

חוקר המוח שגורם לאנשים לראות בעזרת צלילים ולשמוע בעזרת מישוש

מחקריו של פרופ' אמיר עמדי מציתים את הדמיון, במובן הכי מילולי של הביטוי. ראיון

דני בר-און 22.10.2020 12:55

לאיזו מהצורות הבאות, לדעתך, קוראים "קיקי" ולאילו "בובה"?

מי שהגיע למסקנה שדווקא לצורה הימנית קוראים "בובה" ולשמאלית "קיקי" לא לבד: כך עונים בערך תשעה מכל עשרה אנשים. התופעה, שגילה הפסיכולוג וולפגנג קוהלר, נחקרת כבר קרוב ל-100 שנה אך עדיין לא התבררה עד תום. למה דווקא זו בובה וזו קיקי? מה הקשר בין צורה לצליל?

אחד ההסברים המקובלים לתופעה הוא שכאשר אומרים "בובה", הפה נע בצורה מעוגלת יותר מאשר כשהגים "קיקי". כלומר, ההתאמה האינטואיטיבית בין צורה לצבע נובעת ממערכת הקשרים במוח בין החלק שחש בתנועת הפה והלשון, ובין החלק הוויזואלי, שרואה את הצורות. מבחינת פרופ' אמיר עמדי, ראש מכון ברוך איבצ'ר למוח, קוגניציה וטכנולוגיה בבית הספר לפסיכולוגיה במרכז הבינתחומי הרצליה, זו המחשה פשוטה לתופעה מסובכת בהרבה שהוא חוקר משלל היבטים לאורך כל הקריירה: הקשר העמוק, המסתורי והמסועף בין החושים.

עמדי הוא מחוקרי המוח הבולטים בארץ ובעל שם עולמי בתחום. ההשלכות של עבודתו הן מעל ומעבר לכל דמיון. במחקריו הוא הצליח לגרום לעיוורים לראות באמצעות צלילים ולמתקשים בשמיעה — לשמוע דרך האצבעות. במעבדתו בודקים כיצד אפשר להשתמש בדלתות הסתרים שנמצאות בין החושים כדי לשקם אנשים שמוחם נפגע משבץ או תאונה, ומנגד חוקרים גם דרכים להעצמת היכולות של אנשים בריאים. למשל, הם מפתחים טכנולוגיות שיאפשרו לאנשים שמתקשים להתרכז לשקוע במדיטציה, וליהנות מהיתרונות הפסיכולוגיים העצומים שלה. בעוד יום שגרתי במעבדה של עמדי, עמלים על רתימת החושים הקיימים ליצירתם של חושי-על, למשל: לראות חום כמו נחש ולהבחין בחפצים מבעד לוויילון כמו סופרמן. בימים אלה יש לעמדי מטרה נוספת, שאפתנית אפילו יותר: לזהות את המקומות שבהם מתחברים הגוף והנפש במוח. רוב הממצאים שיש לו בנושא הזה טרם פורסמו, והם בעיניו "קצות חוט משמעותיים" לפתרונה של הבעיה שמעסיקה את האנושות זה עידן ועידנים.

אף על פי שמאחוריו כמאה מאמרים בנושאים מגוונים בחקר המוח, עמדי מזוהה בעיקר עם פיתוחה של מערכת הראייה לעיוורים EyeMusic (העין המוזיקלית). בשנים האחרונות המערכת הזאת השתכללה מאוד, וכעת עיוור מאומן יכול "לשמוע" באמצעותה תמונה של 1,500 פיקסלים בשנייה אחת של מוזיקה. עמדי מציין בגאווה שרזולוציה כזו מאפשרת אפילו לזהות את פניו של אדם מסוים. במעבדתו, הוא הצליח לגרום לעיוורים להיעזר בעין המוזיקלית כדי לבצע משימות מורכבות שמצריכות זיהוי צבעים ותנועה במרחב תלת-ממדי, כמו שליפת תפוח אדום מקערה של תפוחים ירוקים. אחת הסיבות שבגללן הוא בוחר כעת להתראיין לראשונה באופן נרחב, היא רצונו להשתחרר קצת מהדימוי של "זה שגורם לעיוורים לראות דרך האוזניים". העין המוזיקלית היא כלי חשוב, אבל חשובות לא

פחות הן התגליות שנחשפו באמצעותו, לפניו ואחריו, על טבעו של המוח האנושי. לפי התיאוריה של עמדי, המוח בנוי לגמרי אחרת ממה שחשבנו עד כה, החומות שהקמנו בין החושים הן מלאכותיות, פריכות הרבה יותר ממה שדימינו, ואפשר להשתמש בכך כדי להגמיש מוחות שלכאורה כבר התמצקו לגמרי. סקירה נרחבת שפירסם עם עמיתתו ד"ר בנדטה הימלר בחודש שעבר בכתב העת "Neuroscience and Biobehavioral Reviews" מתמצתת 20 שנות מחקר: "גמישות המוח אמנם יורדת עם הגיל, אבל ניתן להצית אותה מחדש".

המחקרים של עמדי ועמיתיו מורכבים מאוד, מסועפים וקשים להבנה. אבל מצד שני, וזה אולי הדבר המושך והמקסים ביותר בעבודה שלו, יש בה משהו אינטואיטיבי וקל לתפיסה, כי היא נוגעת ישירות בחושים. לכל אדם יש חושים, וכל אחד חש שהם מחוברים באופן עמוק מאוד זה לזה. במובן מסוים, עמדי ועמיתיו נותנים שם וצורה למה שכולנו מרגישים.

מה לעזאזל האזור הזה עושה?

עמדי, בן 47, נשוי לענבל, וטרינרית וחוקרת מוח, ואב לשתיים, בנות 10 ו-7. הוא נולד בשכונת הכורדים בירושלים, אח בכור מתוך שלושה. בשנות חייו הראשונות הוא גר עם הוריו ודודיו בבית צפוף שבנה סבו במו ידיו לאחר שעלה לארץ ברגל מכורדיסטן. לאחר מכן עברו למעברה ("ואדי האסבסטונים" שנמצא סמוך לקניון מלחה של היום) ומשם לעיר גנים, שהוא מכנה בחיבה "שכונת הפשע הראשית בירושלים אז". אביו הוא נהג אגד, ואמו עקרת בית. הוא למד בבית ספר קשה ואלים. "היה לי סיפור אחד מצחיק", מספר עמדי, פתיחה טיפוסית של סיפורים שהם לא בהכרח מצחיקים: כשבא לבקר בשכונה אחרי השחרור מהצבא, הוא פגש במקרה את מי שהיה חברו הטוב ביותר כילד. "התחבקנו ודיברנו. שבוע אחרי זה אני פותח את 'כל העיר' ורואה את התמונה שלו כמי שנתפס בשוד של מכונית הכסף של מאפיית אנג'ל. מישהו אחר שגדל איתנו קיבל סכין בלב במכולת. זו היתה שכונה קשוחה".

הוא משבח את הוריו על כך שלמרות הצמצום הכלכלי, מעולם לא חסכו על חינוך. חבל ההצלה שלו היה תוכנית המחוננים "אופק", ששלפה אותו מדי שבוע, החל בכיתה ג', ליום אחד של הרחבת אופקים במוזיאון הטבע. "זו היתה חוויה מדהימה", הוא נזכר בחיך, "הלימודים היו מאוד מגוונים, ממתטיקה ועד ציור. ממש לונה פארק של תשוקה טהורה לידע, באווירה מאוד ידידותית". בכיתה ז' הוא התקבל לתיכון היוקרתי ליד האוניברסיטה, ואחרי שהתגבר על השוק התרבותי העמוק ("תיקנו לי את העברית"), דרכו לאקדמיה היתה סלולה.

השאלה היחידה היתה מה ללמוד באקדמיה. עמדי בן ה-20 וקצת, נגן סקסופון נלהב, נקרע בין תואר באקדמיה למוזיקה לבין תואר בביוכימיה באוניברסיטה העברית, ובסופו של דבר החליט לעשות את שניהם במקביל, בימים מתזז בין הבניינים ברחבי הקמפוס בגבעת רם ובלילות מתפרנס כקצין ביטחון במוזיאון ישראל. במהלך התואר הראשון התגלגל די במקרה, בעקבות מישהי שחיזר אחריה, ללימודי חקר המוח. הכימיה בינו לבין התחום נוצרה מהר: תוך שבועיים החלום הקודם להיות ביולוג ימי עף מהחלון ואחריו גם הסקסופון, ברגע של התפכחות כואבת בפסטיבל הג'אז באילת: "הבנתי שלא משנה כמה אתאמן, אין לי את זה".

עמדי החל ללמוד בתוכנית ישירה לדוקטורט בחישוביות עצבית. כבר בשלבים הראשונים של היכרותו עם חקר המוח, הוא חש שהתחום סובל מפיצול לא טבעי בין שדות הידע. לא רק שהיבטים שונים של המוח נחקרים על ידי מדענים שונים — ביולוגים, פסיכולוגים, רופאים, בלשנים; אלא שאפילו

נירוביולוגים שחוקרים באופן ספציפי את פעילות החושים במוח מתמקדים כל אחד בחוש אחר. "נוכחתי שחוקרי הראייה, למשל, חוקרים רק את קליפת המוח הראייתית", הוא אומר. "הם פוגשים רק זה את זה בכנסים. כך גם חוקרי השמיעה: יש כאלה שחוקרים מוזיקה, אחרים חוקרים שפה, אבל כולם עוסקים רק בשמיעה. וכך הלאה".

שורשי הגישה הזאת הם בראשית חקר המוח, כאשר המדענים ניגשו אל תכולת הגולגולת כשם שניגשו אל הבטן. אחרי שהם הבינו מה הכליות עושות, מה הקיבה עושה ומה הכבד, הם קיוו שגם המוח בנוי ממעין איברי משנה, שלכל אחד מהם יש תפקיד ברור ומוגדר. רק בשלב מאוחר יותר, בזכות מדענים רבים ובהם עמדי, התברר שהגבולות שהוגדרו בין אזורי המוח השונים נוחים אולי לשם הסיווג, אבל הם מסוויים מורכבות ורב-תכליתיות שהולכות ונחשפות. שחייה, אוכל, טיולים, סקס. אין כמעט חוויה אנושית שאינה רב-חושית. מדוע לחקור כל חוש בנפרד? "כסטודנט, ניסיתי לחשוב על כל החוויות שחשובות לי בחיים", אומר עמדי, "ולא הצלחתי לחשוב על אף אחת שלא מערבת כמה חושים במקביל".

בעבודת הדוקטורט חקר עמדי אזור מסוים בקליפת הראייה במוח. האזור, שנמצא באחורי הראש, תופס כ-30% מקליפת המוח (קורטקס). מומחי הראייה עוסקים כבר שנים בחקר הטריטוריה העצומה והמפותלת הזאת, ובמחקרים קלאסיים ודקדקניים נחשפו בזה אחר זה תתי-האזורים בה. יש אזור שבו מיוצגת התמונה שמתקבלת מהעין במעין מסך פנימי, פיקסל אחרי פיקסל; יש אזור שמייוחד לזיהוי פרצופים, אחר מזהה תנועות גוף (אבל לא פרצופים) ואחד נוסף מתמחה בזיהוי צורתן של אותיות. עמדי ביקש לחקור תת-אזור מסוים בקורטקס הראייתי שנקרא LOC (Lateral Occipital Complex), אזור שהתגלה על ידי המנחה שלו בדוקטורט, פרופ' רפאל מלאך ממכון ויצמן.

LOC עוסק בזיהוי אובייקטים ספציפיים, למשל פחית קולה. הוא פעיל הרבה פחות כשצריך לזהות באמצעות העיניים עצם אבסטרקטי יותר (למשל: בד משי). עמדי רצה לדעת מה קורה במוח כשאדם נדרש לזהות את הפחית, אבל לא באמצעות חוש הראייה. "בתקופה ההיא הייתי עושה טרקים", הוא נזכר, "כשלא היה לי פנס, הייתי מזהה חפצים באוהל בחוש המישוש. אמרתי לעצמי — רגע, האם יש לי אזור דומה ל-LOC באזור של חוש המישוש במוח? חיפשתי על זה בספרות המדעית ולא מצאתי כלום". זה היה בסוף המאה שעברה, ימי אנו-באנו של חקר המוח באמצעות המכשיר החדש להדמיה תפקודית fMRI, שמציג ברזולוציה גבוהה ובזמן אמת את הפעילות במוח; עמדי קיווה למצוא בקליפת המישוש את האזור שעוסק בזיהוי חפצים, ולתקוע שם דגל קטן. כלומר: לאתר את המקבילה של התגלית של המנחה שלו, רק בחוש אחר.

עמדי הלך לחנות צעצועים, קנה כל מיני חפצים שלא מכילים מתכת (אי אפשר להיכנס ל-fMRI עם חפצי מתכת בגלל המגנט רב העוצמה שבתוכו), הכניס את עצמו למכשיר ההדמיה והתחיל למשש. הוא ראה פעילות מוחית באזור המגע, שלא היתה מפתיעה במיוחד. אבל הפעילות החזקה ביותר היתה דווקא בתת אזור מסוים ב-LOC, כלומר במקום שלכאורה היה אמור לפעול אך ורק בתגובה לראייה. "זה העיף אותי", אומר עמדי, "כי זה התחיל להיות מין חידה בלשית. למה נדלק האזור הזה, שלא אמור להיות קשור למגע בכלל?" הוא המשיך לחקור. בין היתר הוא בדק מה קורה שם כשנבדקים נדרשים לזהות אובייקט באמצעות הצליל שלו, למשל: פטיש באמצעות צליל של פטיש. מתברר שהוא לא נדלק; ההסבר לכך הוא שהמוח לא צריך לעבור דרך הצורה כדי לזהות משמיעה. "שמעתם נביחה מחוץ לחלון", מדגים עמדי, "האם תצטרכו להעלות בעיני רוחכם את צורתו של כלב כדי להבין שזה כלב?"

בהמשך עמדי נתן לעיוורים מלידה לזהות אובייקטים באמצעות מישוש והאזור המסוים הזה בתוך LOC, שזכה בינתיים לשם (Lateral Occipital tactile-visual) LOtv, נדלק באופן מובהק. "החידה הסתבכה", הוא אומר. "מה לעזאזל האזור הזה עושה?" כשלעצמה, התגלית הזאת מרתקת. היא עוד סדק בחומה של הגישה המקובלת, שלפיה קליפת המוח מחולקת לאזורים נפרדים, כל אזור והחוש שלו. "עד היום זה מה שכתוב בספרי הלימוד", אומר עמדי. אבל בהמשך התברר שלגילוי הזה יש משמעות עמוקה יותר. כמה שנים לאחר מכן, כשחזר מפוסט־דוקטורט בהרווארד לאוניברסיטה העברית, עמדי רצה לדעת מה עוד מפעיל את האזור הזה. זו שאלה חשובה כי התשובה עליה נוגעת בליבתה של סוגיה קריטית בחקר המוח: מידת הגמישות שלו.

רוב המדענים כיום מסכימים שבגיל הרך המוח גמיש מאוד, אך לאחר מכן הוא מתקשח, ננעל, ואפשרויות רבות שהיו פתוחות בו נסגרות. בעקבות מחקריהם של חתני פרס הנובל דייוויד הובל וטורסטן ויזל, למשל, התברר למה בשנים הראשונות לחיים ישנה תקופה קריטית שבה ניתן לגרות את אזור הראייה במוח. זו הסיבה לכך שנעשים מאמצים גדולים לגלות ולתקן עין עצלה אצל תינוקות: מצב של עין עצלה נוצר כאשר מסיבה כלשהי (למשל, פזילה) המוח לא מקבל תמונות תקינות משתי העיניים, שניתן לשלב ביניהן כדי ליהנות מראייה תלת־ממדית. במצב כזה, המוח בוחר בתמונה שמתקבלת מאחת מהעיניים ומתעלם מהשנייה. כתוצאה מכך, אזור הראייה במוח לא מתפתח כראוי ונוצר נזק שהוא בדרך כלל בלתי־הפיך. למבוגר, לעומת זאת, אפשר לסגור עין אחת לחודש, ולא יקרה לו כלום.

כיוון שעיוורים מלידה לא מפעילים בכלל את הראייה מראשית חייהם, אזור הראייה שלהם אמור להיות די מנוון. זו אחת הסיבות לכך שעמדי התפלא לגלות פעילות באזור הזה במוחם כשהם מיששו חפצים. אבל אפשר לטעון שזה סתם פוקס. נגיד שבמקרה האזור המסוים הזה במוח מופעל גם במישוש. זה אמנם סותר כמה הנחות מקובלות, אבל אפשר לראות בזה מעין יוצא דופן. עמדי רצה להוכיח שה-LOtv שלו לא קשור בכלל למישוש, לראייה או לכל חוש מסוים אחר. הוא רצה להתעלות למישור הרבה יותר אבסטרקטי, ולהוכיח שהאזור הזה במוח נמצא אמנם במה שמכונה הקורטקס הראייתי, אבל הפונקציה שהוא ממלא היא הרבה יותר מופשטת: בנייתה של צורה תלת־ממדית, בלי שום קשר לשאלה מאיזה חוש נכנס הקלט שעל בסיסו נבנית הצורה הזאת.

הדרך המזוקקת ביותר להוכיח את הטענה הזאת, היא למצוא שיטה לגרום לאדם לקלוט צורה תלת־ממדית של אובייקט באמצעות טכנולוגיה שהוא — או אף אדם אחר — לא ניסה מעולם קודם לכן. למשל: אם תצליח לאמן אדם לראות בתלת־ממד באמצעות מוזיקה בלבד, מיומנות שהאבולוציה בהחלט לא הכשירה אותו אליה (כי הוא לא חולד), ותראה שבהדרגה אתה מצליח להדליק אצלו את האזור הזה במוח, תדגים את מהותו של האזור שגילית, ובאותה נשימה תאשש את הטענה שהמוח גמיש הרבה יותר ממה שהמדע חשב. זה מה שעמדי וצוותו עשו.

הבא בתור הוא סוס

כיצד רואים באמצעות צלילים? במחקריו, הרחיב עמדי ופיתח את עבודתם של קודמיו, בהם פול באך־א־ריטה (Bach-y-Rita) מאוניברסיטת וויסקונסין, מאבות החקר של הגמישות המוחית. השיטה, במובן מסוים, פשוטה: להמיר את הקלט שמתאים לחוש פגוע לקלט שזמין לחוש אחר. במונחים של אבטחת מחשבים אפשר לקרוא לזה hacking (פריצה) — שימוש בחוש לא תקין, באמצעות כניסה אחורית אליו דרך חוש תקין.

זו בעצם סינסתזיה, לא?

"עירוב החושים שקורה בסינסתזיה הוא ספונטני", מסביר עמדי. "סינסתזיה היא החלום הרטוב שלנו כחוקרי התמרה חושית, והיא הרבה יותר נפוצה ממה שחושבים. בעולם מסתובבים מיליוני אנשים שנוטים לסינסתזיה, לרבים מהם אין מושג שהחוויה שלהם שונה מזו של שאר האנושות (ראו הרחבה). אבל — וזה אבל חשוב — החיבור אצלם הוא בלתי-נשלט, אקראי ושרירותי. מה שאנחנו מנסים ליצור זה משהו מסודר, שלא יתאים רק למספר מוצמצם ומוגבל מאוד של טריגרים". במילים אחרות, הטכנולוגיה של עמדי משחררת את הסוס הפראי של הסינסתזיה ששוכן במוח האדם, ובמקביל מאפשרת לו לאלף אותו לצרכיו.

במחקריו אימן עמדי עיוורים מלידה לייצג תמונה במוח באמצעות צלילים. צלילים גבוהים מייצגים את החלק העליון של התמונה; צלילים נמוכים — את החלק הנמוך. ככל שהצליל חזק יותר באוזן ימין, הוא מייצג את צד ימין בתמונה ולהפך. כך, למשל, מנגינה שמתחילה גבוה ובאוזן שמאל ומסתיימת נמוך באוזן ימין, מייצגת קו אלכסוני שיורד משמאל לימין. מנגינה שמתחילה גבוה באוזן ימין ומסתיימת נמוך באוזן שמאל, מייצגת קו אלכסוני שיורד מימין לשמאל. אם אנגן את שתי המנגינות במקביל, יתקבלו שני קווים אלכסוניים שחוצים זה את זה באמצע — כעת קראתם באמצעות אוזניכם את האות הלטינית X.

אפרופו סוסים, קירות המעבדה של עמדי בבינתחומי מעוטרים בכמה פוסטרים שנראים בהם שני סוסים, מזכרת מאחד הפרסומים שלו בנושא הזה, בכתב העת החשוב *Nature Neuroscience*. מימין מופיע ציור רגיל של סוס, הקלט שקיבלה העין המוזיקלית. משמאל מופיע הפלט: מין סוס רפאים שנוצר מחיבור של כל הנקודות שמייצגים הצלילים ששמעו הנבדקים. זו דמות קצת יותר מעורפלת, מעט מטושטשת בקצוות, בגוני שחור-לבן, אבל סוס ללא ספק. הנבדקים העיוורים זיהו אותו ללא קושי.

בסדרת מחקרים שהתפרסמה בשנים האחרונות במיטב הז'ורנלים בתחום חקר המוח, הראו עמדי ועמיתיו שכאשר לוקחים אדם, עיוור או רואה שעניו מכוסות, ומשמיעים לו מנגינות ויזואליות, בתחילה לא נדלק אצלו כלום בקליפת הראייה. רק לאחר אימון מתחילים האזורים לפעול בהתאם למשימה — אם תנגן לו פרצופים, יפעל אזור הפרצופים; אם תנגן לו צורה של אותיות, יפעל אזור האותיות; ואם תנגן לו עצמים, יפעל אזור העצמים. "אימנו על המערכת כ-20 עיוורים מלידה ועוד עשרות או מאות אנשים שהתעוורו בגיל מאוחר ואנשים רואים שענייהם מכוסות", אומר עמדי. "נוכחנו שהיכולת לתרגם צליל לתמונה היא אוניברסלית. לא היה לנו אף נבדק, רואה או עיוור, שלא הצליח ללמוד את האלגוריתם ולתרגם צלילים לייצוג ראייתי. לא משנה אם ראית בעבר או לא ואם יש לך רקע מוזיקלי — כל אחד יכול ללמוד את זה. אפשר לתכנת את המוח מחדש, אפשר להפוך אותך לעטלף או לדולפין תוך 10 או 40 שעות".

פיתוח המכשיר התאפשר גם בזכות קריירת הג'אז הקצרה והסוערת של עמדי. "זה סייע לי לפתור את האתגר הגדול ביותר בהתמרה מראייה לשמיעה — העובדה שאנו משמיעים המון צלילים בבת אחת", הוא אומר. "דמיין לחיצה אקראית על יותר משלושה קלידי פסנתר... להצליח ש-15-20 צלילים יישמעו טוב ביחד זה אתגר אפילו למלחינים, אבל לנו אין את הפריבילגיה הזאת". המערכת מנגנת אוטומטית לפי התמונה — לא לפי בחירה אסתטית כזו או אחרת. לכן נבחר עבור המערכת הסולם הפנטטוני. "זה הסולם שמהווה את הבסיס לג'אז, הרוק, הפאנק והסול", אומר עמדי, "כל שילוב צלילים בו נשמע לכל הפחות סביר". הגישה של עמדי למוזיקה איפשרה לו גם להפוך את המערכת

שלו לצבעוניות, בזכות הכנסתם של כלי נגינה שכל אחד מהם מייצג גוון אחר. חצוצרה, למשל, היא כחול, וכינור הוא צהוב.

מה בדיוק חווים עיוורים מלידה ש"רואים" כך לראשונה? "אני לא יודע מה הם חווים כי אין להם את השפה שלנו; אתה מדבר איתם ולא יודע איך לשאול את זה בכלל", אומר עמדי על העיוורים שמתנדבים להשתתף בניסויים שלו, שאת הקשר החם איתם הוא מטפח לאורך הקריירה. על החוויה קל יותר ללמוד ממי שהתעוררו כמבוגרים: בימים אלה הוא כותב מאמר על אדם שראה כל חייו והתעורר לגמרי לפני 20 שנה. "הוא מדווח שבשעות הראשונות של האימון עם המערכת, הוא רק שומע", אומר עמדי. "אבל אחרי 20–30 שעות אימון הוא מתאר שהוא מרגיש שאזור שישי המון זמן במוח שלו מתעורר, והוא מתחיל לראות תמונות". עמדי חושב שאם עיוור מלידה ישתמש במערכת שלו זמן רב, למשל שנתיים, עם הזמן תתגבש אצלו חוויה שדומה לראייה אצל אדם בריא. בפנטזיה שלו, שכמובן קשה קצת לממש, הוא היה רוצה לתת לתינוק שנולד עיוור להתאמן במערכת בקביעות. האם תינוק כזה יחווה ראייה? השאלה הזאת, בינתיים, נשארת בתחום התיאוריה, כמו שאלות רבות אחרות לגבי העין המוזיקלית. בינתיים המערכת נידונה להישאר בין כותלי המעבדה בלבד, כי שימוש יומיומי בה עלול להיות גם מסוכן. הפיכת המערכת הזאת למכשיר שימושי היא תהליך מורכב מאוד שכרוך ברגולציה מסובכת: "תאר לך שעיוור הולך ברחוב עם המערכת שלך ונופל — אתה בצרות. אבל זה יקרה מתישהו".

הקושי להפוך את העין המוזיקלית למכשיר שימושי שעוזר לאנשים בעולם האמיתי דחף את עמדי לכיוון אחר, שהוא עוסק בו בימים אלה: פיתוח מעין מכשיר שמיעה שעובד באמצעות הרטטת האצבעות. המחקר בתחום הזה פשוט יותר, האימון של הנבדקים קצר יותר, ואין חשש שמישהו ייכנס בגללך בעמוד או יירד בטעות לכביש. הרעיון הוא להעצים את יכולת השמיעה אצל חירשים באמצעות חוש המישוש: כיום מקובל להשתיל אצל כבדי שמיעה שתל קוקליארי (שבולולי), שמשפר את יכולת השמיעה, אבל לוקה בחסר בתנאים קשים. עמדי מסביר שאדם עם שתל יכול להסתדר בסביבה שקטה, אבל ברחוב הוא יסתבך, במיוחד אם מי שמדבר אליו עוטה מסיכה כירורגית. הקושי להבין מה שנאמר מבעד למסיכה הוא דוגמה קלאסית, בעיני עמדי, לנטייה שלנו לחבר בין החושים כדי לפענח מידע בצורה מהירה ומדויקת יותר. לדבריו, הסתרת השפתיים מורידה דרמטית את יכולת ההבנה של המאזין, ירידה השקולה להפחתה של עד עשרה דציבל בעוצמת קולו של הדובר. אותו אפקט, רק הפוך, עושה הרטטת האצבעות. לפי ממצאים של עמדי ועמיתיו, שיפורסמו בקרוב, אחרי אימון של שעה משתפרת ההבנה של הנבדקים, במידה ששקולה לעלייה של 10 דציבל.

ביקשתי הדגמה. ד"ר קסיה סיאזלה מפולין, שעושה במעבדה את הפוסט־דוקטורט שלה, הניחה אוזניות על אוזניי והשמיעה לי סדרה של משפטים. מבעד לאוזניות נשמע קול מאוד לא ברור של גבר שאמר משפטים קצרים באנגלית. הקול עוות במכוון וברקע נשמעה אישה מדברת, כדי להקשות עוד יותר. לא הבנתי כמעט כלום. אז, התבקשתי להכניס שתיים מאצבעותיי לקופסה קטנה עם חורים, שבתוכם חיכו לי שני משטחי הרעדה קטנים. המשטחים האלה רטטו בתדר של דברי הגבר, וסייעו לי בעצם להבין את מה שאני שומע, דרך האצבעות. עברתי אימון קצרצר, קצר בהרבה ממה שמתוכנן בניסוי, ובכל זאת יכולת הזיהוי שלי השתפרה ב-80%. התחושה היתה מוזרה: הרגשתי פתאום שאני מסוגל לשמוע דרך האצבעות. בסך הכל, החוויות האלה לא זרות לאף אחד: כל מי שהבין מיד על מה מדובר כשקרא בביקורת מסעדה על "טעמים בהירים", או שמע שופט בתוכנית מוזיקה מדבר על "צבע קול", יודע במה מדובר. נזכרתי פתאום במורה האגדית שלי למוזיקה בכיתה ח', דרורה בריסמן, שסיפרה כיצד כסטודנטית היתה נוהגת לשים תקליט של מתיאוס פסיון ולשכב על הרצפה, כדי לשמוע את היצירה האלוהית של באך גם דרך הגוף.

גמד מצחיק עם שפתיים משורבבות

עמדי הוא מרואיין קשה, וזה לא נכתב לחובתו. הניסיון לעקוב אחרי דבריו ולפענח את מאמריו, שרואיים בז'רגון המקצועי מתחום החישוביות העצבית והאנטומיה המוחית, יכול לשחוק את היכולות השכליות של עיתונאי ממוצע במהירות. אופן דיבורו מהיר ואסוציאטיבי, והוא מרבה להפיץ את המאזין במחקרים שכתב בעבר, שיכתוב בעתיד, בממצאים בולטים של עמיתים שלו ובפיתוחים טכנולוגיים של הרעיונות שלו שמיועדים לקהל הרחב. כל אחת מהפגישות איתו, שנמשכו שלוש-ארבע שעות, נגמרה כשהמראיין סחוט והמרואיין נראה רענן כאילו התקלח לפני רגע, ממשיך לפגישה הבאה בסדר יומו העמוס. בדרכי החוצה, אחד מחברי צוותו צייד אותי בעוד ארבעה מאמרים שהדפיס וכרך עבורי, לצד דיסק און קי עם עוד 76 מאמרים, שיהיה לי מה לקרוא לפני השינה.

הגישה של עמדי היא רבת-תחומית ורב-מסלולית, ולעתים המסלולים אפילו מתנגשים. למשל: יש לו מחקרים שחושפים את יכולת הראייה החבויה של עיוורים. מנגד, יש לו גם מחקרים שמראים שחלקים מסוימים מקליפת הראייה אצלם, שיושבים במוחם בחוסר מעש, גויסו בינקותם לתגבור יכולות הזיכרון והשפה שלהם. זה קורה במידה מסוימת אפילו לאנשים רואים, שהתנדבו לחיות בכיסוי עיניים למשך חמישה ימים. רק באחרונה התגלה ממצא נוסף, שטרם פורסם: גם התלמוס השמאלי, שהוא תחנת ממסר למידע ויזואלי במרכז המוח, מגויס אצל עיוורים לצורכי זיכרון ושפה. אלה ממצאים מדהימים כי גם הם שוברים תפיסות מקובלות לגבי חלוקת קליפת המוח, ואפילו לגבי חלוקתו המסורתית לגבוה ולנמוך. מה לנוירונים בקליפת הראייה ולזיכרון? מה לתלמוס, שנמצא עמוק מתחת לקורטקס, ולמשימות מורכבות של שפה, שמשיכות בדרך כלל לקורטקס בלבד? "עיוורים נדרשים הרבה יותר מאיתנו להשתמש בשפה וביזכרון", מסביר עמדי, "כשהם צופים, למשל, במשחק כדורגל, הם צריכים להבין ולזכור הרבה יותר ממך. אזור אחד במוח יכול להפוך למשהו אחר לגמרי, כי מה שלא בשימוש ייתפס על ידי מה שחשוב".

תחום אחר שעמדי עוסק בו בימים אלה הוא כיצד להיעזר בצלילים כדי לסייע לאנשים שסובלים מחרדה. הוא התחיל להתעניין בכך לאחר שהתחיל לעשות מדיטציה בשנת השבתון שלו, וגילה עד כמה הוא נרגע בזכות תרגיל מדיטטיבי טיפוסים: עצימת עיניים, וסריקה של תחושות הגוף באופן שיטתי, מאצבעות הרגליים ועד הראש. הוא התחיל להכניס אנשים למכשיר fMRI (כעת הוא משתמש במכשירים של אחרים, בקרוב מאוד יהיה לו במעבדה) ולבקש מהם לעשות סריקה פנימית. "ראינו שכאשר תשומת הלב מופנית לסריקה שיטתית של הגוף, יש השקטה גדולה מאוד של המערכת הרגשית במוח".

אבל לא כל אחד מסתדר עם מדיטציה כזו: הריכוז שלי בגופי, למשל, חמקמק מאוד.

"נכון", נצצו עיניו של עמדי, "יש אנשים שזה פחות עובד אצלם. הראש שלהם נשאב למקום אחר — לקומקום, למשימות שיש להם, לריב שהיה להם בבוקר. לכן אנחנו מנסים ליצור אמצעים חיצוניים שישאבו את עין המוח (the mind's eye) למקום הנכון בגוף, להמשיך בסריקה".

זהו אחד השימושים של חדר אקוסטי מיוחד, שנבנה במעבדתו של עמדי בהשקעה של מאות אלפי דולרים. קירותיו של החדר מצופים בחומרים בולעי קול, שעליהם מחוברים 97 רמקולים משובחים שסובבים אותך מכל העברים. כאשר שוכבים על מיטה בחדר הזה, שילוב הצלילים יוצר אצלך את האשליה שהקול שנשמע מהם בוקע מאיברי הגוף של השוכב, למשל מהרגל. כשקול בוקע מהרגל שלך, קל לך הרבה יותר להתרכז בה.

כדי להבין כיצד גורמים לקולות לבקוע מאיברי גוף שונים, צריך להבין איך המוח ממקם צליל. עמדי ביקש ממני לעצום את העיניים, השמיע "קליק" של אצבע צרידה מכיוונים שונים, וביקש ממני לזהות את הכיוון שממנו מגיע הקול. הסיבה שאני מסוגל לכך, הוא מסביר, היא כי המוח יודע למקם צלילים באמצעות חישוב הפרש העוצמה והמהירות בקלט שמגיע מכל אחת מהאוזניים. זהו ההיבט התלת־ממדי של השמיעה, הדומה לתלת־ממד בראייה, שנוצר על ידי המוח באמצעות שילוב התמונות שמגיעות משתי העיניים.

ברור שהכוונה היא שאנשים לא ישקיעו סכומי עתק בבניית חדרים כאלה בבית: הכוונה היא לשים מיקרופונים רגישים בתוך אפרכסת האוזן של אנשים, להקליט שם את הצליל המשולב שמתקבל מכל הרמקולים בחדר, ולהשמיע לאחר מכן לכל דיכפין באמצעות אוזניות פשוטות, מחוץ לחדר. מחשבותיי שוב נדדו: חשבתי על עצמי יושב, למשל, ברכבת, ובמקום לשמוע עופר לוי בספוטיפיי, אני שומע את כף הרגל־השוק־הירך שלי מצייצות אלי. האם זה מרגיע או לא? את זה עוד נראה, אבל אין ספק שזה מצית את הדמיון.

אם אפשר להעצים את יכולת הריכוז, או לגרום לעיוורים לראות (באמצעות צלילים) את טווח האור הנראה לעין, למה שלא נתקין בעין המוזיקלית מצלמה שרואה גם בטווח האינפרא־אדום? אדם, עיוור או רואה, שיהיה מצויד במערכת כזו, יהיה מסוגל לראות בחושך דרך אוזניו. ולמה לא לחבר חיישן אולטרה־סאונד ולראות באמצעותו מבעד לקירות? או מצלמת אולטרה־סגול, שתגרום לך לראות את העולם כמו דבורה? כאשר מתחילים לחשוב על שיפורים, השמים מבחינת עמדי הם הגבול. "אנחנו רוצים לעבור לעבוד באותן טכניקות, של אבולוציה מזורזת של המוח בעזרת טכנולוגיה ואימון, עם אנשים כמוני וכמוך", הוא אומר, "אנחנו רוצים לגלות אם זה יגרום למוח לפתח אזורים חדשים".

בברנז'ת חקר המוח הישראלית רואים בעמדי חוקר עם קבלות יפות, כלומר פרסומים בכתבי עת נחשבים ושיתופי פעולה בינלאומיים מכובדים. הביקורת היחידה עליו, שהשמיע עליו בחיבה אחד הקולגות, היא שהוא לא תמיד שמרן בפרשנות של הממצאים שלו. "הוא מדען מאוד יצירתי, פרובוקטיבי ומעורר מחשבה", אמר, "בהרבה מקרים הוא צודק. לפעמים הוא הולך טיפה רחוק מדי בחשיבה, אבל כולנו עושים את זה. כל אחד מתאהב ברעיונות שלו". איזה מדען טוב לא חוטא לפעמים בהתלהבות יתר?

אחת הטענות היותר־דרמטיות של עמדי היא שאולי הוא מתקרב לאיתור החיבור המסתורי במוח בין הגוף לנפש. הטענה הזאת החלה להתגבש אצלו באחרונה בעקבות שורת מחקרים חדשים ומרתקים למציאת "האנשים הקטנים" במוח: במרכז קליפת המוח יש פס ארוך שמהווה מעין מפה של נתוני החישה והתנועה שמגיעים מהגוף. הייצוג של איברי הגוף השונים בפס הזה הוא לא פרופורציונלי: החישה בגב, למשל, מיוצגת בדלילות (בקשו ממישהו לגעת בכך בגב עם אצבע אחת או שלוש — לא תבחינו בהבדל). איברים אחרים, לעומת זאת, זוכים לייצוג יתר. אם מפסלים גוף אדם לפי הפרופורציות האלה, יוצא גמד מצחיק עם שפתיים משורבבות, ידיים ענקיות ואיבר מין גרוטסקי. הגמד הזה ממשיך להופיע בסיוטיו של כל מי שלמד עליו באוניברסיטה.

הפס הזה במוח, שהתגלה על ידי הניורוכירורג הנודע ווילדר פנפילד, מכונה הומונקולוס — איש קטן. מחקריו של עמדי גילו, לדבריו, יותר מ-15 הומונקולוסים נוספים כאלה, מפוזרים ברחבי המוח. זו עוד תגלית שמלמדת על טשטוש הגבולות במוח: אין רק "אזור רגש" ו"אזור חישה ותנועה", אלא גם מהילה ביניהם. בין היתר מצא עמדי מפת ייצוג של הגוף (הדומה לאיש הקטן) בתוך האמיגדלה, שנחשבת למרכז הפחד במוח. לפי ממצא נוסף, שטרם פורסם, יש מפה כזו גם ב"רשת ברירת

המחדל" (Default) — רשת שמורכבת מכמה אזורים במוח, שבשנים האחרונות זוכה לתשומת לב הולכת וגוברת. זהו החלק במוח שפועל כאשר אנחנו לא עוסקים בשום פעילות מיוחדת שנוגעת לעולם החיצוני, למשל שוכבים ערים בעיניים פקוחות. שם מתרחשים החשיבה, התכנון, ההיזכרות והחלימה בהיקף. במובן מסוים, זו הרשת שמייצגת את עולמנו הפנימי, העצמי שלנו, להבדיל מהחלקים במוח שעוסקים במילוי משימות שקשורות לעולם החיצוני, כמו קריאה, הקשבה או הזזת היד כדי להרים כוס. בוויקיפדיה נכתב בפירוט: "רשת ברירת המחדל... מובחנת באופן אנטומי ותפקודי מרשתות המעורבות בתפקודי חישה". אבל עמדי חושב שיש גם חישה ותנועה בדיפולט, והמשמעות של זה בעיניו רבה.

"תמיד היה ידוע, גם בעולם הרוח, גם בפסיכיאטריה הקלאסית, שיש חיבור עמוק בין הגוף לנפש", אומר עמדי. "אבל לאיש בעולם חקר המוח לא היה מושג איפה בדיוק החיבור הזה מתרחש במוח. עכשיו הגענו לסדרה של תגליות, שרק חלקן הקטן כבר פורסם והיתר עומד להתפרסם, שנותנות לנו את קצה החוט לחיבור הזה. כל אדם שעושה מדיטציה מכיר את זה — אנחנו מגלים איפה תכלס זה מתבצע, מהי התשתית העצבית לזה". עמדי מבקש להדגיש שהוא עדיין לא מבין עד תום מה פשרם של הממצאים שלו. "זה עוד לא התגבש לסיפור", הוא אומר, "אין לנו תיאוריה שלמה. זו הוכחה מדעית ראשונית אבל די דרמטית".

התגליות האלה עשויות להיות הבסיס לשורה ארוכה מאוד של מחקרים מרתקים. ברגע שמוצאים את הממשק הרגשי-גופני במוח, אפשר לחקור כל מיני דרכים לתכנת אותו מחדש כדי לסייע למי שסובל, למשל, ממחלות פסיכוסומטיות, ממעי רגיז ועד כאבי ראש. יכול להיות שהכיוון המחקרי הזה יבשיל ויכול להיות שלא — אבל קשה לעמוד בפני הדרייב של עמדי בנושא הזה, כמו בכל הנושאים האחרים. אם תסגרו בפניו את הדלת, הוא יבוא מהחלון — ואם תעצמו את עיניכם, הוא ייכנס דרך חוש אחר.

נפלאות הסינסתזיה

סינסתזיה נחשבת למצב של ערבוב חושים, כלומר כאשר גירוי של חוש אחד גורם לחוויה בחוש אחר. אבל למעשה, לעתים קרובות היא קורית באותו חוש. למשל: יש סינסתטים שהאות א' נראית להם תמיד אדומה. שתי החויות הן בתחום הראייה, אבל הראשונה (קריאת האות א') היא שגרתית, והשנייה — סינסטטית. אחרים, שחווים סינסתזיה בצורתה המוכרת, עשויים לטעום טעם תפוז כשהם שומעים את השם "שמעון", או להרגיש שנוגעים בהם כאשר הם רואים שנוגעים במישהו אחר.

בעבר, הסינסתזיה נתפסה כמעין תופעה פולקלוריסטית, ספק אמיתית, שמאפיינת בעיקר אנשים מוזרים ו/או בעלי נטיות אמנותיות. אבל מחקרים מצאו שהיא אמיתית לגמרי. אדם שרואה את האות א' תמיד אדומה, למשל, יתקשה לאתר אותה על רקע אדום, גם אם היא נכתבה בשחור. שיעור הסינסטטים באוכלוסייה נראה גבוה בהרבה ממה שהוערך בעבר. בתחילה סברו שמדובר ב-0.05% בלבד. לפני כמה שנים ההערכות עלו ל-2%-4%. כעת חוקרים חושדים שהתופעה נפוצה אפילו יותר. אחת הסיבות לכך היא ההצלחה האדירה של ASMR, אותם סרטונים שבהם נראים ונשמעים אנשים עוסקים בפעילויות כמו גירוד מיקרופונים, לחישות ומישושים קולניים.

עמדי, שבעצמו מושפע מאוד מהסרטונים האלה ("יש לי את זה בצורה הכי קיצונית, כמעט כל טריגר גורם לי לתחושה מאוד נעימה מהעורף ומטה"), משתמש בימים אלה בחדר האמביוסוני (חדר אקוסטי שעל קירותיו 97 רמקולים) כדי לחקור יותר לעומק כיצד לחולל את התופעה בצורה אפקטיבית יותר, ואיך היא משפיעה על הגוף בכלל ועל המוח בפרט. בנוסף, חוקרים במעבדה צורות "רכות" של

סינסתזיה שגם הן כנראה נפוצות מאוד. למשל: מחקרים מלמדים שאנשים מסוגלים להבחין בין צליל המזיגה של מים חמים לצליל המזיגה של מים קרים. עמדי ועמיתיו מנסים לברר מהי משמעותו של הקשר הזה וכיצד הוא נוצר במוח.