי סקרן מאד.

ככה מדווחים גם ההורים שלי. הייתי סקרן מאד מטבעי כבר מגיל צעיר מאד. אני זוכר בגיל העשרה אני נמשכתי מאד לאסטרונומיה, מאיפה הגענו והקוסמוס. כל מה שיש שם בחלל, כמו הרבה מאד ילדים אחרים. כנראה שגם הייתי די טוב במתמטיקה ומדעים, אז זה די בחר בי. ולא חושב שהיו לי שום סימני שאלה בשום שלב של החיים שלי. זה פשוט הוביל אותי ככה שהמדע היה בתוכי מגיל צעיר מאד.

יבשם עזגד : כן. ליאור, הדרך שלך היתה ארוכה ומפותלת כפי שכתבו לנו ומקרטיני. אולי תספר לנו קצת עליה.

ליאור בן גיא : כן. אני חושב שאצלי בניגוד, לא נפסקו סימני השאלה. אולי היו לי רק סימני שאלה לאורך כל הדרך. אני חושב שתמיד מצאתי את עצמי, אני לא יכול להגיד ש, אני חושב שיש נטייה בארץ להגיד שיש ילדים ריאליים ויש ילדים אומנותיים או הומניים. ואני חושב שאף פעם לא מצאתי את עצמי אף פעם באף אחת מהקטגוריות האלה ותמיד תמיד איכשהו הרגשתי בין לבין. וזה אולי אפיין את הדרך המקצועית היחסית קצרה שלי עד עכשיו. אז הייתי סטודנט לאדריכלות ופרשתי מזה, וקצת סטודנט למחשבים. וככה ניסיתי כל מיני צורות. והאמת היא שהגעתי לתכנות מחשבים די בטעות, אני חייב להגיד. אבל בתוך הדבר הזה מצאתי איזושהי יכולת להתבטא. ואני חושב שהיום תפיסת העולם שלי היא הרבה יותר גמישה לגבי הנושא הזה של ריאלי והומני. אפשר

להגיד שאני בעצם אידיאולוגית מתנגד מאד חריף של התפיסה הזאת. אני אוהב להגיד שבין כל שני מקצועות יש עוד מקצוע, וזה גם כן איזשהו כלל רקורסיבי. לפי רמת הצפיפות.

יבשם עזגד :

ליאור בן גיא : כן. וזה נכון לגבי הרבה אנשים שאני פוגש, ויוצא לי ללמד הרבה אנשים בעיקר אמנים ומעצבים, ואפשר להגיד להכניס קצת, להפיל אותם לבור הזה של תכנות ולהראות להם שבהחלט אפשר לשלב בין היכולות. ויש דברים מאד מרגשים שאפשר למצוא על ידי דווקא שילוב של תכנות וכמו איך נקרא לזה, כן, אולי כישורים טכניים וכישורים יצירתיים. זה הרי לא נפרד. כולם יודעים שזה לא נפרד ובכל זאת, כשמערכת החינוך בכל העולם זה בעיה, מתעקשת להפריד ביניהם אז התפיסה שלי היא מאד לצאת כנגד זה.

פרופ' רועי בר זיו : יש לי שאלה לליאור, האם בתכנות של האומנות שאתה עושה, האם אתה משלב גם אלגוריתם של למידה מהסוג שהיום אנחנו יודעים-

ליאור בן גיא : ... learning.

פרופ' רועי בר זיו : כן.

ליאור בן גיא : זה בהחלט תחום שהוא מאד, אני אישית גם באופן קצת אידיאולוגי פחות מתעסק עם זה. אני השתמשתי בעבר באלגוריתמים גנטיים אבל גם הם, הם מונחים, גם כשאני עובד בדברים האלה, זה מונחה יותר אסתטי. זה יותר re-interactive evolution algorithms כשכלל המעבר יותר מונחה על ידי בן אדם ולא באופן אוטומטי שרץ בפני עצמו. אז אני די השתדלתי דווקא בכוונה להתרחק ממה שנקרא היום בינה מלאכותית. אבל בהחלט התחומים הם קשורים ואני עוסק בדברים שמשיקים.

פרופ' רועי בר זיו : היכולת ללמוד לפי דוגמאות שהיא חווה ולהגיע להיקשים על סמך הדוגמאות שהיא לומדת, זה משהו שלא, בילד אין במה שאתה בעצם עושה? מעבר לסלולאר... של תקשורת של דברים שהם דינמית מתקשרים ויש-

ליאור בן גיא : כן.

פרופ' רועי בר זיו : השתנות בזמן ובמרחב. היכולת ללמוד מניסיון זה משהו כל כך חשוב במערכות חיות. אם אתה עושה חיקוי של זה, האם זה לא משהו שאתה רואה שיכול להיכנס פנימה? אני למשל מחפש את הפריצה שתאפשר לי בצייפ המאד מאד פשוט שלי ביחס למערכת חיה, מה יהיה האלמנט הבסיסי ביותר של זיכרון ולמידה. נוכל להכניס את זה פנימה שהתאים יוכלו ללמוד מהזיכרון שלהם, זה משהו ש, מההתנסות שלהם. לצרוב את זה בזיכרון ולהשתמש בזה אחר כך זה יהיה קפיצה משמעותית לדעתי.

ליאור בן גיא : אני בהחלט רואה את זה נכנס פנימה. אני חושב שאני כל הזמן אולי עובד על השוליים של הדבר הזה. אפשר, היום למשל יש איזה הייפ עצום מסביב לרשתות נוירונים מלאכותיות. אני חושב שהעניין הוא שבינתיים, לפחות מה שמאפיין את עבודת הדוקטורט שלי, הרעיון שני לא בוחן סט נתונים ומנסה לבצע. לא אופטימיזציה לעבר פתרון מסוים ולא ניתוח של סט נתונים כזה או אחר. אלא הרשת עצמה היא הדבר שמעניין אותי לחקור ולכן העבודה שלי לפחות עד כה לא התמקדה בשימוש באלגוריתמים האלה, אלא בחיפוש אחר מבנים אלטרנטיביים שיכולים לקיים את אותה התנהגות.

פרופ' רועי בר זיו : כן. אני מבין.

יבשם עזגד : זה מוביל אותי לשאלה הבאה אליך רועי. יש יישומים כלשהם באופק מהעבודה

המחקרית הבסיסית שלך?

פרופ' רועי בר זיו : כן. זו שאלה מצוינת ואני מקבל אותה לא מעט לאחרונה. ובאמת בהתחלה זה היה מן משהו אני לא אגיד גיחוך, אבל קיבלתי לא מעט תגובות משונות על מה שאני עושה.

יבשם עזגד : בסגנון : "מה יוצא לנו מזה?"

פרופ' רועי בר זיו : מה יוצא לנו מזה ולמה זה טוב? ובשביל מה, זה כמו לקחת ריבוזומים או DNA ולשים על שבב, זה כמו לקחת אתה יודע מכונה סופר משוכללת, אני יודע מה, מכונית רולס-רויס ולשים אותה בסהרה. זה מן אנלוגיה. בשביל מה לעשות את זה? אין היגיון. זה לא אמור לעבוד שמה, אז בשביל מה לעשות את זה? ולאט לאט כשרואים שאנחנו מתחילים לייצר תהליכים יותר, לשחזר תהליכים יותר מורכבים, והרעיון הזה של רכיבים, בנייה של מערכת מורכבת בעזרת מספר רכיבים מינימאליים מתחיל לקרום עור וגידים, אז באו גם השאלות : "רגע, למה זה טוב?" וכשראו שאפשר להתחיל, שהחיבור לסיליקון מתחיל להיות טיפה יותר טבעי ויותר יש פה סיגנלים חשמליים ויש פה תופעות אקטיביות, אפשר לתכנת את המערכת. אז כמובן שמה שעומד מאחורי, שבאמת יום אחד השבבים האלה או הציפיים האלה יהיו מערכות ביולוגיות מלאכותיות. אני לא אקרא להן מערכות חיות, לפחות לא כרגע. עד שלא נשחזר את כל התכונה שמגדירה משהו חי, שזה נושא להרצאה בפני עצמה, מה זה משהו חי, אבל בגדול כן. אני חושב שאם אנחנו נצליח, היות ואנחנו עובדים בחומרים ביולוגיים בסופו של יום, אנחנו מייצרים חומרים ביולוגיים. אנחנו יכולים, הציפ שלנו יכול לקבל כאינפוטס דברים מהסביבה שהם לא ידועים. אנחנו יכולים לעשות חקירה של מה הציפ רואה, מה הוא חווה בסביבה שלו. ליצור תשובות שהציפ יודע, מתוכנת אליו, להגיב למקרים האלה בצורה של מולקולות חדשות שנוצרות לשמור זיכרון. אנחנו מנסים היום לבנות מערכת שהיא מזכירה קצת את מערכת החיסון. משהו שיועד לייצר תגובה לכל מצב. אני חושב שברגע שנצליח לעשות מערכות כאלה, לבנות מערכות כאלה, נוכל לייצר ציפיים שיש להם, הם טובים לדיאגנוסטיקה, לגילוי מוקדם, לאולי לחישה מ, שליטה מרחוק, אולי אפילו משהו שיכול להיכנס לתוך הגוף, לנטר מה קורה ואולי אפילו לייצר דימיון על פי מערכות בקרה, חומרים שישתחררו לתוך הגוף בצורה מבוקרת. זה לא מופרך לחשוב על דברים כאלה בעתיד. וכך הלאה זאת אומרת את השימושים ברפואה או בדיאגנוסטיקה רפואית וכולי קיימים, בצד גם אולי דברים מלאכותיים לגמרי כמו לשלוח דברים לחלל, שיהיה אוטונומיים שיגיבו לדברים שהם חווים שמה. כלומר, ברגע שהציפ יהיה יותר מתוכנת ויותר חכם ויותר מתקשר, אני מניח שייפתחו יותר אפשרויות לדברים האלה. יש יותר ויותר אנשים שנכנסים לזה. בהתחלה היינו לבד, עכשיו יש יותר ויותר אנשים ש-

יבשם עזגד : כמו תמיד.

פרופ' רועי בר זיו : כן. זה רק טוב.

ליאור בן גיא : אני רוצה רק להגיב לגבי הנושא הספציפי הזה ולהגיד שאני שומע מחקר כמו התחום שרועי עוסק בו, והראש שלי מתפוצץ מרוב אפשרויות.

פרופ' רועי בר זיו : בוא נדבר.

ליאור בן גיא : זה באמת מרגש אותי. והשאלה של מה השימוש של זה היא באמת, אני באמת זה קצת מכעיס אותי. זה כמו לשאול "מה הטעם בתינוק בן יומו?" הכל, הכל יכול לצאת מדברים כאלה. ולקרקע את זה לשימוש במושגים שאנחנו יכולים לתפוס אותם זה לעשות עוול מאד מאד כבד.

פרופ' רועי בר זיו : אתה צודק, אבל אנחנו לא נופלים למלכודת הזו מהטעם הפשוט, כי בתור מדענים אנחנו מקבלים את התמיכה שלנו מהציבור, וזכותו של הציבור לשאול את השאלה הזו ולומר "רגע, יש משהו שיוצא מכך?"  
יבשם עזגד : אולי בעתיד.

פרופ' רועי בר זיו : אולי בעתיד. אז באמת, מה שמניע אותנו כמדענים זה הסקרנות הבסיסית והרצון להגיע כמה שיותר רחוק או להמציא משהו או לפתח משהו שאי אפשר היה לעשות עד היום. זה כל אחד וה-

יבשם עזגד : שאלה של מה הוא החזון.

פרופ' רועי בר זיו : כן. אבל זה בסדר לשאול האם יש משהו, וגם את עצמנו, לשאול האם יש משהו שיכול להיות שימושי. אני שואל את עצמי את זה יום יום. ואני לא תמיד יודע את התשובה. ועוד לא הגעתי למשהו שוואו, זהו, אני יודע בדיוק. זה מתחיל להתכנס לשמה. אתה יודע לשחזר תהליכים שקשורים למשל בריבויזום, אתה יכול לחשוב על דברים רלוונטיים שקשורים באנטיביוטיקה וכך הלאה, אבל לעשות את הדברים הכל מחוץ לתא. היתרון הגדול של זה, שימושים אפרופו שבצד הנדסה גנטית בתוך תאים, אם אני יכול לעשות הנדסה גנטית חוץ תאית שאין בה שום תא חי. אני לא מסכן שום דבר, אין לי בעיות אתיות, אני לא פוגע בשום מערכת חיה. אני לגמרי מבוקר וברגע שהציפ מפסיק לפעול, הכל קורס ובזה זה נגמר. אין שום דבר, אני לא מייצר שום דבר שהוא מסוכן או מהווה איזשהו איום או שום שיקול אתי. ואני לא פוגע בשום דבר חי. יש לזה יתרון. אם נצליח לעשות התקנים עם שימושים, זה מצוין. אני אשמח. אז אין ציניות בעניין, אנחנו ממשיכים לחקור וחושבים על העתיד עם החזון שלנו, וגם מקבלים את השאלות האלה בהבנה, זה בסדר.

יבשם עזגד : ליאור, איפה אתה רואה את עצמך ואת היצירה שלך בעוד עשר שנים מהיום?

ליאור בן גיא : אני חושב שיש לזה שני מובנים. במובן האישי הייתי, אני חושב שיש לי שאיפות כאלה ואחרות מקצועיות ולהתמקם במקום שאני יכול לחקור ללא, ללא הרבה מגבלות. לאפשר איזשהו קשר בין מדענים או בין אמנים אחרים או בין יוצרים לבין הציבור באמצעות הכלי הזה של הדמיה או לחקור תופעות חדשות. אבל זאת אולי התשובה הקצת פחות מעניינת בעיני של איפה אני אישית אהיה, ואיזה תפקיד אני אשא ומה יהיה התקציב שלי. אני חושב שהשאלה היותר גבוהה, המובן המעניין ביותר זה במהות העשייה עצמה. ושם יש איזה תשובה אני חושב צנועה יותר של עושה בדיוק את אותו דבר. חוקר ומחפש את הדברים האלה. אני חושב שאולי במובן מסוים אני עכשיו בעבודת הדוקטורט שלי וביליתי 3.5 שנים עכשיו ב, אפשר להגיד שדוקטורט זה בור ללא תחתית, או לפחות ככה תפסתי אותו במשך הרבה זמן. זה בור, אפשר לצנוח בו לנצח. ואני במשך הרבה זמן חיכיתי. פשוט לא חיכיתי כלומר, עבדתי מאד קשה כדי להגיע לתחתית, כדי להבין את הדבר הקסום הזה שחיפשתי. ואני היום מבין הרבה

יותר טוב שאתה לא אמור להגיע לתחתית, אתה אמור לתאר את הנפילה. אז ככה שגם עוד עשר שנים אני חושב, אני פשוט רוצה להמשיך לתאר את הנפילה.

כלומר, חלום הוא להמשיך את החלום שאני חי בו עכשיו. יבשם עזגד :

אפשר להגיד. כן. מבחינה אידיאולוגית כן, אני חושב שזה להילחם בתחנת רוח ואין סוף לדבר הזה. פשוט להמשיך לחפש. החיפוש הוא העיקר. ליאור בן גיא :

כן. איך אתם שניכם רואים את הקשר בין מדע לאומנות? יבשם עזגד :

א' אני חושב שליאור הצביע על כך כבר בתחילת הפודקאסט שבו הראייה הויזואלית, פרופ' רועי בר זיו :

הויזואליזציה של התהליכים האלה, יש לו רכיב מאד מאד חשוב. מערך הטבע הוא רבגוני עם צבעים וצלילים וריחות וכך הלאה. ואני חושב שיש בעבודות של שנינו יש את הרכיב הזה של אסתטיקה. אני, כשאני רואה את הציפ, כשאני רואה את התגובות קורות בזמן ובמרחב, האסתטיקה קופצת לי החוצה. הסדר. אני מחפש תבניות, אני רואה אותם מיד. זה החיפוש. ובאמת החיבור עבורי טבעי. אני גם אוהב אומנות ומוזיקה. והתבניות האלה נמצאות אצלי בראש כל הזמן. אני רואה את המערכת הזו כמערכת שהיא ניסויית. ואם יום אחד נגיע למערכות שהן אוטונומיות, שהן יודעות לקבל החלטות בסביבה רועשת ומשתנה, אני אהיה מאושר. בדרך, כל יום זה לחצוב בקיר עוד קצת ועוד קצת, ואם אני לא בקבוצה המדהימה שעובדת איתי, אנחנו לא נהנים מזה, אין טעם להמשיך. כלומר, החיפוש פה הוא לב העניין. אני מסכים עם ליאור. החיפוש והעבודה היומיומית של לנסות להגיע עוד קצת ועוד קצת, ולהרחיק את הגבול עוד יותר, ובדרך ליהנות מזה, זה לב העניין. זה מה שגורם לי לקום כל בוקר ולרוץ למעבדה ולראות מה החבר'ה במעבדה עושים.

הייתי אומר שהקשר, גם קצת הזכרתי, אפשר לציין את זה כשני תחומים שבעצם יש תחום אפור רחב שביניהם והייתי מעודד אנשים לא לתפוס אותנו כדברים נפרדים אלא כספקטרום נרחב של עשייה. ואולי גם אפשר לתאר אותם בתור שני דברים שיש איזושהי תנודתיות ביניהם. אני חושב שהמדע והאומנות מזינים אחד את השני והם עשו את זה לאורך ההיסטוריה.

הם סוג של השלמה. יבשם עזגד :

כן, בהחלט. לא חסרים מדענים ואמנים היסטוריים, אנשי רנסנס למיניהם. ולא ליאור בן גיא :

חסרות דוגמאות להתפתחויות במדע שהזינו, שהובילו לשינויים מרחיקי לכת באומנות וכן להפך. יש לי דוגמא טובה באמת, היא נוגעת להמצאה של שפורפרת המתכת שמישהו המציא שפורפרת מתכת, אבל פתאום קרה מצב שזה החליף, שארזו בתוכם צבעי שמן וזה החליף את מה שהיה עד עכשיו שאני חושב שזה היה שקי עור או משהו כזה. אבל ההתפתחות הדי לכאורה טריוויאלית הזאת אפשרה לאמנים באירופה לצאת מהסטודיו שלהם ולתאר את העולם. וזה הניב את התנועה האימפרסיוניסטית קוראים לזה, זה הוביל תנועה אימפרסיוניסטית. היא בעצמה הלכה והיו לה הרבה מאד השלכות על התרבות שלנו. ככה שמאד קשה לצפות ולשים אצבע על איזושהי קווים ברורים של הדברים האלה. יש פשוט גם איזה אי יציבות כימית בתרבות האנושית וזה שני היבטים מאד חזקים שלה.

יבשם עזגד : לקראת סיום, בואו נעשה איזה ניסוי קטן. מכיוון ששניכם עוסקים בגורמים, בתופעות הבסיסיות ביותר של החיים. אולי כל אחד מכם ינסה להשלים את המשפט "החיים הם-" ליאור, החיים הם?

ליאור בן גיא : הייתי אומר שהחיים הם פועל. החיים הם לא תחום נע או תיאור או שם עצם, החיים הם, זה בעצמה, זה מילת פועל. זה דבר שדברים מסוימים יכולים לבצע אותו או לא לבצע אותו או הייתי מעודד או אני בעצמי מנסה לקדם תפיסת עולם שלפיה החיים זה דבר שאפשר יותר או פחות לעשות אותו. אני חושב גם במדע אין הגדרה ברורה על ההגדרה הזאת של החיים. כמו שרועי אמר אפשר לקיים לא רק הרצאה אני חושב, עשור של הרצאות לגבי ההגדרה הזאת. והשאיפה שלי היא לגבש תפיסת עולם או אני עוסק לגבש תפיסת עולם שלפיה אין טעם כל כך להגדיר מה הם החיים. אני חושב שמה שיותר מעניין זה להרחיב את המושג הזה או לחקור מה נמצא בקצה שלו. הייתי חושב שזה גם משהו שאפשר להגיד די משותף לעבודה של שנינו, והייתי מעודד אנשים לעשות את זה בצורה רחבה יותר. אני חושב שבעיני עיר למשל זה דבר חי לכל עניין ודבר. מקיימת הרבה מהמאפיינים שנוהגים לייחס לתאים או למערכות גדולות יותר. זה מתקיים בכל מיני קנה מידה, בכל מיני היבטים והרחבה של המושג הזה זה דבר שלדעתי דורש עוד, בהחלט צריך וכדאי לעשות אותו יותר.

יבשם עזגד : רואי, החיים הם?  
פרופ' רועי בר זיו : החיים הם חידה גדולה אחת. חיפוש מתמיד. כמדען, החיים הם אתגר אדיר. לנסות להבין איך תופסים את התמצית של משהו שהוא חי בתנאים מבוקרים. כמו שהגדרתי לעצמי לפני הרבה שנים בתורה צנועה מאד, לנסות להבין משהו דרך הרכבה ובניה. חידה ענקית, חיפוש מתמיד.

יבשם עזגד : ליאור בן גיא, פרופ' רועי בר זיו, תודה רבה לכם על השיחה המרתקת הזאת.  
פרופ' רועי בר זיו : תודה רבה.  
ליאור בן גיא : תודה רבה.

יבשם עזגד : עד כאן להפעם. דברו איתנו דרך הפייסבוק או הטוויטר של מכון ויצמן למדע. אני יבשם עזגד. תודה לעומר סנש ולעידו קינן על ההפקה. נשתמע בפעם הבאה.