

לפעול באופן סימולטני פחות או יותר כדי שהפוטנציאל החשמלי בגוף התא יחצה את הסף. לכן צריך לחשוב על סינפסה בודדת כנקודת כניסה אחת אל התא, נקודת כניסה מעוררת או מעכבת; "קול" אחד (בעד או נגד) הנספר על ידי תא העצב במורד הזרם. אם סך כל הקולות הוא מעל לסף, תא העצב אומר "הן" ופולט פוטנציאל פעולה. מהבחינה הזו אפשר לומר שתא העצב הבודד הנו סוֹכֵם (אינטגרטור) של מידע.¹⁹⁶

אפנון עצבי (נוירומודולציה) גלובלי. יש עוד מקור אחד לאפנון של פעילות תאי העצב בקליפת המוח: כימיקלים ה"מותזים" על קליפת המוח, כלומר משתחררים מאקסונים של תאי עצב תת-קליפתיים ומשנים באופן גלובלי את מצבם של תאי העצב בקליפה. הכימיקלים הללו נקראים נוירומודולטורים והם כוללים דופמין, סרוטונין, נוראפינפרין, אצטילכולין ואחרים. את השפעותיהן הגלובליות על פעילויות עצביות בקליפת המוח אי אפשר לסווג בקלות כפי שעשינו בדיון בסינפסות מעכבות ומעוררות. יהיה זה אולי שימושי לחשוב על נוירומודולטורים כמחוללים של שונות, אבל נשהה את הדיון בנקודה הזו; נחזור אליו בהמשך.

דוקטרינת העצב, אסוציאציות ואסכולת הרשתות

דוקטרינת העֶצֶב – תוצאת מאמץ קולקטיבי של הרכה מדענים במשך כמאה שנים – מסכמת את ההבנה שהמוח עשוי מישויות נפרדות: תאי עצב. ראשיתה בפיתוח טכנולוגיה אופטית במאה ה-19, שבזכותה אפשר היה להתבונן בדגימות ברמת הבחנה (רזולוציה) גבוהה במיוחד. הטכנולוגיה אומצה במהירות על ידי

¹⁹⁶. התהליך כולו אינו דטרמיניסטי; התפקיד הקריטי של פעילות "רועשת" או של "רעש רקע" – כלומר פעילות המתעוררת על ידי שינויים אקראיים במרכיבים הדינמיים של המערכת, בכל סקאלה וסקאלה – הוא סוגיית מחקר מרכזית בתחום הפיזיולוגיה.

חוקרי מדע החי. הפיזיולוגים המובילים בהקשר הזה הם אנשים שאת שמותיהם מזהה כל תלמיד ביולוגיה, בזכות הישויות התאיות ושיטות המחקר הנושאות אותם: ג'ן אוונג'ליסטה פורקינייה, תאודור שוואן, קמיליו גולג'י, סנטיאגו רמון אי קחאל ועוד רבים אחרים. מרגע שהובהר שהמוח עשוי מישויות נפרדות – תאי עצב, עלתה השאלה כיצד תאי העצב מתקשרים זה עם זה. באותה עת דובר על אפשרות של תקשורת כימית או חשמלית, אך היה זה צ'רלס סקוט שרינגטון, ממש לפני שנת 1900, שהעניק שם למרווח הצר בין שני תאי עצב, בנקודת המגע ביניהם; שרינגטון כינה את נקודת המגע "סינפסה". התיאור הראשון של תקשורת כימית דרך סינפסות, רעיון מקובל אך עדיין מופשט באותה תקופה, הוצג על ידי אוטו לוי, שגילה את הכימיקל אצטילכולין בסביבות שנות ה-20 של המאה הקודמת.¹⁹⁷ ניסוחה של דוקטרינת העצב הושלם בסדרה של מחקרים שהחלו לבצע אדגר אדריאן ואינגוואה זוטרימן, שהיו הראשונים להדגים פוטנציאלי פעולה, את האופי הבינארי של פוטנציאלי פעולה ואת יכולתם לייצג תכונות של גירויים הנקלטים במערכת החישה על ידי דפוסי פעילות זמניים, כמו גם על ידי שינויים בקצב הפעילות.¹⁹⁸ סדרת המאמרים של אדריאן וזוטרימן, שנדפסה בכתב העת של החברה הפיזיולוגית באמצע שנות ה-20 של המאה הקודמת, הנה קריאת חובה לתלמידי נירופיזיולוגיה של ימינו. נדרשו עשרים וחמש שנים נוספות, ועוד מלחמת עולם, עד שאלן הודג'קין ואנדרו האקסלי, ברנרד כץ, ג'ון אקלס ואחרים

197. נציין שלוי הדגים את התהליך במערך ניסוי לבכי, מהלך שהיום קשה להעלות על הדעת מכיוון שרוב מדעני המוח שהוכשרו באסכולות אינטרדיסציפלינריות אינם מתעניינים בפיזיולוגיה כללית ומערכתית, כאילו המוח הוא איבר שאפשר להפריד בינו לבין יתר הפיזיולוגיה.

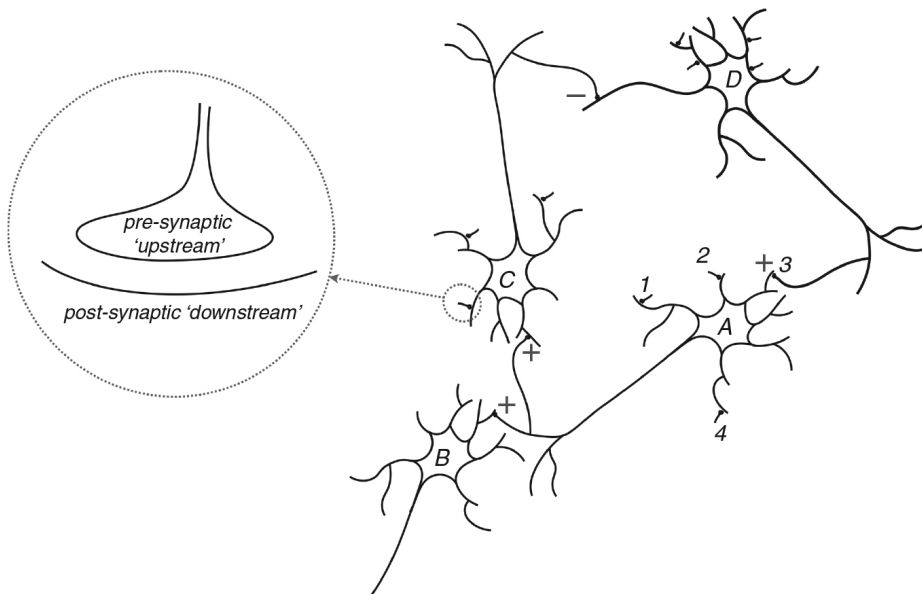
198. בעגה הפיזיולוגית, "דחף עצבי" (spike) הוא מושג נרדף לפוטנציאלי פעולה של תא עצב. הוא כמעט אינו משמש לתיאור פוטנציאלי פעולה בתאים אקסיטביליים שאינם תאי עצב.

פיצחו את המנגנון האלקטרו-כימי המחולל פוטנציאלי פעולה בסיב עצב בודד ואת תהליך ההמרה שלהם למסר כימי בסינפסות.¹⁹⁹ כך הושלם המסע לביסוס דוקטרינת העצב לפני כחצי מאה, דוקטרינה הנסמכת על שלושה מסדים: מורפולוגיה של תא העצב, יצירת דחפים עצביים חשמליים והעברה של הפעילות בין תאי העצב דרך סינפסות. רבים מהמדענים ששמותיהם הוזכרו למעלה זכו בפרס נובל בפיזיולוגיה וברפואה על תרומותיהם החשובות.²⁰⁰ בחמישים השנים שחלפו מאז ביסוסה של דוקטרינת העצב לא חלו שינויים מהותיים באופן שבו אנו מנסחים אותה, אם כי גוף עצום של מחקר הוקדש (ועודנו מוקדש) למה שאפשר לסכם כאפיון של שונות במימוש שלושת המסדים: הצורות השונות של מבנים עצביים, התצורות השונות והדינמיקה של העברת מסרים סינפטיים, והאופנים שבהם מתממש דחף עצבי בתאי עצב מסוגים שונים.

דוקטרינת העצב משקפת אחד מזרמי מחשבה הקשורים זה לזה ומהווים ההישגים המשמעותיים ביותר בחקר המוח במאה וחמישים השנים האחרונות; נסקור בקצרה את התפתחותם של שני זרמים אחרים, תורת האסוציאציה ואסכולת הרשת העצבית. העובדה שהפעלה סימולטנית של כמה סינפסות נדרשת כדי להביא תא עצב בקליפת המוח אל מעבר לסף יצירת פוטנציאל פעולה, משמעה שהתנהגות אינה ניתנת לזיהוי עם פוטנציאל פעולה יחיד הנוצר על ידי תא עצב יחיד – אפילו ההתנהגות הפשוטה ביותר שאפשר להעלות על הדעת. בהמשך חיבור זה נעשה שימוש במושג "קבוצת פעילות עצבית" כדי להתייחס

199. רוב המחקרים מתור הזהב הפיזיולוגי הזה מופיעים בספר המקורות של קוק וליפקין (Cook and Lipkin, 1972).

200. קמיליו גולג'י וסנטיאגו רמון אי קחאל בשנת 1906; צ'רלס שרינגטון ואדגר אדריאן בשנת 1932; אוטו לוי בשנת 1936; ג'ון אקלס, אלן הודג'קין ואנדרו האקסלי בשנת 1963; ברנרד כץ בשנת 1970.



איור 6: תיאור סכמתי של מקטע קטן מתוך רשת עצבית גדולה.

לקבוצות תפקודיות של פוטנציאלי פעולה המופקים על ידי אוכלוסיות של תאי עצב באופן סינכרוני (בו־זמני) או דיאכרוני (פרוש על פני זמן). קבוצות פעילות עצבית נוצרות באוכלוסיות גדולות של תאי עצב הקשורים זה לזה, קרי – רשתות עצביות (איור 6), ומשתנות לאורך החיים באופן דינמי ותלוי-פעילות, תוך הסתגלות לתכתיבי סביבה.

מושג הרשת העצבית – בשמות שונים – משמש בפסיכולוגיה מרגע לידתה כדיסציפלינה אקדמית עצמאית. תובנותיהם המעמיקות של פסיכולוגים בולטים, במרוצת ההיסטוריה של חקר המוח, משמעותיות להתפתחות מושגים עכשוויים של רשתות עצביות, תאי העצב והסינפסות ביניהם. התייחסויות מוקדמות למושג הרשת העצבית, שאינן שונות מהותית ממשמעויותיו היום, מופיעות כבר אצל ספנסר, בספרו עקרונות הפסיכולוגיה משנת 1855, ואצל ביין, בספרו נפש וגוף משנת 1874. שני המלומדים הללו ניסו לנסח את ההתנהגות במונחים של תהליכים נוירופיזיולוגיים התלויים בקווי תקשורת בין תאי עצב; את

הסתגלות ההתנהגות (למידה, אדפטציה) תיארו השניים כשינויים ב"יעילות של קשרים" בין תאי עצב. הרעיון העומד מאחורי התיאורים המוקדמים הללו של הסתגלות רשתות עצביות הנו שחוויה בוזמנית של אירועים בעולם החישה מעצבת את המרחב הפסיכולוגי של הפרט, על ידי שינוי ביעילות של מעבר אנרגיה בין תאי עצב. תפיסה זו של יצירת "אסוציאציה על ידי סימולטניות" שולטת בשיח הפסיכולוגי והנוירופיזיולוגי קרוב למאה וחמישים שנה, והיא קשורה בעבותות לעמדה האמפיריסיצטית בפילוסופיה. אלכסנדר ביין היה ככל הנראה הראשון שניסח את הרעיון הפסיכולוגי הזה במונחים מודרניים,²⁰¹ כפי שאפשר לראות במובאה מספרו נפש וגוף שפורסם כמעט עשרים וחמש שנה לפני ששרינגטון הגדיר את הסינפסה: "אפשר להניח שבתחילה כל אחד מהמעגלים ישפיע על כל האחרים במידה שווה; אבל בעקבות העובדה ששניים מהם מופעלים באופן בלתי תלוי באותו הרגע (כפי שקורה ברכישת ידע), קשר חזק יותר או חסימה חלשה יותר ייווצרו בין השניים, באמצעות שינוי בחומר התאי שביניהם..."²⁰².

במושגיו של החיבור הנוכחי, זהו תיאור של שבירת סימטריה מובהקת.

הרעיון של יצירת אסוציאציה על ידי סימולטניות שכיח

201. Wilkes and Wade (1997).

202. Bain, Mind and Body: *The Theories of Their Relation* (1874, p. 119). של ליונל ס. ביל (Beale): "Indications of the Paths Taken by the Nerve-Currents as They Traverse the Caudate Nerve-Cells of the Spinal Cord and Encephalon", שפורסם ב-*Proceedings of the Royal Society of London* (1863). הטקסט ואיורי תאי העצב וה"קשרים" ביניהם במאמרו של ביל שימשו השראה לכמה מרעיונותיו של ביין על התודעה. הקריאה במאמרו הקצר של ביל היא חוויה אסתטית מאירת עיניים, גם למלומד בן ימינו.

גם בכתביו של ג'יימס, ומתואר בניתוח היפהפה שלו למושג האסוציאציה (מתוך עקרונות הפסיכולוגיה): "אם שני תהליכים מוחיים אלמנטריים היו פעילים יחד או בזה אחר זה, כשאחד מהם מתרחש שוב, יש לו נטייה לעורר גם את האחר".²⁰³ רעיון זה מממש מופיע גם אצל פרויד, כהנחה מובלעת של מסגרתו האנליטית כולה, אך גם באופן מפורש בהקשר של רשת עצבית במתווה לפסיכולוגיה מדעית. הנה: "[...] קיים חוק בסיסי ליצירת אסוציאציה על ידי סימולטניות, שפועל בזמן פעילות Ψ טהורה [...]. אנרגיה אגורה העוברת מתא עצב α לתא עצב β , אם α ו- β הוטענו בעבר בו-זמנית מ- Φ או ממקור אחר [...], תוביל להקלה של מחסום המגע".²⁰⁴ במושגיו של פרויד, תאי Φ (ה"פיזיולוגיים") הם אלה שהסינפסות שלהם יציבות, "אינן זוכרות דבר";²⁰⁵ תאי Ψ (ה"פסיכולוגיים") הם אלה שהסינפסות שלהם נושאות זיכרון "ואולי אף תהליכים נפשיים בכלל".²⁰⁶ ג'יימס ופרויד חשבו במושגים זהים לאלה של תורת האסוציאציה ואסכולת הרשתות העצביות השולטות גם היום. בהקשר הזה, ההשוואה של שתי הסכמות באיור 7 לזו באיור 6 מדברת בעד עצמה.

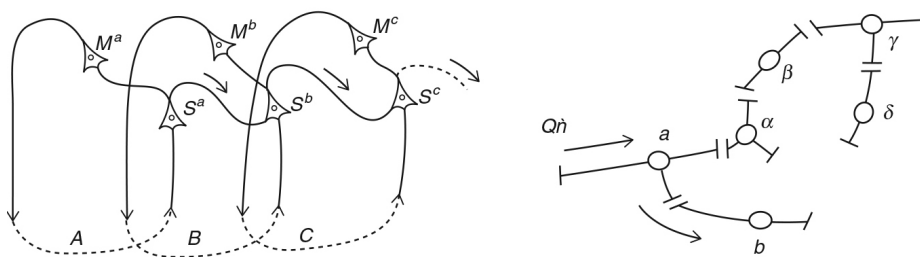
ולבסוף, הב, בספרו על ארגון ההתנהגות שיצא לאור בשנת 1949, נשמע כאילו חוזר על מילותיו של פרויד משנת 1895 בנסחו את עקרון יצירת אסוציאציה על ידי סימולטניות: "כשאקסון של תא א' קרוב מספיק כדי לעורר את תא ב' והוא משתתף בעקביות או בהתמדה בהפעלתו, מתרחש איזשהו תהליך צמיחה או שינוי מטבולי באחד התאים או בשניהם, כך שהיעילות של א', כאחד

203. James (1950[1890], Volume 1, p. 566).

204. *The origins of Psycho-Analysis: Letters to Wilhelm Fliess, Drafts and Notes: 1887–1902*, p. 380

205. Ibid., p. 360

206. Ibid.



איור 7: ג'יימס ופרויד השתמשו שניהם בסכמות של רשת עצבית כדי להסביר את הבסיס הנוירופיזיולוגי של ההתנהגות. משמאל: שחזור של איור מתוך Freud (1950[1890], Volume 2, p. 588). מימין: שחזור של איור מתוך James (1895, p. 324).

התאים המפעילים את תא ב', הולכת וגוברת".²⁰⁷ בימינו, נוירופיזיולוגים מכנים באופן כוללני את עקרון האסוציאציה על ידי סימולטניות "חוק הֶב", משפחה של חוקי אסוציאציה השונים זה מזה כתלות במבנה הזמני של הפעילויות בתאי העצב התורמים לסינפסה. כמתבקש משיקולי שימור פיזיקליים, פיזיולוגים מודרניים הרחיבו את עקרון האסוציאציה על ידי סימולטניות, וזיהו מערך משלים של כללים הדואגים לדיס-אסוציאציה סינפטית.

כבר ציינו שאת המילה "סינפסה" כפי שהיא מוכרת היום טבע שרינגטון בשנת 1897, שנתיים אחרי מכתבו של פרויד לפליס.²⁰⁸ כאן, אולי, המקום להעיר שהעלעול ב"מתווה" של פרויד שנכתב ב-1895 מרתק מבחינת ההיסטוריה של רעיונותיו. פרויד השתמש במושג "מחסום מגע" כדי לתאר את הצומת בין תאי עצב, ומתאר תהליכי "הקלה" של מחסומי מגע, כך ש"התנגדותם" פוחתת בעקבות כלל האסוציאציה על ידי סימולטניות. כך פרויד מסמן – שנים רבות לפני הֶב – את הקשר בין פלסטיות סינפטית לבין זיכרון: "הטיעון הוא כזה [...] מחסומי המגע משתנים [...] ומכיוון

207. Hebb (1949, p. 62).

208. Bennett (1999).

שהניסיון הפסיכולוגי מלמד אותנו שקיימת למידה על סמך היזכרות, השינוי מוכרח להיות כזה שהופך את מחסומי המגע למוליכים טובים יותר – לאטומים פחות [...] את מצב מחסומי המגע, לכן, יש לתאר במונחים של מידת המוליכות דרכן. הזיכרון מיוצג על ידי המוליכות שבין תאי עצב- Ψ ”²⁰⁹.

כפי שכבר ציינו רבים, מעניין למצוא תוך קריאת המתווה של פרויד מילים שמתארות תהליכים ברמת הרשת העצבית שמאוחר יותר דבקו בהן משמעויות פסיכואנליטיות עשירות; למשל, התנגדות (של “מחסומי המגע”), או “העברה” של “קתקסיס” עצבי (השם שפרויד מעניק לתופעה שהיום מכונה “פוטנציאל פעולה” או “דחף עצבי”), ועוד.

נסיים את הסקירה ההיסטורית של דוקטרינת העצב, תורת האסוציאציה ואסכולת הרשת, בהערה חדת עין של פלוגל על שורשי נטייתנו לחבר בין זיכרונות או רעיונות לבין סינפסות. פלוגל מתאר כיצד בשנת 1833, באמצעות מיקרוסקופ משופר, גילה רוברט רֶמְקֶה שהמוח אינו איזה תוֹוֹף אחיד ואמורפי, אלא בנוי מצברי תאים, תגלית חשובה שכעבור שנים – בעקבות מחקריהם של גולג'י, קחאל ורבים אחרים – הובילה לניסוח דוקטרינת העצב.²¹⁰ ואז מעלה פלוגל את השאלה מדוע התגלית שהמוח מורכב מתאים הייתה כה מעניינת וחשובה, מתקופת יציאתה לאור ועד לזמן שבו

209. הציטוט הזה הוא תרגום של המתווה של פרויד מ-1895 כפי שהוא מופיע ב: Freud (1954, p. 361); ההדגשה במקור. אותו הטקסט מתורגם מעט אחרת במהדורה הסטנדרטית (Freud, 1895, p. 300), אך הוא נושא משמעות זהה.

210. סיפור תרומותיו המדעיות הלא מוערכות של רוברט רמק, שכותרתו: “A Polish, Jewish Scientist in 19th-Century Prussia” (“מדען יהודי פולני בפרוסיה של המאה ה-19”), מסוכם בהערה היסטורית בת עמוד אחד במאמר של דיוויד לגונוף (Lagunoff) שפורסם בכתב העת *Science* בשנת 2002.

כתב הוא את ספרו (1934), ולמעשה עד ימינו אנו. תשובתו של פלוגל כה עמוקה ורלוונטית לנושאה של המסה הנוכחית עד שאיני יכול שלא להביא אותה כאן כמעט במלואה (שוב, בתרגומו החינני גם אם ארכאי של משה בריל). פלוגל מצביע על:

[...] ההקבלה בין מבנה המוח, שהחקר ההיסטולוגי התחיל זה עתה לפענח אותו, לבין מהות הנפש, לפי תיאורם של בעלי תורת האסוציאציה, שהיתה השיטה הפסיכולוגית השלטת באותה תקופה, ושמצאה דווקא אז נושא-דגל עקבי ויסודי כל כך – בג'יימס מיל. תורת האסוציאציה ראתה בנפש הרכב ממספר גדול של יחידות יסודיות והן ה"מושגים", המחוברות יחד בצירופים שונים, ולהם דרגות שונות של הידוק והרכב, והיוצרות תמיד קשרי גומלין חדשים; תופעות הנפש, שאנו יודעים עליהן תוך הסתכלות פנימית, מקורן בעצם – כך שיערו – באותו תהליך הקישור. מצד שני התחילה ההיסטולוגיה מראה עתה, כי מערכת העצבים עצמה מורכבת מיחידות פשוטות לאין מספר – והן התאים – מחוברות יחד ע"י סבך של סיבים מקשרים; והרי נדמה היה, כי הללו מותאמים – פלא ממש! – לשמש תחליף פיזי ל"אסוציאציות", שהכרנו אותן בתודעה. כלום יש לך דבר טבעי יותר מן ההנחה, שהתאים מקבילים, איך שהוא, למושגים היסודיים, וסיבי העצבים המחברים את התאים מקבילים שוב לאסוציאציות של המושגים? או שצירופי מושגים מקבילים לקבוצות תאים המחברים זה בזה, וכיוצא באלה? וכך יצא, שהופעתו של איזה מושג בתודעה תקביל לאיזה תהליך העובר בתא או בקבוצת התאים המקבילים, ואסוציאציה של מושגים תסתבר מתוך דחף העובר תוך הסיבים המקשרים את התאים הבאים בחשבון. אולם עיון נוסף גילה את הקשיים, הקיימים על דרך ההסבר הזה של הקבלה, הסבר פשוט וברור מדי. מן הצד הפסיכולוגי, למשל, קשה היה לקבוע את טיבו המדויק של אותו "מושג" יסודי ואינו ניתן עוד לפירוק, שיהא מקביל לתא-עצב אחד.

ומן הצד הפיזיולוגי – הרי תאים אינם מוגבלים רק לרקמת העצבים בלבד, אלא מצויים הם בכל מקום בגופי בעלי החיים והצמחים. ובתוך מערכת העצבים ניתן למצוא תאים לא רק במוח, אלא גם בחוט-השדרה ובצמתות מבודדות שונות – במקומות, שאין להם, ככל הנראה, זיקה ישרה לתודעה [...]. אותה סברא על ההקבלה – משמעותה היתה למעשה הנחה מראש, שקיים איתור במוח, הרבה יותר קיצוני מאשר חשבה הפסיכולוגיה, שכן זו רצתה רק לקבוע את מקומם של שלושים ושבעה כוחות-נפש בלבד, ולא של מושגים לאין ספור.²¹¹

תובנתו העמוקה של פלוגל מתייחסת להתאמה הפשטנית בין רשת של רעיונות ורשת של תאי עצב, או במילים אחרות בין תורת האסוציאציה המבוססת על פילוסופיה לבין דוקטרינת העצב המבוססת על פיזיולוגיה. תובנתו רלוונטית היום לא פחות מכפי שהייתה בעת כתיבתה. להערתו על הקושי שמציב היעדרו של "חלקיק" פסיכולוגי אלמנטרי התייחסנו בדיון על חוסר היכולת לצמצם מושגים פסיכולוגיים. הקושי השני שפלוגל מעלה קשור להיבט הפיזיולוגי: רשתות תאים על קשריהם ומורכבותם מצויות בכל מקום בעולם הפיזיולוגי והביולוגי; אם כן, מה מייחד רשתות עצביות שמאפשר להן (ורק להן) ליצור את התודעה? אחת הדרכים לנסות לענות על השאלה הזו היא לחפש תאי עצב מיוחדים, קבוצות או רשתות מיוחדות של תאי עצב, שהמבנה שלהם מתאים באיזשהו אופן פלאי להופעתה של המחשבה המודעת; סוג של רדוקציוניזם נאיבי שנידון בתחילתו של החיבור הזה. כיוון אחר, יותר לטעמי, קשור בהגדרת המדעים הקוגניטיביים באופן כללי, שם רשתות עצביות אינן נתפסות כמרכיבים ייחודיים העונים על צרכיה של התודעה הפסיכולוגית; תחת זאת, רשתות של תאי עצב נתפסות כאחד מתוך הרבה מימושים אפשריים של רשתות שיכולות לעמוד

211. פלוגל, מאה שנה פסיכולוגיה, עמ' 57-59.

בבסיסה של מערכת מתנהגת. אין בנקודת מבט זו משום הכחשת חשיבותו של המימוש העצבי, שכבני אדם יש לנו זיקה חזקה אליו, גם באופן כללי וגם מבחינה מעשית. אבל כן יש בה, בנקודת המבט הזו, משום הצבת אתגר למדע: להגדיר את התנאים שקיומם מאפשר את הפיכתן של רשתות של מרכיבים מופשטים כלשהם, לסובייקטים קוגניטיביים, "פסיכולוגיים", בעלי תודעה עצמית. התשובה לאתגר, ברוח החיבור הנוכחי, תהיה כרוכה ככל הנראה בקיומה של סביבה סובייקטיבית.

נפנה כעת לתאר את התהליכים והישויות של מערכת העצבים המושגית, תהליכים וישויות שבאמצעותם נוכל אולי להדהד מושגי יסוד של תיאוריית האובייקטים ההתייחסותיים בפסיכולוגיה, כפי שתוארו בפרק השלישי: מרחב פנימי רפלקסיבי וסימטריה ראשונית, אי-נחת לנוכח אינטראקציה עם סביבה סובייקטיבית, שבירת סימטריה והופעתם של אובייקטים פנימיים, אינטראקציות בין אובייקטים, הסתגלות.

סימטריה ומרחב פנימי

ראינו בפרק הרביעי שהמרחב הפסיכולוגי הפנימי, המנותק לרוב מהמודעות, מכונה לעתים קרובות "אני" והוא מקום משכנן של פנטזיות. המרחב הפנימי הזה הוא ישות "רפלקסיבית" כמובן הבא: הוא מאופיין במעגלי פרשנות והשלכה בקרב האובייקטים הפנימיים שלו, דינמיקה הרגישה – רק במידה מסוימת – לאירועים חיצוניים. מלידה שוכנות במרחב הפסיכולוגי הפנימי פנטזיות ראשוניות (ישויות מקבילות לרפלקסים פיזיולוגיים ינקותיים), שמספקות צרכים בסיסיים בתגובה לגירווי הסביבה. מושג הסימטריה הראשונית של המרחב הפנימי מתאר מצב אוטופי שבו כל הצרכים הבסיסיים מסופקים על ידי הסביבה (האם) תוך הפעלת פנטזיות ראשוניות המתאימות לרפלקסים ינקותיים.

בטקסט קצר שכותרתו "איבר החישה האָחוד: מסה על קליפת המוח",²¹² ולנטינו ברייטנברג מציע אינטגרציה יפהפייה ומופשטת של אנטומיית המוח והפיזיולוגיה, "תוך התרחקות מעיסוק בווריאציות מקומיות (היינו, בתוך המוח היחיד) וגם מווריאציות בין פרטים שונים".²¹³ העמודים הבאים מבוססים על ניתוחו של ברייטנברג, בתוספת פרשנות, מספרים, עובדות ורעיונות שנדמים רלוונטיים למטרתנו – היינו, תיאור המרחב הפיזיולוגי הפנימי תוך מחשבה על התיאוריה הפסיכולוגית של אובייקטים התייחסותיים. בתארו את סוג הסימטריה המאפיינת את קליפת המוח, ברייטנברג מציין שמדובר ברשת אחידה פחות או יותר, עם קשרים אופקיים שאורכם מאפשר לחבר תאים בכל מקום שבו, קרובים כרחוקים, קשרים המפוזרים באופן שווה בכל הכיוונים. זאת בניגוד לציר האנכי, שם הסימטריה נשברת, כמו עוגת שכבות שבה כל שכבה ותאי העצב הייחודיים לה: כל שכבה כשלעצמה נראית אותו הדבר פחות או יותר בכל קליפת המוח, ואולם השכבות שונות זו מזו מבחינת צורת תאי העצב השוכנים בהן, הקישוריות בין התאים בתוכן, כמו גם בדפוס הקשרים בין כל שכבה לכל השכבות האחרות. כלומר לאורך הצירים האופקיים קליפת המוח היא סימטרית – היינו, היא תיראה אותו הדבר, לא משנה איפה מבצעים בה חתך. אבל הציר האנכי אינו סימטרי: אם "יורדים" מלמעלה למטה, מהשכבה החיצונית העליונה של הקליפה אל עבר השכבות העמוקות יותר, מצטייר סדר דברים שונה מזה המתקבל אם מתקדמים מלמטה למעלה, בכיוון ההפוך.

לסימטריה האנטומית של המישור האופקי יש השלכות:

212. Braitenberg (1977[1973]), "On the Texture of Brains: An Introduction to Neuroanatomy for the cybernetically Minded" (Chapter 8: *The Common Sensorium: An Essay on the Cerebral Cortex*)

213. Ibid., p. 101

"היעדרם של גבולות מוגדרים היטב בחומר האפור – העובדה שכל אזור קטן של חומר אפור מכיל חלקי דנדריטים ואקסונים השייכים לתאי עצב מאותו חומר אפור, הממוקמים במרחקים שעשויים להיות גדולים מאוד ביחס לממדים המקרוסקופיים של האיבר בשלמותו – מרמז כי איבר זה מתפקד כיחידה אחת [...] [זאת] בניגוד לתפיסה המקובלת של קליפת המוח כמורכבת מאזורים סנסורי, מוטורי ואסוציאטיבי".²¹⁴

למעשה, התמונה הזו מנוגדת לרוח הלוקליזציה כהסבר לאופן תפקודו של המוח, הן בסקאלות הגדולות והן בקטנות. את זאת למדנו כבר מהדיון בלוקליזציה: מעמדה ההסברי של הלוקליזציה ביחס לפעולתו של המוח דומה למעמדה ההסברי של פרישת מקשי המקלדת ביחס למנגנון הפעולה של תוכנה לעיבוד תמלילים – סידור לא ייחודי, שנקבע על ידי פרטיה ההיסטוריים של אבולוציה, ושהוא במידה רבה אדפטיבי. האנלוגיה ללוקליזציה נעוצה בחוסר הרלוונטיות של הפרישה הספציפית של מקשי המקלדת להבנת מנגנון מכונת הכתיבה, קל וחומר להבנת התוכנה והחומרה המצויות בבסיס עיבוד תמלילים ממוחשב.²¹⁵

המבנה השכבתי, האנכי והלא סימטרי שנראה זהה בכל מקום בקליפת המוח, "מתאים לפעולה הבסיסית שקליפת המוח מבצעת על הקלט שלה. מדובר בפעולה המתחוללת בין שכבות, כששכבה

²¹⁴. Ibid., pp. 102–4.

²¹⁵. מספר קומבינטורי גדול מאוד של פרישות מקשים חלופיות היה יכול להתאים, אבל עיצוב מקלדת ה-QWERTY המקובל היום (מיוחס לכריסטופר לת'אם שולס, 1819-1890) מבוסס על שכיחותם של צמדי אותיות באנגלית אמריקנית, כדי למנוע ממקשים סמוכים לתקוע את מנגנון מכונת הכתיבה מבית רמינגטון ובניו (יצרני נשק ומכונות כתיבה). עם השנים, פרישת מקשי המקלדת הותאמה לשפות שונות, לסמלים חדשים, וכן הלאה, אבל QWERTY נותרה הפרישה השלטת, אף שהתופעה של מקשים סמוכים הנתקעים זה בזה היא חסרת כל משמעות במקלדות מחשב בנות ימינו.

אחת או יותר של קליפת המוח משמשות תחנות קלט והאחרות תחנות פלט".²¹⁶ כיום אנו יודעים די הרבה על המעבר של פעילות בין השכבות השונות בסקאלות הקטנות – כלומר לאורך הציר האנכי הא־סימטרי המבצע את הפעולות הבסיסיות. אפשר לסכם את הידע הזה כדלהלן: אקסונים המוליכים פעילות חשמלית שמקורה מחוץ לקליפת המוח, מתחברים באמצעות סינפסות אל תאי עצב בשכבות הקליפה הנמוכות ("עמוקות").²¹⁷ בתוך קליפת המוח, הפעילות עוברת במעלה האקסונים של שכבת תאי העצב הנמוכה, ומפעילה תאי עצב בשכבות העליונות. אלה בתורם מפעילים תאי עצב סמוכים דרך סינפסות מקומיות. הפעילות המקומית עוברת במורד הקליפה והחוצה ממנה דרך אקסוני פלט. ההבחנה הפופולרית בין "חומר לבן" ל"חומר אפור" קשורה לאקסונים (הנכנסים והיוצאים; "לבנים") ולשכבות התאים עצמן ("אפורות"), בהתאמה.²¹⁸

החומר האפור בקליפת המוח (השכבות) אינו ישות פסיבית; הוא פועל ללא הפסקה גם בהיעדר הפעלה מהחוץ. עובדה זו מתבררת בניסויים שבהם נמדדת פעילות תחת תנאים שבהם כל האקסונים הנכנסים אל קליפת המוח מנותקים.²¹⁹ למעשה, גם כשרשתות של תאי עצב קליפתיים מוחזקות מחוץ למוח, על שולחן המעבדה, פעילות ספונטנית היא תכונה בולטת

216. Braitenberg, (1977[1973], p. 105).

217. לניתוח מהעת האחרונה, ראו: Constantinople and Bruno (2013).

218. אקסונים נכנסים ויוצאים שונים מבחינה היסטולוגית מאקסונים מקומיים (תוך־קליפתיים); בחתך הסטולוגי, בתנאים מסוימים, אלה האחרונים נראים אפורים ואלה הראשונים נראים לבנים. צבעם הלבן של אקסונים הנכנסים אל הקליפה או יוצאים ממנה נובע מהציפוי התאי של האקסונים הללו המתאים להובלה מהירה יותר, החיונית כשמדובר בקשרים מרוחקים.

219. ראו למשל: Timofeev et al. (2000).

ושכיחה שקשה לעצרה אפילו בתנאים מבוקרים היטב.²²⁰ כלומר המרחב הפיזיולוגי הפנימי שלנו נשלט על ידי פעילות עצמונית (ספונטנית) בלתי פוסקת גם בהיעדר קלט חיצוני; תובנה זו רלוונטית ביותר לדיאלוג. יתר על כן, סדרה רחבה של תצפיות מצביעה על כך שבשלבי התפתחות מוקדמים ביותר, לפעילות העצמונית הבלתי פוסקת ברשתות קליפתיות אופי מסונכרן וחובק-כול: אם במוחו של התינוק נמצא תא עצב אחד פעיל בנקודת זמן נתונה, סביר מאוד להניח שרוב תאי העצב האחרים בקליפה פעילים אף הם, פחות או יותר בו-זמנית.²²¹ הסימטריה הזו נשברת על ידי אינטראקציה תפקודית עם העולם ככל שהמוח מתבגר, תהליך התפתחותי שאליו נתייחס בהמשך.

בנוגע לדינמיקה העצמונית הזו, ברייטנברג מפנה את תשומת לבנו לעוד עובדה נזיר-אנטומית משמעותית, הנוגעת לאקסונים הנכנסים והיוצאים מקליפת המוח. מתברר שרוב רובם (מעל 99 אחוז) של האקסונים המזינים את פעילות קליפת המוח, אלפי מיליונים, מקורם בקליפת המוח עצמה. רק פחות מעשירית האחוז של האקסונים הנכנסים אל קליפת המוח מזינים אותה בפעילות שמקורה מחוץ לקליפת המוח. ברייטנברג מסיק מכך ש"את רוב העבודה שקליפת המוח עושה היא מבצעת על מידע שהיא עצמה מספקת. נראה שקליפת המוח פועלת בעיקר באופן רפלקסיבי. אין זה מפתיע, שכן באופן אינטואיטיבי ברור לנו (והדבר מאומת על ידי תצפיות רבות של הפסיכולוגיה הניסויית) שהתפיסות שלנו הן תמיד תערובת של מעט קלט מהערוצים החושיים והרבה מאוד מידע שכבר קיים בזיכרוננו".²²²

מידת הרפלקסיביות של קליפת המוח, כלומר נטייתה "לדבר

220. Marom and Shahaf (2002)

221. Ibid

222. Braitenberg (1977[1973], p. 106)

עם עצמה", משתקפת גם בהיבטים אחרים של הנוירואנטומיה ביונקים. למשל, מדידות קפדניות מראות שהחומר הלבן (כלומר האקסונים המחוברים בין אזורים שונים בקליפה) כמעט שווה בנפחו לזה של החומר האפור (השכבות התאיות) במוח האדם.²²³ ניתוחים השוואתיים מראים שבמהלך האבולוציה גדל נפח החומר הלבן (כמות האקסונים) באופן לא פרופורציונלי לגדילת נפח החומר האפור (כמות התאים).²²⁴ במיני יונקים שונים, כל תוספת במספר התאים מלווה בתוספת גדולה יותר של מספר אקסונים.²²⁵ למשל, נפח קליפת המוח הכולל של החדף (יונק קטנטן) כ-10 מ"ל, שמתוכם פחות מעשרה אחוזים נתפסים על ידי אקסונים; באדם, לעומת זאת, שנפח קליפת המוח הכולל שלו הוא כליטר אחד או מעט יותר, מחצית הנפח נתפסת על ידי אקסונים. ברייטנברג הציג חישוב פשוט ומשכנע כבר בשנת 1973, והראה שבנתונים אנטומיים אלו סביר להניח שכל נקודה בקליפת המוח מחוברת לכל נקודה אחרת.²²⁶ טענתו של ברייטנברג מתאימה גם לניתוח האלגנטי המאוחר יותר של ז'אנג וסג'נוסקי,²²⁷ המראה שהעלייה הלא פרופורציונלית בכמות החומר הלבן (חיבורים באמצעות אקסונים) ביחס לכמות החומר האפור (תאים) אצל האדם היא תוצאה טבעית של דחיסת הקשרים של קליפת המוח עם עצמה, רפלקסיביות שתוצאתה סימטריה: פעילות בנקודה א' תוביל להופעת פעילות בנקודה ב' ולהפך.

יתרה מזאת, קפליה של קליפת המוח, אולי הדימוי הראשון שעולה על דעתנו כשאנו חושבים על מוח האדם, קשורים קשר הדוק לדחיסת הקשרים בתוכה. הקפלים בקליפת המוח מגדילים

Miller, Alston, and Corsellis (1980) .223

Bush and Allman (2003) .224

Zhang and Sejnowski (2000) .225

Braitenberg (1977[1973], p. 114) .226

Zhang and Sejnowski (2000) .227

את היחס בין פני השטח הממשיים לפני השטח החשופים בערך פי שלושה.²²⁸ האמונה הפופולרית, שלפיה הקליפה מקופלת כל כך מפני שאין מספיק מקום לכל תאי העצב בחלל הגולגולת, התגלתה כפשטנית מדי. כיום אנו סבורים שהקפלים מקטינים את המחיר שהמוח משלם – מבחינת אורך החיבורים בין התאים – בעבור שטח פנים מוגדל של הקליפה; הרווח מושג על ידי קיצור מרחקים בין אזורים רחוקים זה מזה שיש ביניהם קשרים מרובים.²²⁹ ברייטנברג מסכם את העובדות האנטומיות והפיזיולוגיות הללו על קליפת המוח בכנותו אותה "מכונת עֶרְבּוּל אדירת ממדים".²³⁰ כל פיסה קטנה שלה מכילה מידע על מצבן של מספר גדול מאוד של פיסות אחרות.

את תשומת הלב מיקדנו בקליפת המוח, אבל דינמיקה רפלקסיבית המבוססת על סימטריה אנטומית אינה ייחודית לקליפה. זהו סימן ההכר של מערכת העצבים כמכלול; ואכן, אם נתבקש לציין ולו תכונה אחת עיקרית של המוח כולו, תהא זו רפלקסיה המבוססת על סימטריה.

בתיאור המרחב הפסיכולוגי הפנימי התייחסנו לסימטריה הינקותית כ"ראשונית", מצע להשפעתה של שרשרת אירועים פסיכולוגיים של שבירת סימטריה המתרחשת במהלך התפתחות התינוק. בהמשך הפרק נקדיש מקום למנגנונים הפיזיולוגיים המאפשרים את שבירת הסימטריה ואת הופעתם של אובייקטים פיזיולוגיים. אבל נקדים את המאוחר כדי להצביע על דמיון בין המרחב הפנימי הפיזיולוגי ובין המרחב הפנימי הפסיכולוגי. במהלך ההתפתחות הנורולוגיות של התינוק, משתקף אופייה ההיררכי

Zilles et al. (1988). 228

Van Essen (1997); לסקירה מקיפה של הכלכלה של הארגון הרשתי 229

במוח, ראו Bullmore and Sporns (2012)

Braitenberg (1977[1973], p. 114). 230

של מערכת העצבים המושגית הן בקשת הנורמלית והן בקשת הפתולוגית של התופעות הנוירולוגיות. לצורך הדוגמה, נבחן את תהליך הפרידה מרפלקסים ינקותיים במרוצת החודשים הראשונים של ההתפתחות. תיארונו את הרפלקסים הינקותיים כמקבילה הפיזיולוגית לרעיון הקלייניאני של פנטזיות ראשוניות, השערות מולדות על העולם, היוצרות את מה שחנה סגל כינתה "חיי פנטזיה גולמיים" המתקיימים מרגע הלידה.²³¹ את רפלקס הלפיתה, מורו, גישוש אחר פטמה, פסיעה ורפלקסים ינקותיים נוספים אפשר להבין מנקודת המבט הפילוגנטית כ"ניחושים ראשונים" לתנועות המשפרות את הסיכוי לשרוד. מסתבר שחלק מהרפלקסים הללו נותרים כפי שהם בקרב אַנְאָנְצָפָלִים, מקרים טרגיים שבהם נולדים תינוקות ללא קליפת מוח;²³² מכך הסיקו הנוירולוגים והנאוונטולוגים שאת הרפלקסים הללו מחוללים חלקי מוח תת-קליפתיים. היעלמותם של הרפלקסים הינקותיים נובעת מעיכובם על ידי מעגלים קליפתיים המתפתחים בחודשי החיים הראשונים.²³³ במילים אחרות, הלמידה שפעולת רפלקסים ינקותיים עלולה להיות "לא מותאמת" בהקשרים שונים (התייחסותיים, במובן הרחב) היא עניין נרכש, ונובעת ככל הנראה מבנייה של מה שבולבי תיאר כמודלים לייצוג "של העולם ושל [...] [הילד] בתוך העולם".²³⁴ אכן, נזק לקליפת המוח גורם במקרים רבים להופעתם המחודשת של הרפלקסים הללו באדם בוגר. התינוק נולד עם מערך סימטרי (קרי, לא רגיש להקשר) של פנטזיות ראשוניות, סימטריה שנשברת על ידי עיכוב קליפתי מכוון היטב של תגובות לאינטראקציות עם העולם הממשי.

231. Segal (1975, pp. 13–23).

232. לסקירה ראו: Futagi, Toribe, and Suzuki (2012).

233. Ibid; והפניותיהם.

234. Bowlby (1973, p. 203).

עיקרון זה של שבירת סימטריה על ידי עיכוב "מלמעלה" (קליפת המוח) צף ועולה בהרבה הקשרים פסיכולוגיים ונוירופיזיולוגיים, כמו גם בהקשר הביולוגי הרחב. העיקרון תואר כבר בשלהי המאה ה-19, ברעיונותיו של ג'ון יולינגס ג'קסון²³⁵ על "רמות" ארגון במוח: הרמות הגבוהות יותר כופות דפוסים על הרמות הנמוכות על ידי עיכוב פעולתן של הנמוכות. גם פלוגל מתייחס לרעיון יצירת דפוסים (שבירת סימטריה) על ידי עיכוב, רעיון שחשיבותו בחקר המוח וההתנהגות התחזקה והלכה עם השנים:²³⁶

[...] הוברר, עם מחקריו של שרינגטון ואחרים, כי המרכזים העליונים, וביחוד קרום [קליפת] המוח, דרכם להשפיע השפעת עיכוב על תפקודם של המרכזים הנמוכים. ברי, זוהי תגלית וחשובה עד למאוד, שהרי במקרה שחלה איזו התנוונות במרכזים העליונים או בשבילי העצבים, שבאמצעותם מבצעים המרכזים את שלטונם – מיד פורקים המרכזים הנמוכים את עול השלטון הזה ומתחילים פועלים בעצמה ובחירות בלתי-שכיחות. אותה "תגובת יתר" יכולה להביא תועלת כדי לקבוע מציאותו של ליקוי בדרגה העליונה, וכן כדי לעמוד כהלכה על תפקודיהם המיוחדים של המרכזים הנמוכים, שכן הם מתגלים בבהירות יתירה דווקא בצורתם המוגזמת. בדרך כלל: אותו מושג של פיקוח או עיכוב – חשיבותו עתידה היתה לילך ולהתגבר גם בנברולוגיה וגם בפסיכולוגיה; [ו]נועד ליהפך לאחד היסודות המהותיים ביותר בכל פרצופה המודרני של הנפש.²³⁷

עד כאן נידונו תכונות אחדות של המרחב הפסיכולוגי הפנימי,

235. נוירולוג בריטי (1835-1911) המוכר בעיקר בזכות תרומותיו המשמעותיות לחקר האפילפסיה.

236. פלוגל, מאה שנה פסיכולוגיה, עמ' 231.

237. ההדגשה לא במקור.

פורשו אל תוך הפיזיולוגיה והושלכו חזרה אל הפסיכולוגיה: סימטריה ראשונית, אופייה הרפלקסיבי של פעילות המרחב הפנימי, וכן הרגישות – המוגבלת – לאירועים חיצוניים. ואולם, יש להודות, התעלמנו מהיבט מרכזי של המרחב הפסיכולוגי הפנימי: היותו, רובו ככולו, מרוחק מהמודעות. מה אנו, פיזיולוגים, יכולים לעשות עם ההיקש הפסיכולוגי הזה? מה אנחנו יכולים לומר על מודעות בלי לשקוע בדיונים פילוסופיים עתיקי יומין בשאלת התודעה? האם המודעות יכולה להיות חלק מדיאלוג משמעותי בין תיאוריית יחסי אובייקט בפסיכולוגיה ובין עולם הפיזיולוגיה? האם ניתן לקיים דיאלוג משמעותי בין פסיכולוגיית המעמקים לבין הפיזיולוגיה בלי לדרוך על מוקשים פילוסופיים מהסוג הזה? התשובות לשאלות הללו אינן ידועות. כל מה שאפשר לעשות הוא להציע תפיסה מוטה בסוגיות אלה, ולהכיר בקיומן של גישות חלופיות שונות לחלוטין.

אזכיר שבהקדמה לחיבור הזה הובהר שהטקסט אינו דן בפילוסופיית תודעה-מוח, ושדיונים כאלו אפשר למצוא בספרים רבים שפורסמו במאה השנים האחרונות על ידי כותבים בולטים ומתאימים יותר למשימה. אומר רק זאת: למרות מאמצים כבירים (של רבים וטובים מקרב המדענים) לזהות מתאמים עצביים לתופעה, אני נמנה עם הפיזיולוגים הנוטים להאמין שמודעות – ובאופן כללי יותר התודעה – היא מושג פסיכולוגי שאין למפות אותו אל שפת הפיזיולוגיה מבלי שהמילים תאבדנה את משמעותן, לפחות מבחינת יחסי השפה שנידונו בפרק השלישי. לכן הגבלתי למן ההתחלה את הגדרתה של התנהגות לדבר-מה הבא לידי ביטוי בתנועות, הגדרה שאמורה להרחיק מאזורי עמימות כאלה. אפשר כמובן להקשות ולשאול: ומה בנוגע לפעילות שאינה יוצאת מקליפת המוח (או מהתת-קליפה) לכיוון השרירים – כלומר פעילות מוחית שאינה באה לידי ביטוי במכניקה סומטית (תנועות או הפרשות)? האם אין כזו? ואם יש, האין היא נושא

לדיאלוג בין פסיכולוגיה ופיזיולוגיה? איני יודע מה התשובה לשאלה הזו, אף על פי שקשה לי לדמיין את התודעה בכלל, ואת המודעות בפרט, במנותק מיחסי תנועה-חישה פרגמטיים. במובן הג'יימסיאני של דינמיקה התייחסותית. לדמיין תודעה בכלל ומודעות בפרט כבלתי תלויות באינטראקציות תנועה-חישה עם הסביבה,²³⁸ משמעות הדבר לייחס את התודעה או את המודעות לצבר של תאים ביולוגיים המחוברים זה לזה, שיכולים להימצא בגולגולת או על שולחן המעבדה, או בתוך צנצנת, חול אפיסטמולוגי טובעני שאליו מוביל נתיב רדוקציוניזם נאיבי מהסוג הזה. אפשר, אולי, להצביע על הקבלה מעניינת: אכן חלק הארי של המרחב הפסיכולוגי הפנימי מנותק מהמודעות, אך כך גם חלק הארי של הפעילות החשמלית במוח שאינו זמין לשרירים באופן מידי או ישיר, וכך גם חלק הארי של הפעילות החשמלית המתחוללת באיברי החושים שאינו זמין באופן מידי או ישיר לחלק ניכר מהחומר האפור.²³⁹ מעבר לכך, אודה, אין לי מה לומר על מקבילה פיזיולוגית למושג המודעות. נשוב, אם כן, אל הדיאלוג ונפנה לבחינת פרשנויות פיזיולוגיות לתהליך שבירת הסימטריה הראשונית.

238. הסביבה, כפי שהיא מוגדרת במערכת העצבים המושגית, היא כל מה שמצוי מחוץ למוח, ובכלל זה גופו של הסובייקט.

239. באופן לא בלתי קשור, העובדה שהמוח עצמו אינו רגיש מבחינה פיזית לאותם סוגים של גירויים היקפיים המפעילים אותו מרתקת. היא מתבהרת כשמבצעים חתך בגולגולת של אדם שאינו מורדם, הליך רפואי שכיח שבו מטופלים עוברים ניתוח מוח בעודם ערים. בהליכים הללו המנתחים נוגעים, חותכים, מחממים ומחשמלים את המוח, והמטופל אינו חש כל כאב. המטופל מזיז את השרירים ומדווח על מגוון רגשות ורשמים, אך הוא אינו חש כאב. במילים אחרות, לאיבר המפרש את כל הגירויים החושיים אין כל מעטפת חושית המדווחת לו על האינטראקציות הפיזיות שלו עם העולם, אלא באמצעות השפעתן על תנועות (שרירים) או הפרשות (בלוטות).