

רפאל מלאך

השתקפויות עצביות

ערב על חוף הים

דמיינו את עצמכם יושבים על חוף הים ומתבוננים בגלים. פתאום אתם נזכרים, 'לעזאזל- שכחתי לשלם את חשבון החשמל' - מחשבה קטנה ומעצבנת. אבל, מוזר מאוד, בדיוק כשעלתה המחשבה בראשכם, עלה גם גל כחול וקטן בים, מכיוון סוכת המציל. 'צירוף מקרים מגוחך', אתם אומרים ובצדק - אבל רק לשם השעשוע אתם חושבים שוב, 'חשבון החשמל'. למרבה התדהמה - הפעם זה קצת מבהיל - שוב עולה לו הגל הכחול הקטן מכיוון הסוכה. יתרה מזאת, ספינת מנוע בדיוק מתקרבת לחוף ומעוררת גל כחול דומה בכיוון הסוכה, ובדיוק אז, למרבה הפלצות, שוב נתקעת המחשבה 'חשבון החשמל!' - כאילו איזה כוח מסתורי שתל אותה בתודעתכם. אחוזי השתאות אתם ממשיכים להתבונן בגלים, ומתברר לכם אט-אט שכל מחשבה, רגש או זיכרון שעוברים לכם בראש - ואפילו הזניחים ביותר - מחוברים בדיוק מושלם למופע מיוחד של גלים בים. אתם ממשיכים ובוחנו את התופעה המדהימה ומגלים שיש ארגון במופע הגלים- כל הצלילים שאתם שומעים מעוררים גלים באזור הדרומי, אתם עושים תנועה כך שהיא - הגלים מופיעים בצד צפון, רואים משהו- הגלים זזים למרכז. בעצם - אתם אומרים לעצמכם - אנחנו שולטים בגלי הים בכוח המחשבה בלבד - נפלא! אבל אז- אתם שמים לב לתופעה המטרידה- שגם למחשבה הזו התעורר גל משלה- ומתגנבת הרגשה קצת פרנואידית- אולי גלי הים השתלטו על התודעה הכל כך פרטית שלנו? - מי בעצם מפעיל פה את מי? אפופי פליאה וקסם אתם חוזרים הביתה, בתחושה שזה עתה חוויתם תופעה מדהימה של הטבע.

אפשר להירגע, זהו כמובן סיפור דמיוני. הבעיה היא שבמקרה זה המציאות באמת עולה על כל דמיון. מבחינת מחקר המוח, הים על גליו המטפוריים פשוט מקופלים ומכונסים בתוך הגולגולת שלנו - באיבר שמשקלו כקילו וחצי שהוא מוח האדם. אם לנסח זאת באופן הפשוט והברור ביותר: הנחת היסוד הבסיסית של חקר המוח היא שלכל מחשבה, רגש וזיכרון שמתעורר בנו - ישנו מופע מיוחד של גלי פעילות מוח שמתאים לו. התיאום בין המופעים הפיזיקליים של המוח לחוויות האישיות שלנו הוא מושלם ולעולם אינו מופר. לכל ניואנס של מחשבה או רגש ישנו המקביל המוחי שלו ולהפך. בהמשך אגע בכמה מחקרים והשערות שמנסים לתאר את בסיס הקשר הפלאי הזה בין המוח לחוויה האנושית.

הקסם שבמובן מאליו

מחקר התודעה בראי המוח הוא מרתק ומאתגר במיוחד מפני שהוא מהווה תערובת בלתי אפשרית של ניגודים: מצד אחד, התחושה של תופעות מובנות מאליהן ומיידיות שאין לפקפק בנכונותן, אך מצד אחר, דווקא אותן אמיתות מובנות מאליהן מובילות אותנו בהכרח למסקנות מעוררות השתאות כמו שתארת. נתחיל מהמובן מאליו - אנחנו פוקחים את העיניים וקוראים טקסט (כמו המילים האלה). ברקע מוזיקה, רעש הרחוב או ציוץ ציפורים - כל העולם העשיר והמגוון נמצא לפנינו באינסוף ביטוייו, ללא כל מאמץ, כמה טריוויאלי! יתר על כן, העולם הזה מופיע לפנינו בצורה ישירה ומיידית. אין לנו צורך במכשיר

מדידה כלשהו כדי לדעת שאנו מחזיקים בעיתון הבוקר - אנחנו פשוט רואים את העיתון, כמה משעמם. מה יכול להיות מובן מאליו יותר מאשר העובדה שבידינו עיתון הבוקר וכתורותיו המדכדכות. מנגד, כאנשים משכילים אפילו בלי להיות מומחים לעניין, אנחנו מודעים במידה זו או אחרת לכך שהיכולת שלנו לראות קשורה למשהו שקורה בעיניים ובמוח שלנו. יתרה מזאת, אם נבחן כיצד חוקרי המוח מבינים את ראיית העיתון - ההשערה היא שאותו עיתון וכתורותיו הינם בעצם הפקה של מעשה יצירה במוחנו, תהליך שבו המוח בונה תמונה שמנסה לשער מה אנחנו מחזיקים בידנו. כלומר, המופע של העולם שזה עתה תיארתי - שהוא כל כך בנאלי ומובן מאליו - הינו מעשה יצירה מופלא ומסתורי שבמהלכו 'מנחשים' חילופי אותות חשמליים המתרחשים במוחנו מציאות של עיתון. זאת ועוד, כל המארג של התופעות שאנו חווים, מהעולם שסביבנו ועד העולם שבתוכנו - מראות, תחושות, רגשות, זיכרונות, התחושה שאנחנו קיימים, תחושת הזהות האישית שלנו, הכול בכול מכול - הוא ביטוי קסום ובלתי ניתן להמשגה של דפוסי פעילות במוחנו. הטענה שכל העושר של העולם החווייתי שלנו מוצמד בצורה מוחלטת ובלתי ניתנת להפרדה למבני פעילות של גופי עצב קטנטנים המתקשרים ביניהם במוחנו נשמעת דמיונית - אך זוהי טענה שנמצאת בקונצנזוס אצל חוקרי המוח. השערה זו רק מתחזקת מניסוי לניסוי ומעולם לא הופרכה. בהמשך אדון בתובנות שחקר מוח האדם בשנים האחרונות תורם לנו לפענוח הקשר המופלא הזה שבין מופעי התודעה לפעילות תאי העצב שבמוחנו.

מהי מודעות?

אף על פי שאין לנו דבר ודאי וברור יותר מאשר החוויות שלהן אנו מודעים - מחקר המודעות נתון בסכך של מחלוקות עמוקות. נראה לי שחלק חשוב מוויכוחים אלו נובע מהקושי המובנה בהגדרה מוסכמת של המושגים והתופעות שלהם מתכוונים חוקרי מוח כשהם מדברים על מודעות. הבהרת המושגים האלו היא תחום מובהק של הפילוסופיה, ואין בכוונתי להיכנס לשדה הטובעני וכנראה גם הבלתי פתיר הזה. במקום זאת אתאר בקווים כלליים תכונות משותפות לשדה התופעות שבו ארצה להתמקד, מתוך הבנה שהגדרה מדויקת וממצה - מעצם הישענותה על השפה האנושית המוגבלת - היא כנראה בלתי אפשרית.

יקומים מקבילים

בחשבנו על מכלול עולם התופעות, אפשר להבחין שלמרות עושרו העצום, הוא ניתן לחלוקה לשני 'יקומים' השונים בתכלית זה מזה. ליקום הראשון אקרא 'היקום הציבורי' - יקום זה כולל את כל עולם התופעות שניתנות באופן עקרוני למדידה על ידי כל אדם, כלומר אלה התופעות הנמצאות ברשות הרבים. תופעות אלו כוללות את עולם החומר, הפיזיקה, הכימיה וכדומה. למשל, אם לפנינו כדור ברזל, כל אחד מאיתנו יכול למדוד את משקלו, את דחיסתו ועוד. גם חלקיקים בלתי נראים - כמו פוטונים של אור - הם באופן עקרוני בני מדידה ברשות הציבור. כמובן - מבחינת המאמר הנוכחי - קבוצה מעניינת במיוחד של תופעות בעולם הציבורי היא תאי העצב שבמוחנו והאותות החשמליים שהם שולחים. אף שהדבר דורש מכשור מיוחד, באופן עקרוני פעולת תאי העצב במוחו של כל אחד ואחת מאיתנו שייכת ליקום הציבורי, ועם התפתחות הטכנולוגיה ייתכן שבאמת תהיה גלויה לפני חוקרי מוח בעתיד.

היקום השני שונה בתכלית מהיקום הציבורי ואקרא לו 'היקום הפרטי'. יקום זה כולל את כל התחושות, המחשבות, הרגשות והזיכרונות שיש לנו, וכן את מה שנהוג לכנות החוויות המודעות או העולם המודע. שני קווים משותפים מאפיינים את כל התופעות ביקום הפרטי. קודם כול, התופעות הן פרטיות לחלוטין; אין לשום יצור מלבדנו גישה ישירה לחוויות הפרטיות שלנו. גם אם נרצה לא נוכל אפילו 'להעביר' בצורה מושלמת חוויה פרטית שלנו לזולת. למשל, נסו לתאר במילים את החוויה של צבע זהב או של ריח ההדרים - אפשר להשתמש במטפורות לרוב, אך כלל לא ברור שהזולת יחווה בצורה דומה את החוויה הפרטית שאנו מתארים. עיקרון נוסף המאפיין את העולם הפרטי הוא עקרון הישירות. התופעות בעולם הפרטי מופיעות בפנינו בצורה ישירה וללא צורך בתיווך. מחשבות נעימות ואף מפחידות, תחושות וזיכרונות צצים בתודעתנו בצורה ישירה ומיידית בלי שנצטרך למכשיר מדידה כלשהו.

החיבור הבלתי נתפס בין התודעה לפעילות תאי העצב

כפי שניסיתי להמחיש קודם, מתוך מחקר המוח עולה שוב ושוב התובנה שכל אירועי העולם הפרטי ללא יוצא מהכלל הם בעצם ביטוי לפעילויות במוח. התהליך הזה מופלא כי לכאורה קשה לדמיין שתי קבוצות של תופעות השונות יותר זו מזו - עולם החוויות הפרטי והישיר מצד אחד, ואותות חשמליים זעירים המוחלפים בין תאי עצב מצד אחר. למרות זאת, חקר המוח מראה שוב ושוב את היכולת של המוח שלנו 'להתבונן' אל תוך עצמו ו'לחוש' בצורה ישירה וללא מתווכים את הפעילות של תאי העצב שבו. המירכאות במשפט האחרון חשובות מאוד - כי התהליך הזה בלתי ניתן להמשגה וכל ניסיון לתארו במילים נדון לכישלון.

למרות התחושה המוצדקת של פליאה שעולה בנו עם התובנה עד כמה קשה הבעיה של הקשר בין התודעה למוח, אין לגזור מכך את המסקנה שהפעלת כלי מחקר מדעיים כדי להתקדם בהבנה שלנו את התופעה הינה חסרת תקווה. לדעתי, וניתן לראות מאמר זה כניסיון להמחיש דעה זו, המחקר המדעי הוא כלי אפקטיבי (אם כי לא היחיד) בתהליך פענוח חידת התודעה והמוח. אבל חשוב להגדיר מהי המטרה האפשרית של מחקר שכזה. המטרה לא צריכה להיות הבנה מלאה כיצד הופכים מצבי פעילות במוח לחוויות מודעות. לתחושת, זו מטרה שעלולה להיות מעבר ליכולת האינטלקטואלית שלנו כבני אדם. מטרה אפשרית צנועה יותר, אם כי עדיין קשה לאין שיעור, צריכה להיות בניית תיאוריה - כלומר גילוי חוקיות, אלגנטית וכללית ככל האפשר, שתנבא את ההפצעה של כל חוויה מודעת מתוך פעילות עצבית. בצורה פשוטה, השאלה היא: מה צריך לקרות במוח כדי שנראה, נזכור, נרגיש או נחשוב? את השאלה מדוע הדברים קורים דווקא כך ולא אחרת כנראה נצטרך לקבל כמסתורין שמעבר ליכולת ההמשגה שלנו.

מרכזיות תקשורת חכמות

במסענו לחיפוש תיאוריה שתקשר בין המוח לתודעה, אנו חייבים להתחיל באלמנטים המרכזיים שמאפשרים עיבוד מידע במוח. המוח הוא איבר מורכב להדהים, הבנוי ממגוון גדול של חלקים, שכמובן אין באפשרותי לתת להם במסגרת מאמר צר זה את המקום הראוי להם. אצטרך להסתפק בתיאור טלגרפי

של אבני הבניין המרכזיות – תאי העצב (הנוירונים). במסגרת תיאור טלגרפי כזה אתעלם מהמורכבות של כל תא עצב ואסתפק בציון העובדה שאלו הם גופיפים קטנטנים - גודלם כעשירית המילימטר - שהתכונה החשובה ביותר שלהם היא יכולת התקשרות מסועפת, בעיקר עם תאי עצב אחרים. ניתן אם כך לראות בכל תא עצב מעין 'מרכזיית תקשורת' משוכללת. שפת התקשורת בין תאי העצב היא על ידי פעימות חשמליות קטנות, מעין אותות מורס. כל תא עצב מחובר לאלפי תאי עצב אחרים שמהם הוא יכול לקבל אותות בעזרת שלוחות קטנות הנקראות 'דנדרייטים'. כל חיבור בין שני תאי עצב נעשה בנקודת חיבור הנקראת 'סינפסה'. תכונה חשובה של הסינפסות היא שחוזק הקשר של תא עצב עם שכניו אינו אחיד ויכול להשתנות בין תאי עצב שונים ואפילו לאורך זמן. אם נתרכז בעיקר ולא בפרטים, הרי פעולת תא העצב היא בעצם פשוטה מאוד - תא העצב קולט אותות שנשלחים אליו מתאי עצב אחרים באמצעות הדנדרייטים. אם האותות האלה חזקים מספיק ועוברים את הסף - תא העצב 'יתעורר' בעצמו ויתחיל לשדר אותות בקצב מהיר לתאי עצב אחרים. אותות אלו הוא שולח באמצעות סיב עצב ארוך ומתפצל הנקרא 'אקסון'. אפשר לדמות כל תא עצב למעין מערכת עיתונאית - אם מגיעים מספיק טלפונים המודיעים לעורך על אירוע מסוים, הוא יתעורר ויוציא הודעה שתדווח על כך לקוראים. פעולה זו של חיבור אותות ושליחתם היא למעשה הפעולה הבסיסית של תאי המוח. כעת מוטלת עלינו המשימה להסביר באמצעות קליטה והעברה כאלה של מידע בין תאי המוח כיצד פסנתרן מנגן, כיצד ילד לומד לקרוא, וכמובן - המסתורי מכול - כיצד חילופי אותות אלה בין תאי העצב משתקפים בחוייה הפרטית שלנו- למשל בתמונה שאנו רואים או במחשבה שצצה בתודעתנו.

הפער בין הפשטות הבסיסית שבפעולת תאי העצב לתחכום שבתוצר שלה נראה עצום. אך צריך לזכור שני היבטים מכריעים בתיאור זה. הראשון, מספר תאי העצב ומספר החיבורים ביניהם הם אסטרונומיים. למשל, במוח האדם יש כמאה מיליארד תאי עצב וכל אחד מהם מחובר באלפי חיבורים לתאי עצב אחרים. במורכבות כזו, אם היא מאורגנת בצורה חכמה, אפשר ליצור התנהגויות וחישובים מסובכים ביותר. היבט מכריע שני הוא העובדה שחוזק החיבורים בין תאי העצב מגוון ומשתנה - כלומר תא עצב מסוים 'יאזין' לשכנים מסוימים בצורה רגישה יותר מאשר לאחרים קשרים מסוימים בין תאי עצב הם אפילו שליליים כלומר תאי עצב מסוימים יכולים לעכב את תא העצב שאליו הם מחוברים במקום לעורר אותו; ואולי הכי חשוב, החיבורים בין תאי העצב לומדים ומשתנים בחוזק עם הניסיון. לדוגמה, כאשר המוח מבצע פעולה מסובכת בצורה מוצלחת, החיבורים שתרמו להצלחה זו יתחזקו, ולהפך. עקרונות אלו נכנסו בשנים האחרונות לתחום המחקר ומתחילים להפכה הדרמטית שמתחוללת היום בעולם האינטליגנציה המלאכותית.

התמקצעות עצבית

כשבוחנים את המאפיינים העיקריים של תאי העצב במוח מגלים שני ממדים הפוכים זה לזה. מצד אחד, כפי שתוארתי קודם, לתאי עצב יש מאפיינים תפקודיים דומים מאוד - אוכלוסיות תאי המוח השונות הן מעין וריאציות על מוטיב חוזר של תחנת תקשורת מרובת ענפים ולומדת. מצד אחר, כשבוחנים את התפקוד של תאי העצב מגלים עושר ומגוון מרשימים. ניתן להשוות זאת לתרבות האנושית, שבה בני אדם

הנראים בקווים כלליים דומים זה לזה מתמחים בתפקודים שונים מאוד, מנהגת קטר ועד לוליין בקרקס. באותו אופן אנו יכולים להבחין בהתמקצעות של תאי העצב. אם ניקח כדוגמה את מערכת הראייה האנושית - כלומר אותם חלקים במוח המשתתפים ביצירת התמונות שאנו רואים - נגלה בה תאי עצב בעלי התמחות ייחודית בהיבטים מסוימים של התמונה הראייתית. אחת התגליות פורצות הדרך בתחום חקר המוח הייתה התגלית של המדענים הובל וויזל (שאף זכו עליה בפרס נובל), שישנם תאים במערכת הראייה שמתמחים בזיהוי קווים בעלי זווית מסוימת. כלומר, ישנם תאי עצב ש'יתעוררו' ויתחילו לשדר אותות בקצב מהיר כאשר יופיע קו מאונך במקום מסוים בשדה הראייה. מנגד, אם הקו ישנה את הזווית לכיוון אופקי, תא העצב המדובר יפסיק את פעולתו, אבל תא סמוך אליו, המתמחה דווקא בזווית האופקית, יתעורר ויתחיל לשדר אותות.

חלק חשוב ומרכזי של מחקר המוח עסוק במיפוי קפדני של ההתמחויות השונות של תאי העצב ובדרך שבה הם ממוקמים במוח. כך למשל התגלה שתאי עצב בעלי התמחויות מורכבות במיוחד מרוכזים בעיקר בשכבה דקה – (3 מילימטר) העוטפת את המוח ונקראת 'קליפת המוח'. קליפת המוח בבן האדם מפותלת מאוד כדי לאפשר מיקום מספר גדול של תאי עצב בתוך הגולגולת. מאפיין מעניין נוסף של קליפת המוח – שיהיה רלוונטי בהמשך - הוא חלוקתה לאונות ופיצולה לשני חצאים (המיספרות), ימני ושמאלי, בעלי תפקוד מיוחד. בקליפת המוח, תאים בעלי התמחויות דומות נוטים להימצא ביחד באזורי מוח- שאף הם מתחלקים לתת קבוצות הקרויות 'עמודות'. למשל, תאים בעלי התמחות בהיבטים של התמונה הנראית ממוקמים בחלק האחורי של קליפת המוח- באונה האחורית שבה מצויה מערכת הראייה. תאים המתמחים בצלילים מסוימים מרוכזים יותר בצדי המוח, באונה הצדית שבה ממוקמת מערכת השמיעה. תאי עצב המתמחים בהפעלה של שרירי הגוף מרוכזים במערכת המוטורית שבאונה הקדמית וכן הלאה.

סרט נע

אין באפשרותי לתאר במאמר אחד את העושר התפקודי העצום של תאי העצב, ולכן אתמקד בדוגמה של מערכת הראייה, שהיא חוש חשוב במיוחד במוח שלנו. אתאר בכמה קווים כלליים את המאפיינים של תפקוד מערכת הראייה. חשוב לציין שקווים כלליים אלה הם עקרונות ארגון המופיעים שוב ושוב במערכות המוח השונות - כך שמתוך הדוגמה הספציפית של הראייה ננסה להסיק על עקרונות כלליים של המוח ושל התודעה האנושית.

אם נבחן את ההתארגנות של תאי העצב במערכת הראייה האנושית ביתר פירוט, נראה שהם מאורגנים במעין היררכיה תפקודית. מטפורה מעולם התעשייה תעזור להמחיש את משמעותה של היררכיה זו. ניקח לדוגמה פס ייצור של מכוניות. הוא מורכב מסדרת תחנות: בתחנה הראשונה מקבלים הפועלים חלקים פשוטים, למשל מוטות ברזל, ומחברים אותם כדי להרכיב מסגרת. את המסגרת הם מעבירים לתחנה הבאה, שם מרכיבים אותה הפועלים לדלת ומעבירים לתחנה הבאה, שבה מחברים כמה דלתות לחלק הקדמי וכן הלאה. המאפיין של מערכת כזאת הוא שבתחילתה המרכיבים פשוטים - חלקים

ראשוניים של המכונית. אבל בתהליך של הרכבה הדרגתית נעשים החלקים בתחנות המתקדמות שלמים ומורכבים יותר ויותר, עד ליצירת המכונית המוגמרת בתחנה הסופית.

נבחן עתה מהו תפקיד תאי העצב בתחנות השונות במערכת הראייה לאורך 'פס הייצור' של אזורי הראייה. באזור הראייה הראשוני - שהוא הראשון בשרשרת ומקבל את המידע מהעיניים - אנו מוצאים את אותם התאים שהתגלו על ידי הובל וויזל, המתמחים במרכיבים הפשוטים של התמונה - קווים בזוויות שונות. ככל שנתקדם לאורך ההיררכיה של אזורי הראייה, לעבר החלק הקדמי יותר של המוח, נגלה תאי עצב שכבר לא מקבלים את המידע מהעיניים אלא מחברים את האותות המגיעים מתאים שונים הנמצאים באזורי הראייה שלפניהם בפס הייצור. התוצאה של חיבורים אלו, כמו במטפורה של פס הייצור, היא התמחות בהבחנה במרכיבים כוללניים ומסובכים יותר הנמצאים בתמונה, כמו למשל פינות או צורות גיאומטריות פשוטות בתחנת ביניים, ותמונות של חלקי עצמים או של חלקי גוף בתחנות מתקדמות יותר. בסוף ההיררכיה - בתחנות האחרונות של פס הייצור העצבי - אנו מגלים תאי עצב שמתמחים בזיהוי עצמים שלמים, כגון פרצופים, בניינים, כלי עבודה וכדומה. אנו רואים איך, בתהליך הדרגתי ועל ידי אינטגרציה חוזרת ונשנית של מידע המגיע מתחנות נמוכות יותר, מערכת הראייה בונה תאי עצב בעלי מומחיות מורכבת ביותר המבחינים ב'גשטלט' - כלומר בדגם השלם של התמונה ולא דווקא בחלקים הבודדים המרכיבים אותה.

סיפורי סבתא

ניתן היה לחשוב שבתהליך ההיררכיה נמצא כבר אותו עיקרון אלגנטי המסביר את הופעת המודעות הראייתית. בהשראת ה"חתול של שרדינגר" שהוצע כנסוי מחשבתי שמטרתו להמחיש את האבסורד בפרשנויות מסוימות של פיזיקת הקוונטים, הרשו לי להציג את 'הנוירון של סבתא': הרעיון הוא שעבור כל תמונה שאנו רואים - למשל התמונה של סבתא שלנו - בסוף התהליך של הבנייה ההיררכית יהיה נוירון אחד שמתמחה בתמונה של סבתא. כלומר, הנוירון יתעורר לפעילות כאשר נראה את סבתא שלנו, אבל ישתק כאשר כל תמונה אחרת תופיע בתודעתנו. העיקרון הזה אינו ייחודי כמובן לסבתא; יהיה לנו אם כך נוירון שמתמחה בתמונת הירח המלא, ונוירון עבור הטעם של גלידת וניל, נוירון שמתעורר כשאנו חושבים על עצמנו, נוירון מיוחד לתחושת התפוצצות מכעס ועוד נוירון לחוויית הצחוק המתגלגל.

חשוב להבהיר שמבחינת הדרישות של תיאוריה של מודעות - תיאוריית הנוירון של סבתא עונה על הדרישה לאלגנטיות, כלומר ישנו כאן עיקרון אחד - הבנייה ההיררכית - שמסביר את כל עולם החוויות האנושי. הבעיה הקשה היא שהתיאוריה אינה עונה על התנאי ההכרחי השני של כל תאוריה מדעית- היא אינה מתאימה לעובדות הניסיוניות המגיעות מחקר המוח. קודם כול, מחקרי המוח מראים שוב ושוב שתמונה בודדת - פשוטה ככל שתהיה - מעוררת אלפי תאים לפעילות, אפילו בשלבים הגבוהים ביותר בהיררכיה. שנית, אם נשווה בין מספר תאי העצב הנמצאים במוח ומספר החוויות השונות שבן אדם יכול לחוות, נראה שהמספר של החוויות האפשריות גדול לאין שיעור ביחס למספר תאי העצב. אם ניקח לדוגמה שוב את סבתנו המיתולוגית, יש בעצם ספרייה שלמה של דימויים שונים של סבתא שאנחנו יכולים לראות: סבתא צוחקת, סבתא עם או בלי משקפיים, עם או בלי כובע נוצות ועוד ועוד. קל לראות

שאם נצטרך להקציב נזירון נפרד לכל אחת מהתמונות השונות האלו, מהר מאוד ייגמרו לנו נזירוני הראייה, וכל זה בלי להביא בחשבון תמונות שעדיין לא ראינו, שמחייבות להחזיק ברזרבה נזירונים לא מומחים כדי שנוכל להכיר דמויות חדשות. בקיצור, הרעיון האלגנטי של נזירון נפרד לכל חוויה אפשרית הוא פשוט בלתי ישים.

האלף-בית העצבי

הפתרון שמתברר מסדרה ארוכה של גילויים ופיתוחים תיאורטיים הוא שכל תמונה המופיעה בתודעתנו היא תוצר פעילות משותפת של קבוצה גדולה של תאי עצב. מספר התמונות המתאפשר על ידי ייצוג קבוצתי כזה הוא אסטרונומי. מטפורה מתאימה כדי להסביר את הכוח שבייצוג הקבוצתי היא זו של האלף-בית. האלף-בית מאפשר לנו ליצור באמצעות מספר מצומצם של אותיות - 22 במקרה של העברית - טריליונים של מילים שונות. דמיינו עכשיו שכל תא עצב מתפקד כאות והתמונה שאנו רואים היא מילה. מספר התמונות האפשריות בהינתן מספר הנזירונים שמשותף בכל קבוצה גדול הרבה יותר מכל מספר שאפשר להעלות על הדעת. אנסה לפרט מעט יותר את המטפורה וכיצד היא יכולה להיות קשורה להיווצרות התמונה המודעת. אציין שוב שאף על פי שהדוגמה מתייחסת לתמונה שאנו רואים, העיקרון יהיה זהה לכל חוויה מודעת שעולה במוחנו.

כדי לפשט את העניין, בואו נניח שאנו עוסקים בשאלה כיצד קבוצת תאי עצב יכולה לייצג קבוצה של אנשים בעלי שמות שונים - רפאל, דניאל, מיכאל, מיכל, סופיה וכו'. כבר דנו במנגנונים שמאפשרים לתא עצב ליצור רגישות לתמונה בודדת - ולא קשה להרחיב את המנגנונים ההיררכיים כך שתא עצב מסוים יפעל על ידי כל אחד מהחברים בקבוצה מסוימת של דמויות שונות. הנקודה החשובה היא שהתא מתעורר רק אם אחד מחברי הקבוצה הספציפית הזאת מופיע בתודעה ולא חברים אחרים. למשל, נדמיין תא עצב שמופעל בכל פעם שמופיעה דמות ששמה מתחיל באות אלף. כלומר, דמויות ששמן אלון, אסתר, אסא וכדומה יעוררו אותו לפעילות. מנגד, תא כזה - לשם הנוחיות נקרא לו תא אלף-ראשון - שותק אם אנו רואים את ברוך או את יוסי או אפילו את לאה. שימו לב שגם אם תא אלף-ראשון פועל, עדיין אין לנו יכולת לראות תמונה ברורה מפני שהוא קשור למאות דמויות שונות. באותו אופן אפשר לדמיין תא שנקרא לו בית-שני, שפועל בכל פעם שמופיע שם שהאות השנייה בו היא בית - למשל אבנר, או לביא. אבל תא בית-שני שותק עבור ברוריה או יעקב. ניתן להמשיך כך עוד ועוד - למשל תא יוד-ראשון יפעל עבור יוסי ויוכבד אך לא עבור דינה או רפי; וכן הלאה.

כל אחד מהתאים האלה הינו חסר משמעות ברורה כאשר הוא פועל לבדו, בדיוק כפי שאין אנו יודעים מה המילה שכתב מישהו אם אנו רק רואים את האות הראשונה בה. אבל התמונה מתבהרת בצורה דרמטית כאשר התאים פועלים בקבוצה. נניח שתא אלף-ראשון, תא בית-שני ותא יוד-שלישי מחליטים לפעול יחד. במקרה זה תייצג הקבוצה המיוחדת הזאת של תאי העצב בצורה ייחודית וחד-משמעית את ידידנו אבי - הוא ורק הוא. אמנם תא אלף ותא בית יכולים להיות שייכים בפוטנציה גם לייצוג של אבא או של אבנר, אך תא יוד-שלישי פותר בפעילותו את אי-הוודאות ומשאיר לנו רק את האפשרות שאנו רואים את אבי.

מטפורה זו כמובן פשטנית מאוד - צריך להביא בחשבון שבכל תמונה שאנו רואים משתתפים לפחות כמיליון תאי עצב - אבל מטרתה להמחיש איך בעזרת הפעילות הקבוצתית מגיעה יכולת הייצוג של המוח לממדים עצומים כל כך, שלמעשה אינם מציבים כל מגבלה על יכולת הייצוג של כל תמונה או של כל חוויה מודעת אחרת. כלומר, בעזרת הייצוג הקבוצתי בעצם פתרנו את בעיית העושר הייצוגי העצום של העולם המודע.

מהי קבוצה?

במבט שטחי אפשר לטעון שבאמצעות הרעיון של הייצוג הקבוצתי בנינו הפעם תיאוריה אלגנטית עבור הקשר שבין פעילות תאי העצב והחוויה המודעת, תיאוריה שתוכל להסביר הופעה של כל מחשבה, רגש, תחושה וזיכרון שעולים בנו. עבור כל תוכן מסוים שעולה בתודעתנו מתעוררת קבוצת תאים המתמחה בו. אזכיר שוב שמטרתנו אינה להסביר מדוע פעילות חשמלית בקבוצה של תאי עצב 'הופכת' לחוויה פרטית מודעת. בשלב זה, וייתכן שגם בעתיד, הסבר כזה הוא מעל ליכולתנו. אבל עוד לפני שנחגוג את קיומה של תיאוריה אלגנטית שמתארת את הקשר בין המוח לתודעה, מבט מעמיק יותר בפתרון יגלה לנו שעדיין נשארו לפנינו כמה בעיות עמוקות ומאתגרות מאוד.

בעיה מרכזית אך מתעתעת מאוד נוגעת לשאלה: מה המנגנון המוחי שיודע שאוסף תאי עצב הפועלים יחד במערכת הראייה הם בעצם קבוצה שיוצרת תמונה? חשוב לשים לב שעד עתה, כשניסינו לבחון ולהבין מה קורה במוח, למשל כאשר אנחנו רואים פרצוף, הבחינה הייתה מנקודת מבט חיצונית. אנחנו המדענים - במסגרת המחקר על פעילות המוח - מדרנו את האותות החשמליים שתאי העצב משדרים. חשוב לשים לב שבהתבוננות זו אנו מתפקדים כצופים חיצוניים, והמוח שאנו חוקרים הוא אובייקט פיזיקלי כמו כל אובייקט אחר בעולם הציבורי. מתוך ההתבוננות הזאת מבחוץ אנו שמים לב שקבוצת תאים החלו לפעול ביחד - ועקב פעילות בו זמנית זו אנחנו, החוקרים, מחליטים להגדיר את אוסף התאים האלה כקבוצה בעלת משמעות. אבל מה בעצם קורה מנקודת המבט של אותו אינדיבידואל שבמוחו מתחוללת הפעילות הקבוצתית הזאת? כיצד הוא יודע שאוסף התאים הפעילים יצר קבוצה משמעותית? נזכור שאחד המאפיינים המרכזיים של עולם החוויות הוא הישירות - דהיינו האדם חווה את פעילות תאי העצב שלו בצורה ישירה, בלי להזדקק למתבונן או למתווך חיצוני שיסתכל על פעילות תאי העצב ויחליט מי הן הקבוצות הפעילות ואילו תאי עצב שייכים להן. כיצד אם כן יכול המוח עצמו לדעת שקבוצת תאים פועלת בתוכו וכתוצאה מכך להרגיש את התמונה או כל חוויה אחרת הקשורה לפעולה הקבוצתית?

תשובה אחת שמתבקשת מיד היא שמדובר בהתפלספות גרידא - מעצם זה שהתאים פועלים בו בזמן נובעת ההגדרה שלהם כקבוצה. אבל אם נחשוב קצת על המשמעות של פתרון זה, נראה שהוא מוביל למצבים אבסורדיים. למשל, אם כל מה שמגדיר קבוצה כפעילה הוא הפעילות החשמלית של תאי העצב, נצטרך להוסיף לקבוצה היוצרת את תמונת הפרצוף גם תאי עצב של המעי הגס או של מנגנון ויסות לחץ הדם, שבמקרה פועלים באותו זמן כמו תאי ראיית הפרצופים. ומה בעצם קובע שתאי העצב במוחו של השותף שלי למשרד - שבדיוק נזכר בארוחה שאכל אתמול - לא יוגדרו גם הם כשותפים בקבוצה? הרי

גם הם פועלים באותו הזמן. ברור שמה שהו בפתרון הפשטני שכל מה שנדרש הוא פעילות בו זמנית גרידא אינו מספיק. נדרש מנגנון שילכד בצורה ייחודית קבוצת תאי עצב מיוחדת לייצוג אחד משמעותי. אם כן, מה יכול חקר המוח לתרום בגילוי של מנגנון מלכד שכזה?

הצופה הקטן שבתוכנו

כששוקלים איזה מנגנון יכול לבטא את ההשתייכות של אוסף תאי עצב לקבוצה בעלת משמעות - אפשרות אחת שעולה מיד היא שאת תפקיד המתבונן החיצוני מבצע אזור אחר במוח - אזור 'גבוה' יותר מבחינה תפקודית שמטרתו לזהות את הפעילויות הקבוצתיות באזורים 'נמוכים' יותר. רעיון זה מושך מכמה סיבות. ראשית, הוא בעצם מעביר את תפקיד חוקר המוח לאזור במוח שממלא את תפקיד המתבונן, כך שלכאורה יש כאן המשך הגיוני לצורת ההסתכלות הטבעית שלנו על פעילות המוח. שנית, יש לנו מצבי תודעה מסוימים שבהם אנחנו באמת יכולים להיות מודעים לא רק לחוויה הראשונית שלנו - למשל שטעמנו משהו מתוק - אלא גם לעובדה שאנו יודעים שחווינו מתיקות ולעובדה שאנו יודעים שאנחנו יודעים שחווינו מתיקות וכן הלאה. במקרים אלה אנחנו חווים חוויה ברורה שיש בתוכנו מעין 'אני מתבונן' שמסתכל מגבוה על החוויה הראשונית. אם כן, מתבקש שאזור אחר במוח ימלא את תפקיד המתבונן ובזאת יפתור את בעיית הלכידות הקבוצתית. יתרה מזאת, אחת מההתפתחויות המעניינות במחקר מוח האדם בשנים האחרונות הייתה חשיפתה של רשת מרכזי מוח - שנראה שהיא קשורה בצורה זו או אחרת לחוויית ה'אני'. רשת זו, שאפשר לקרוא לה 'הרשת המופנמת', מתמחה בייצוגים פנימיים שקשורים לעצמי, כמו זיכרונות אוטוביוגרפיים, מחשבות על העתיד ומחשבות על העצמי, ונקראת גם 'מערכת הדיפולט'.

נראה אם כך שניתן לפתור את בעיית התודעה על ידי הוספת המערכת המופנמת כמנגנון עליון המתבונן על פעילותן של קבוצות תאי עצב ומקנה להן את המאפיין המשמעותי החווייתי. אך למרבה הצער, הרעיון של האני המתבונן וייצוגו במוח מעורר כמה בעיות עמוקות שפוסלות אותו כמנגנון כללי של תודעה.

היסחפות

ראשית כול לא ברור איך לתרגם את תהליך 'ההסתכלות על' הפעילות שבאזורי הראייה למנגנון עצבי קונקרטי. אם למשל נקציב תא עצב עליון מיוחד לכל קבוצת תאים אפשרית באזור הראייה, נחזור לבעיית תא הסבתא, אלא שפשוט נעביר אותו לאזור גבוה יותר; אם ננסה לפתור את הבעיה על ידי קבוצת תאים, נחזור לשאלה איזה אזור גבוה מלכד את קבוצת התאים המתבוננת; וזהו כמובן מעגל שלא נגמר. לבסוף, אם ננסה לבנות תאים מכלילים - שמבטאים איכשהו רק את העובדה שנוצרה קבוצה כלשהי - לא ברור כיצד ידע תא מכליל כזה להבדיל בין קבוצה פעילה לתאים אחרים שפעילים באותו הזמן אך אינם קשורים לקבוצה.

אפשר לטעון - ובצדק - שגם אם לא הצלחנו כרגע להבין איך מנגנון 'מתבונן' כזה פועל, ייתכן שבעתיד הוא יתבהר. אבל ישנם טיעונים משמעותיים נוספים שמקשים לקבל את הרעיון. בעיה עמוקה

קשורה לעצם ההגדרה של מצבי תודעה. כפי שהגדרתי אותם בתחילת המאמר, כל תופעה פרטית הנחוות באופן ישיר שייכת לעולם התודעה. צריך לשים לב שבהגדרה הרחבה הזאת לא מופיעים האינדיבידואל או העצמי המתבונן כאלמנט הכרחי של מודעות. הרעיון שתיתכן מודעות בלי שאנו עצמנו נהיה נוכחים בזמן החוויה נשמע בתחילה מופרך ואפילו אבסורדי. אבל אם נעמיק בדבר נראה שישנם מצבי תודעה שבהם נדמה שהאני המתבונן נעלם או עובר לרקע. במצבים אלה - שניתן לכנות אותם 'מצבי היסחפות' – החוויה הראשונית עוצמתית כל כך, עד שאנחנו 'מאבדים את עצמנו' בתוכה. חוויות מיסטיות ואמנותיות הן דוגמה למקרי קיצון כאלה, אבל אפילו מצבים קצת פרוזאיים יותר של סרט סוחף או של משחק כדורגל יכולים להביא אותנו למצב כזה של 'איבוד העצמי'.

כאן המקום להערה קצת טכנית אבל חשובה בנוגע להגדרות ולחשיבותן - במיוחד בשדה של חקר התודעה. קיימות תיאוריות של מודעות הכוללות בעצם ההגדרה של החוויה המודעת את העובדה שיש 'אני' שמתבונן בה. אפשר לראות הדהוד להגדרה כזאת אפילו אצל דקארט, שראה בתודעה אישוש לקיום ה'אני'. תיאוריות כאלה נקראות 'תיאוריות מסדר גבוה של התודעה'. עצם הדרישה בהן של קיום 'אני' מתבונן כחלק מהגדרת המודעות מחייבת, מעצם ההגדרה, מעורבות בצורה זו או אחרת של מגנוני ייצוג של העצמי המתבונן במוח. הבעיה כמובן היא שמצבי היסחפות על פי תיאוריות אלה הינם מצבים של אובדן הכרה - ולכן לטעמי הגדרה כזאת של התודעה היא מצמצמת יתר על המידה.

אם נחזור להגדרת מצבי התודעה הרחבה יותר שהצעתי בתחילת המאמר, אין ספק שאנחנו נמצאים בהכרה ובתודעה מלאה במצב של היסחפות: ברגעים כאלה אנו חווים אירוע ישיר ופרטי, ויותר מכך, ניתן בהחלט לטעון שהחוויה במצב של היסחפות היא אף עוצמתית יותר ומוכחנת מכל חוויה מודעת אחרת. עם זאת, יש לנו בהחלט תחושה במצב של היסחפות – שהמודעות לאותו 'אני מתבונן' מתפוגגת דווקא כשהחוויה המודעת היא סוחפת ובמלוא עוצמתה.

מעניין שהמחקר של פעילות המוח במצב של היסחפות מגלה מקבילה ישירה בין החוויה של 'איבוד העצמי' ובין התנהגות הייצוגים במוח. כאשר משחזרים מצב היסחפות במוח, אחת התופעות הברורות ביותר היא דיכוי של אותה רשת מופנמת שהזכרתי קודם - רשת הדיפולט - במצבים כאלה. המוח מאבד את ייצוגי העצמי שלו במקביל עם ההיסחפות שלנו בתוך החוויה.

בעיית המדידה בחקר המודעות

צריך להבין שישנה בעיה מובנית המקשה מאוד על מחקרי התודעה, ואפשר לקרוא לה 'בעיית המדידה' - בהקבלה לבעיה דומה המופיעה במחקרים של תופעות קוונטיות. הבעיה נעוצה באופי הפרטי לגמרי של החוויה המודעת. כלומר, לי כחוקר מוח אין אפשרות לדעת מה החוויה העוברת על הנבדקים, אלא אם כן הם ידווחו לי עליה בצורה זו או אחרת. בחיפוש הקשר בין המוח לתודעה אנו חייבים לקבל איזושהו דיווח ממושאי המחקר שלנו על עוצמת החוויה שהם עוברים ועל תכניה. ההכרח להסתמך על דיווח מעורר בעיה מתודולוגית קשה מאוד בנוגע לאפשרות להפריד בין פעילות המוח הנוגעת לחוויה עצמה לפעילות הנוגעת לדיווח שבא בעקבותיה.

ניתן להמחיש זאת בניסוי של תפיסה ראייתית. בניסוי אנו מציגים לנבדקים תמונות ברמות שונות של טשטוש ומבקשים מהם ללחוץ על כפתור ברגע שהם מצליחים לראות פרצוף למרות הטשטוש. אם נבדוק מה קורא במוח כאשר הנבדקים מזהים את הפרצוף, נגלה שהמקום במוח שמבטא בצורה הנאמנה ביותר את הופעת הפרצוף הוא דווקא מרכז השליטה על תנועת היד או, נכון יותר, המרכז השולט על פעולת הלחיצה על הכפתור. הסיבה לכך כמובן אינה שתאי העצב הקשורים לראייה נמצאים במרכזי השליטה של היד, אלא היא נובעת מהקשר שיצרנו בין הראייה לדיווח באמצעות הלחיצה. זהו כמובן ניסוי נאיבי - ואפשר לחשוב על פתרונות מתודיים שיצמצמו את בעיית הדיווח - אך עדיין מדובר בבעיה קשה לפתרון. מחקרים שבהם מנסים לשנות בצורה מכוונת את מידת הדיווח ואת צורתו כאשר החוויה הראייתית נשארת קבועה יחסית - או כאלה שבהם ניתן לעקוף בצורות שונות את עצם הצורך בדיווח - מצביעים על כך שמערכת הראייה היא מרכז הפעילות המרכזי הקשור לחוויית הראייה עצמה. לעומת זאת, מנגנוני מוח גבוהים יותר, הנמצאים למשל באונות הקדמיות, קשורים בהיבטים השונים של הדיווח ולא בהכרח לעצם חוויית הראייה ה'טהורה'. עם זאת, חשוב לציין ששאלת המדידה נשארה אחת הבעיות העמוקות שנתרו לא פתורות בחקר המוח והמודעות.

מודעות במוח הפגוע

גישה אחרת לבדיקת חשיבותו של 'האזור המתבונן' נשענת על הסתכלות בחולים פגועי מוח - אם כתוצאה מתאונה ואם כתוצאה משטפי דם וכדומה. אם למרכזי מוח באונות הקדמיות יש תפקיד מכריע ביצירת התמונה הראייתית, נצפה שבדומה לפגיעות במערכת הראייה בעצמה, פגיעות אלו יובילו לעיוורון. אך התמונה העולה ממספר גדול של מחקרים על פגיעות מוח קדמיות מסוגים שונים מובילה למסקנה ברורה, שפגיעות באונות הקדמיות - אפילו אם הן נרחבות ביותר - אינן מובילות לעיוורון. פגיעות כאלה יכולות לגרום קשיים מרובים בפונקציות גבוהות, כמו למשל קבלת החלטות, יוזמה, דיבור ואפילו מבנה האישיות, אבל אין דיווחים על עיוורון שנגרם כתוצאה מנזק במערכות הנמצאות מחוץ למערכת הראייה.

סוג אחר של פגיעות מוח מחוץ למערכת הראייה, שנראה רלוונטי מאוד לענייננו, הוא פגיעות באונה הקודקודית (הפריאטלית). פגיעות אלו גורמות קשיים חמורים ביכולת להפנות קשב, ואכן הסובלים מפגיעה זו מתנהגים במקרים רבים כאילו הם עיוורים בהתייחס לחלק משדה הראייה שלפניהם. הם יתעלמו מחצי שדה הראייה שלהם ויתקשו בהתייחסות אליו, תופעה הנקראת 'הזנחה'. היבט מעניין וחשוב מאוד לדיון הנוכחי בנוגע לתופעת ההזנחה הוא שתופעות אלו קשות במיוחד כשהפגיעה מערכת רק המיספרה אחת של המוח - בדרך כלל ההמיספרה הימנית. באופן מפתיע, כאשר הפגיעה היא דו-צדדית, ההזנחה שונה בצורה משמעותית ומתבטאת בעיקר בקשיים בהתמקדות באובייקט אחד ובהעברת הקשב מאובייקט לאובייקט. הנקודה החשובה היא שמבחינת חוויית הראייה - החולים הסובלים מפגיעה דו צדית אינם עיוורים. אף על פי שפגיעת המוח הדו-צדית נרחבת יותר מאשר פגיעה חד-צדדית, הנפגעים יכולים לראות ולדווח על התמונות שהם רואים. תופעה זו מלמדת אותנו שהעיוורון במצב של הזנחה נובע מתחרות בין שתי ההמיספרות - שבה ההמיספרה השמאלית, המייצגת את צד ימין של העולם

הראייתי, מושכת לעצמה את עיקר הקשב - אך חוסר קשב זה אינו נגרם כתוצאה מאיבוד היכולת ליצור תמונות בתודעה.

לסיכום, הרעיון שחויית הראייה נפתרת באמצעות 'האני המתבונן' - כלומר מנגנוני מוח גבוהים מחוץ למערכת הראייה - הוא מעניין ואף משמש בסיס לכמה תיאוריות של תודעה שנקראות 'תיאוריות גלובליות', בדיוק משום הישענותן על מנגנונים חוץ-ראייתיים וכלל-מוחיים. אבל בחינה של מכלול המחקרים והגישות שניסו לבדוק בצורות שונות את ההיתכנות של הרעיון מביאה למסקנה שתפקידו של האני המתבונן אינו מכריע בתהליך יצירת התמונה המודעת.

השתקפויות עצביות

אם מנגנונים גבוהים הנמצאים מחוץ למערכת הראייה אינם הכרחיים לחוויה הראייתית כשלעצמה, אנו נאלצים לחזור ולהתמודד עם השאלה: מה הופך את קבוצת תאי העצב הפעילים במערכת הראייה לקבוצה מלוכדת שמבטאת תמונה המופיעה בתודעה?

אפשרות מעניינת, אם כי במידה מסוימת קצת פרדוקסלית (וזה אולי גם יתרונה), היא האפשרות שקבוצת תאי העצב 'קוראת את עצמה' ועל ידי קריאה פנימית כזאת מתלכדת והופכת ליחידת ייצוג מודעת. כיצד יכולה מערכת לקרוא את עצמה? מבחינה הנדסית התופעה למעשה נפוצה ומוכרת מאוד ונקראת 'מערכת של היזון חוזר'. במערכת של היזון חוזר, האותות שאלמנט במערכת - למשל תא עצב - מייצר בתור פלט מוחזרים לאותו תא עצב ומהווים עבורו חלק מהקלט, שתורם על ידי כך לשינוי הפלט של התא וכן הלאה. במצב של היזון חוזר חיובי, האותות שמייצר תא העצב מוחזרים אליו בצורת קלט שמגביר את האותות שהוא מייצר עוד יותר וכך הלאה.

מעניין שאם נתבונן במבנה של קליפת המוח - שהיא האיבר המוחי הקשור באופן הישיר ביותר לתוכני התודעה (למשל מערכת הראייה ההיררכית שבה דנו בתחילת הפרק נמצאת בקליפת המוח) - נראה שהיא ממש מתמחה ביצירת מעגלי היזון חוזר חיוביים. קליפת המוח מכילה ריכוז דחוס במיוחד של קשרים עצביים הדדיים בין תאי עצב שכנים. אם נבחן במיקרוסקופ לאן נשלחים עיקר האותות של תא עצב טיפוסי בקליפת המוח, נגלה שבראש ובראשונה הם נשלחים לשכנים הקרובים של אותו תא עצב. ניזכר שתאים שכנים בקליפת המוח גם מייצגים תכנים דומים בחוויה - למשל אותם תאי עצב שמייצגים את חויית הראייה של פרצוף מסוים ממוקמים בשכנות זה לזה. אם נחבר את שתי התופעות האלו יחד - אנו רואים שבמצב של הפעלתה של קבוצת תאי עצב, באופן טבעי - כתוצאה מהמבנה הבסיסי של השלוחות שלהם - הם מעוררים זה את זה. כל עירור חזק של קבוצת תאי עצב שכנים מייצר הפעלה הדדית - מעין השתקפות עצבית של כל התאים המעורבים ביצירת התמונה. באופן מטפורי אפשר לדמות את התהליך, שבו תאי העצב מפעילים זה את זה במנגנון של היזון חוזר חיובי, לתהליך של הצתה או של התלקחות. כאשר תא עצב נמצא במערכת מתלקחת, האותות שהוא משדר לשכניו חוזרים אליו דרך הגברת הפעילות של השכנים ומעוררים אותו עוד יותר. העירור ההדדי הזה מביא לעלייה מהירה בפעילות הקבוצה, שניתן לדמותה להתפרצות של "אש" עצבית. לכאורה ניתן לחשוש, בהמשך למטפורה של ההצתה, שאותה אש עצבית תפשט על פני כל המוח, אבל למזלנו ישנם מנגנוני כיבוי אוטומטיים -

תאי עצב שמודדים את מידת הפעילות הכללית, ואם היא עוברת סף מסוכן, משדרים אותות שמעכבים אותה במהירות רבה. במקרים פתולוגיים של מחלת הנפילה-אפילפסיה - מנגנוני הכיבוי האלה אינם תקינים, והתוצאה היא באמת התפשטות לא מרוסנת של פעילות בכל המוח, המובילה לאיבוד הכרה, לעוויתות קשות וכדומה.

נבחן עכשיו כיצד תהליך כזה של הצתה עצבית יכול לממש את ההפיכה של תאי עצב בודדים לקבוצה מאוחדת. נשאל שאלה פשוטה: עד כמה אפשר להבחין, בתוך ממטר האותות שמגיעים לתא מסוים השייך לקבוצה פעילה, בזהות התאים הבודדים שתרמו למקבץ האותות האלה. אם ננסה לעקוב אחרי האותות ששולח תא בודד, נראה שאין שום דרך לבצע הבחנה כזאת. האותות שמייצר תא עצב מסוים הם תוצר ישיר של איחוד – מעין התכה ביחד- של האותות של התאים השכנים, אבל בתוך התרכובת הזאת נמצאים גם האותות של אותו תא עצמו, שנלחו על ידיו אל השכנים וכעת מוחזרים אליו מפני שכמו שראינו, במערכת של היזון חוזר חיובי הפעילות של התא חוזרת אליו בצורת חלק מהקלט שמפעיל אותו. תופעה זו שונה מהעיבוד ההיררכי, שבו תא מחבר את האותות של תאי העצב שמתחתיו וישנה הפרדה בין הפלט של התא שנשלח הלאה ובין הקלטים השונים שמגיעים מתחנות מוקדמות בהיררכיה. לא כך במערכת של הפעלה הדדית. במקרה זה הקלטים שמקבל התא מכילים בתוכם גם את הפלט שיצר אותו והוא וחוזר חלילה.

ובכן, נראה שתהליך ההשתקפות ההדדי הוא בעל מאפיינים ייחודיים המאפשרים איחוד מלא בין האותות של כל תאי העצב בקבוצה, באופן שהמידע מהי התרומה הפרטנית של כל תא עצב לפעילות הקבוצתית מתמוסס. במובן זה, ההפעלה ההדדית של תאי העצב בקבוצה מלכדת את אוסף התאים - שלפני תהליך ההצתה פעלו כל אחד בצורה מובחנת - לידי קבוצה מאוחדת. הרעיון הוא אם כך שההפעלה ההדדית של תאי העצב, שנוצרת עקב החיבורים העצביים ביניהם, מממשת את היווצרות החוויה הייחודית שאותה קבוצה מייצגת. בהמשך למטפורת האותיות והמילה, כאשר קבוצת תאים כזאת עוברת הצתה על ידי הפעלה הדדית, האותיות הבודדות מתחברות למילה בעלת משמעות והתמונה מופיעה בתודעתנו.

חשוב להדגיש שהקבוצה הייחודית ממומשת על ידי פעילות בעוד שהקשרים העצביים המבניים נרחבים הרבה יותר ומאפשרים גמישות רבה בבחירת המשתתפים בהפעלות ההדדיות האפשריות. במילים אחרות, זהות תאי העצב המשתתפים בהפעלה ההדדית יכולה להשתנות וכך ליצור מגוון עצום של קבוצות שונות, מה שמסביר את העושר האסטרונומי של תוכני התודעה השונים.

המוח המפוצל

מתוך הדיון עד כה עולה שלקשרים ההדדיים בין תאי עצב ישנה חשיבות מכריעה ביצירת החוויה המודעת. שאלה מרתקת היא: מה קורה אם קשרים אלו בין תאי העצב נחתכים, כך שלא מתאפשרת תקשורת הדדית ביניהם? אם החוויה המודעת היא תוצר של השתקפות הדדית בין תאי עצב, חיתוך מסיבי של קווי התקשורת האלה אמור לחולל שינוי דרמטי במצב התודעה. ואמנם, התופעה של חיתוך

החיבורים בין תאי עצב במוח קשורה לאחת התגליות העמוקות והמעניינות ביותר בתחום המוח והתודעה האנושית.

הזכרתי כבר את הסכנה של 'הצתה' בלתי מבוקרת של פעילות תאי העצב שגורמת לאיבוד הכרה ולסימפטומים מוטוריים קשים של מחלת הנפילה. מתברר שאחת הפרוצדורות לטיפול במקרים קשים במיוחד של מחלת הנפילה כרוכה בניחוח מוח שבו הרופא חותך את סיבי העצב המקשרים בין ההמיספרה הימנית והשמאלית. כתוצאה מפיצול כירורגי זה, התפרצות ההתקף שמתחוללת בהמיספרה אחת של המוח אינה יכולה להתפשט להמיספרה האחרת.

כאמור, אם ההשערה של ההשתקפויות העצביות נכונה, ניתוח מסיבי כזה אמור להשפיע בצורה דרמטית על מצב התודעה של החולה. מה אם כן קורה לחולים שעוברים ניתוח כזה של פיצול מוח? באופן מפתיע, הדיווחים הראשונים של החולים עצמם וגם של קרוביהם היו די מינוריים, ובהחלט לא נראה שקורה משהו עמוק בעולם החווייתי שלהם. אבל בהמשך, בסדרת ניסויים מבריקה שביצעו המדענים ספארי (שזכה עבור מחקרים אלה בפרס נובל) וגזניגה, הם הצליחו להראות שלמעשה ניתוח הקשרים העצביים בין שני צדי המוח יוצר תופעה מדהימה, שבה שתי תודעות נפרדות מתקיימות בצורה עצמאית, בלי לדעת זו על קיומה של זו, בתוך אותה גולגולת! כך למשל כאשר הציגו לחולה בעל המוח המפוצל תמונה של חפץ שהגיעה רק להמיספרה הימנית שלו, הוא לא הצליח לבטא את שם החפץ שראה, אך היה יכול להצביע - ביד שמאל - על החפץ הנכון מתוך קבוצה של חפצים. אם תמונת החפץ הוצגה באופן שרק ההמיספרה השמאלית ראתה אותה, החולה אמר ללא קושי את שם החפץ, אך לא הצליח להצביע עליו ביד שמאל, אלא רק ביד ימין. בסדרת בדיקות ומחקרים הלכה והתבררה הסיבה להתנהגות מוזרה זו. היא נובעת מהעובדה שמרכז הדיבור של האדם נמצא בדרך כלל בהמיספרה השמאלית. עקב ניתוח הקשרים, התודעה הנפרדת ה'מתגוררת' בהמיספרה שמאל לא ראתה את התמונה שהוצגה להמיספרה הימנית ולכן לא יכלה לדווח עליה. נוסף על כך, ההפעלה של הידיים נעשית באופן מוצלב - כלומר ההמיספרה השמאלית אחראית על הפעלת יד ימין ולהפך. לכן, כאשר המידע הגיע לתודעה ה'מתגוררת' בהמיספרה הימנית, הצליח החולה להצביע על החפץ ביד שמאל אך לא יכל לדבר, כי חסר לו מרכז הדיבור. בדרך כלל אצל חולים שעברו ניתוח של פיצול מוח, ההמיספרה המתקשרת עם העולם היא השמאלית - שאפילו לא יודעת על קיומה של תודעה נפרדת בהמיספרה הימנית, כך שמבחינתה עולם כמנהגו נוהג. במקרים נדירים ודרמטיים מאוד, הקיום של שתי תודעות נפרדות בא לביטוי בהתנהגות, ושתי הידיים ממש נאבקות זו בזו כאשר כל תודעה מנסה לבצע מטלה אחרת בו בזמן.

יש כאן את אחת ההדגמות המשכנעות והדרמטיות ביותר לחשיבותו של הקשר בין תאי העצב ליצירת תודעה מאוחדת - והוא מתאים היטב לרעיון שבבסיס התודעה נמצא תהליך של הפעלה הדדית המוביל ל'הצתה' עצבית, אם כי לא מוכיח אותו.

התלקחויות אור-קוליות

נראה לכאורה שכמו בספר בלשי טוב, הגענו לסצנת הסיום שבה כל החוטים מתחברים והחידה נפתרת סוף כל סוף. נסכם איפה אנו עומדים ונאמר שהרעיון שאני מציע הוא שהחוויה המודעת מפציעה כאשר קבוצה של תאי עצב 'מתלקחים' בתהליך של הפעלה הדדית, המוביל להתפרצות של פעילות עצבית. בהתפרצות זו הופכים אוסף תאי עצב שהיו נפרדים ועצמאיים ליחידת פעולה משותפת שמממשת את החוויה המודעת. חשוב להדגיש שאף על פי שהתמקדתי בתהליך הראייה כבסיס לפיתוח התיאוריה, הרעיון של התלקחות עצבית אמור להתאים לכל העושר העצום של החוויות המודעות שאנו מסוגלים לו. מה שמבדיל בין התכנים השונים של החוויה – למשל בין ראייה של פרצוף לשמיעת צליל של פעמון או לחלופין מחשבה על התלקחות עצבית - הוא המיקום של תאי העצב שמעורבים בהתלקחות - ראייה קשורה להתלקחות באונה האחורית, באזורי הראייה הרלוונטיים, בעוד שצליל הפעמון קשור להתלקחות עצבית בקבוצת תאים במערכת השמיעה, הממוקמת באונות הצדיות.

מבחנת הטעם ומבחנת הצבע

לכאורה, גילינו סוף כל סוף עיקרון אלגנטי אחד שמאחד את כל החוויות המודעות! אבל כדאי לזכור שבמדע בכלל ובחקר התודעה בפרט, כל התקדמות רק חושפת בפנינו עד כמה אנו בעצם רחוקים מתשובה מלאה (אם תשובה כזאת בכלל אפשרית). במקרה שלנו, אחת הבעיות העמוקות והבלתי פתורות נובעת בדיוק מהשאלה האור-קולית - מדוע התלקחות של קבוצות שונות של תאי עצב קשורה לחוויות שונות, ואף יותר מכך - מדוע דווקא תאי העצב שבמערכת הראייה קשורים לחוויית הראייה - ולא לשמיעה ולהפך. כדי להמחיש את הבעיה נערוך את הניסוי המחשבתי הבא. נדמיין שחקר המוח התקדם כך שאנו יכולים לזהות בדיוק את קבוצת תאי העצב שהתלקחות שלה יוצרת בתודעתנו תמונה של שקיעת השמש. יתרה מזאת, אנו יכולים, בנייתוח מוח מתוחכם, לשלוף את תאי העצב האלה על חיבוריהם ההדדיים ולהעביר אותם למבחנה. בדומה לכך אנחנו יכולים לזהות את קבוצת תאי העצב הקשורים לטעם אפרסק ולהעביר אף אותם על מכלול החיבורים ביניהם למבחנה שנייה. כעת נעורר התלקחות עצבית במבחנת האפרסק - האם נצפה שתתעורר חוויה פרטית וישירה של אפרסק אצל התאים שבמבחנה? הרעיון נשמע מופרך למדי, אבל אם נניח שאמנם כך יקרה - כפי שנדרש מפרשנות פשוטה של רעיון ההתלקחות - מה יקרה אם כן אם נעורר התלקחות במבחנה השנייה, מבחנת השקיעה? במקרה זה נצפה, בהתאמה, שתיווצר חוויה פרטית וישירה של שקיעת שמש במבחנה של תאי עצב אלו. השאלה העמוקה העולה מניסוי דמיוני זה היא: מה בעצם שונה כל כך בין קבוצות תאי העצב המצויים בשתי המבחנות, שמביא לכך שבכל מבחנה ייווצרו חוויות שונות כל כך?

כפי שאפשר לנחש, אנחנו רחוקים מרחק רב מאוד מתשובה לשאלה מאתגרת זו. עם זאת, מעניין לדון בתשובות אפשרויות, אפילו אם התשובה האמיתית אינה בנמצא אפילו בטווח הנראה לעין. אפשרות אחת היא שהסיבה להבדלים בחוויה היא פנימית לקבוצות תאי העצב. כלומר, ההבדלים שיוצרים את ההבדל בחוויה כבר נמצאים במבחנות שבהן תאי העצב המיוחדים והחיבורים ביניהם. אם (תזכורת, מדובר בניסוי מדומיין לגמרי) יכלו המבחנות לספר לנו על החוויה שהן עוברות, הייתה מבחנה אחת אומרת על פי רעיון זה: 'איזה טעם אפרסק נפלא', והמבחנה האחרת הייתה אומרת, 'איזו שקיעת

שמש מקסימה'. הבדלים פנימיים יכולים למשל להתבטא במגוון שונה של חיבורים בין תאי העצב, בתמהיל שונה של חומרים כימיים שמתווכים חיבורים אלו ואפילו, אולי, במגוון שונה של חלבונים או של אבני בניין אחרות שמרכיבים את תאי העצב השונים שבכל קבוצה. אף שהאפשרות הזאת אינה ניתנת לשליטה בשלב זה, נזכור שרעיון כזה דורש תמהיל כימי שונה ומבנה קשרים ייחודי עבור כל קבוצת עבודה וכל תוכן, וייתכן שזו דרישה קשה מדי.

אמור לי איפה אתה ואומר לך מה אתה מרגיש

פתרון אחר יחפש את ההבדלים בין תוכני החוויות השונות במיקום השונה של הקבוצה הפעילה ביחס לשאר המוח. במקרה כזה נצפה שהחוויה הייחודית בכל אחת מהמבחנות תיעלם, מפני שאין באפשרות קבוצת תאי העצב הנמצאת במבחנה למקם את עצמה ביחס לשאר המוח, שממנו היא מנותקת. במילים אחרות, ההנחה כאן היא שמה שקובע את תוכן החוויה אינו רק העובדה שקבוצת תאים מסוימת עברה הצתה, אלא גם העובדה שפעילות זו קרתה על רקע שקט בשאר המוח. גישה זו דומה במקצת לשיטת ניווט שבה המיקום נקבע על פי היחס של הצופה לנקודות ציון המפוזרות סביבו. שיטה יחסותית כזו פותחת הרחבה מסיבית של מספר התכנים האפשריים, גם אם קבוצות התאים בכל רשת שנדלקת דומות זו לזו בתכונותיהן הפנימיות. על פי רעיון זה, חוויית הראייה נוצרת, למשל, כאשר נדלקת קבוצת תאים מקומית במערכת הראייה, אבל רק בתנאי שבאותו זמן נשארות מערכת השמיעה, הטעם והמימוש וכדומה כבויות.

אם הרעיון של מיקום ההצתה המקומית ביחס למסגרת הכללית של המוח הוא נכון - נשאלת השאלה מהו המנגנון העצבי שיכול 'לאותת' לשאר המוח הלא פעיל על העובדה שמתחוללת הצתה באחת ממערכותיו. האם ישנם אותות שכל מטרתם עדכון שאר המוח לגבי הצתות מקומיות שמתעוררות בו? בדיקה של פעילות המוח במצבים של ראיית תמונות אמנם מגלה שבמקביל להצתה מקומית, ישנה התפשטות מהירה מאוד של אותות חלשים לחלקים נרחבים של המוח שנשארים שקטים יחסית. התפשטות מהירה ונרחבת כזאת יכולה אולי לממש את המיקום של ההצתה המקומית בתוך ההקשר של שאר המוח.

הפוטנציאל כמרכיב בבניית החוויה

אפשרות מסקרנת נוספת היא דמיונית וקשה להמשגה אף יותר מתהליך האיתות הנרחב. הרעיון כאן הוא שעצם הקיום של קשרים עצביים תקינים - אפילו אם אינם פעילים - הוא כשלעצמו ממקם את ההתלקחות המקומית בהקשר של שאר המוח. כלומר, עצם קיום הפוטנציאל שאותות יכולים לעבור מהקבוצה שהתלקחה למקומות אחרים במוח, אפילו אם בדיעבד אותות כאלה לא עוברים, הוא כשלעצמו תורם להגדרת תוכן החוויה. משמעותו של רעיון זה מרחיקת לכת, והוא מכניס את הגורם של ההיתכנות (פוטנציאל) כמרכיב חשוב בתודעה - עוד לפני שאפילו נשלח אות כלשהו על ידי תאי העצב! אף על פי שהרעיון נשמע מופרך לגמרי, צריך לזכור שהקשר בין המודעות למוח הוא כה מסתורי ובלתי מובן, עד שייתכן בהחלט שהוא כולל בתוכו חוקיות טבע חדשה ובלתי מוכרת. מעניין שהרעיון שמבנה המערכת

כשלעצמה משחק תפקיד בקביעת תוצאות ניסיוניות אינו חדש ומהווה נדבך חשוב בתיאוריות של מכניקת הקוונטים.

היתרון ברעיון של מיקום ההתלקחות המקומית במרחב המוחי הוא העושר הגדול שהוא מאפשר ביצירת תוכני תודעה שונים - ואף בשילוב של תכנים אלו לחוויות מורכבות יותר. אך רעיון זה מעורר גם בעיות. אחת מהן היא שהוא לכאורה עומד בסתירה לעובדה שפגיעות מוח נרחבות אינן נחוות כשינוי בתודעה באזורים שלא נפגעו. למשל, אנשים שנפגעו במערכת הדיבור עקב שטף דם במוח לא חווים שינוי בתמונות שהם רואים ולפעמים אינם מודעים כלל לפגיעה המוחית שעברו עד שהם מנסים לדבר ונכשלים.

צריך להודות שבשלב זה הידע המדעי שלנו על השאלה העמוקה - מה גורם לחוויות להרגיש שונות זו מזו? - רחוקה מפתרון. מה צריך להשתנות בפעילות הנוירונים כדי לגרום לטעם להיות שונה מריח, ולריח שונה ממחשבה - התשובה ידועה רק באופן חלקי מאוד. קרוב לוודאי שמה שקובע את תוכני החוויה המודעת הוא שילוב של מאפיינים מקומיים של קבוצות תאי העצב המתלקחות עם המיקום היחסי שלהן במפה הכללית של שאר חלקי המוח. אנו נמצאים בשלב מוקדם מאוד במחקר ואף בהמשגה של שאלות אלו, ובהחלט ייתכן שהתשובה תהיה אף יותר בלתי צפויה ומפתיעה מכל מה שהזכרתי.

האם עשבים מרגישים?

שאלה מרתקת נוספת העולה מהמחקר היא שאלת האפשרות של הופעת התודעה במערכות שאינן מוח או אפילו אינן ביולוגיות. בגלל האופי הפרטי של התודעה, אנו, החוקרים, תלויים לגמרי ביכולת הדיווח על קיומה של חוויה מודעת ובאמינותו - מה שלכאורה שולל לגמרי את המחקר בכיוונים מרתקים אלו. אבל אם נחשוב בצורה קצת אופטימית יותר על התקדמות חקר התודעה בעתיד הרחוק, ואם נניח שבעקבות התקדמות כזאת במחקר תלך ותתגבש תיאוריה מוצלחת שתגלה את העיקרון המכונן של כל מצבי התודעה האפשריים במוח - ייתכן שתיאוריה כזאת תיצור עבורנו מעין 'מקפצה' לבדיקת הקיום של מצבי תודעה מחוץ למוח ובגופים שאינם יכולים לשתף אותנו בחוויות שהם עוברים.

לשם ההדגמה, נדמיין שבעתיד (הרחוק מאוד, אמהר להוסיף) יתגלה שהתופעה של התלקחות הדדית שתוארה פה אמנם נמצאת תמיד ובכל מופע של החוויה המודעת ולעולם אינה מופיעה כשאינן חוויה כזאת. במקרה כזה, פרויקט מחקר לגיטימי יהיה לבדוק אם דינמיקה כזו של התלקחות הדדית מופיעה גם במערכות אחרות שאינן מורכבות בהכרח מתאי עצב. העמדה שמדען הישר עם עצמו צריך לנקוט בנקודת הזמן הנוכחית - שבה חקר התודעה רחוק כל כך מתיאוריה משמעותית - היא עמדה של צניעות.

במילים אחרות, הבורות שלנו בהבנת מנגנוני התודעה אינה מאפשרת לנו לתמוך באפשרות שחוויה פרטית וישירה קיימת בצורה כלשהי גם במערכות לא מוחיות, אך גם אינה שוללת אותה. אם יתברר שתופעת ההתלקחות ההדדית - או תופעה אחרת שתתגלה כבסיס החוויה - נפוצה יותר בטבע מאשר אנו משערים, אין לשלול את האפשרות - המקסימה כשלעצמה - שהעולם סביבנו אפוף חוויות מודעות. באותו אופן, חקר המוח אינו יכול לשלול בשלב זה את האפשרות שהעברת אינפורמציה הדדית בקבוצה של

מוחות - כמו למשל באספה של בני אדם, אם באופן נדיר הם גם מאזינים זה לזה - יכולה להוביל לתודעה קבוצתית. כל האפשרויות האלו - דמיוניות ככל שהן נשמעות לנו - אינן נמצאות בשלב זה בסתירה מהותית למחקר המדעי, וקבלתן או שלילתן הן בגדר השערה או אמונה בלבד.

הקסם שבשיתוף

חוששני שהקורא והקוראת הנבוכים מוצאים את עצמם בשלב זה ספקנים לגמרי לגבי מה שבעצם ניתן לומר בשלב זה על המוח ועל הקשר שלו לתודעה. חשוב אם כן להזכיר שהידע שלנו ביחס למטרה הבלתי אפשרית של הבנת התודעה אמנם דל ביותר, ועם זאת מחקר המוח האנושי מתקדם במהירות מעוררת השתאות, ותגליות רבות - כפי שניסיתי להדגים, רלוונטיות ותורמות בהתקדמותנו לקראת המטרה הרחוקה הזאת. אדגיש אם כך, לסיכום, מה בכל זאת למדנו מהתגליות האחרונות בחקר מוח האדם. נראה לי ששתי תובנות עיקריות עולות מגוף המחקר המרשים הזה: ראשית, שפעילות המוח - באופן הניתן למדידה ולמחקר - באמת מתגלה שוב ושוב כצמודה באופן הדוק להפצעת החוויה המודעת ולתוכני החוויה השונים. שנית, הופעת החוויה המודעת קשורה לשיתוף קבוצתי - להתכה של פעילות פרטנית של תאי העצב הבודדים אל תוך ביטוי קבוצתי כולל. מרתק לחשוב שרעיון השיתוף וה'ביחד' - שעומד בבסיס החברה והתרבות האנושית - עולה מחדש ובאופן בלתי צפוי מתוך מחקר המוח והתודעה האנושית.