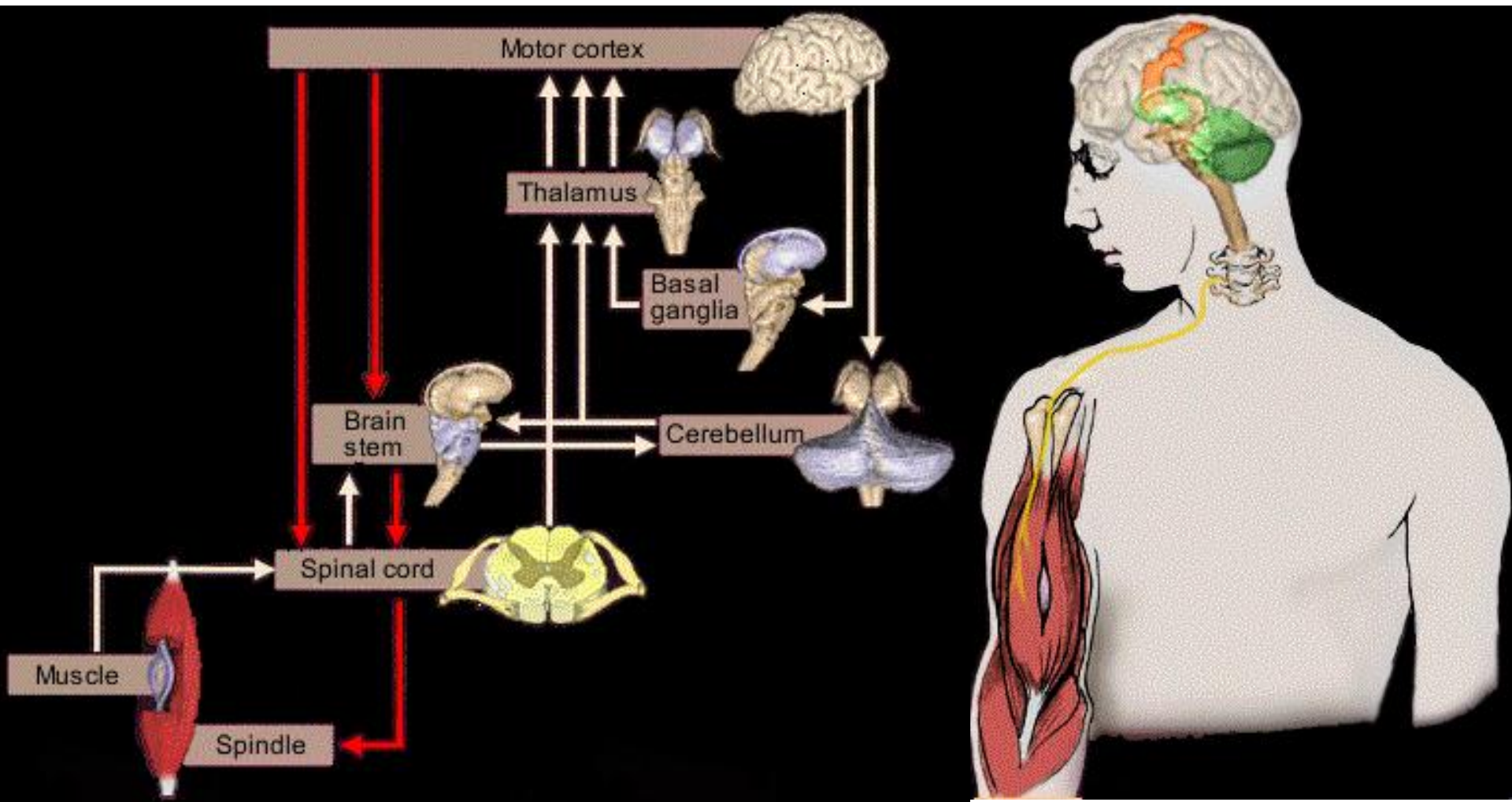
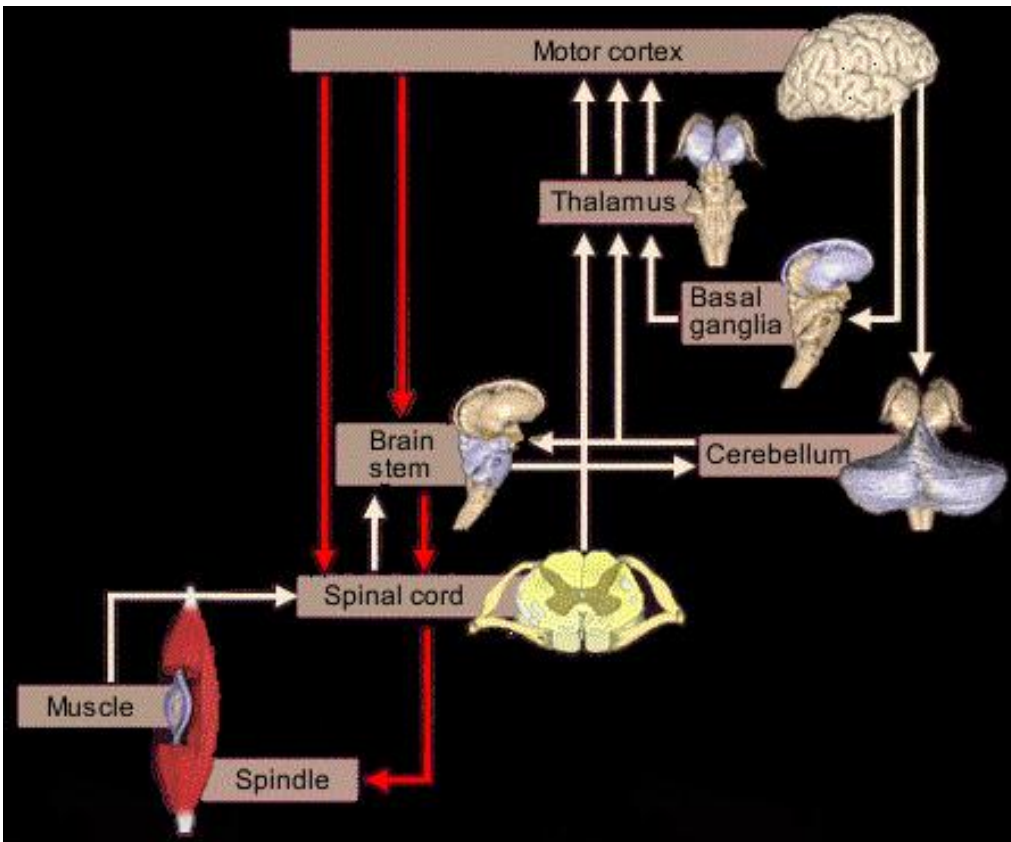


שליטה על תנועה: המערכת המוטורית



רמות השליטה על תנועה

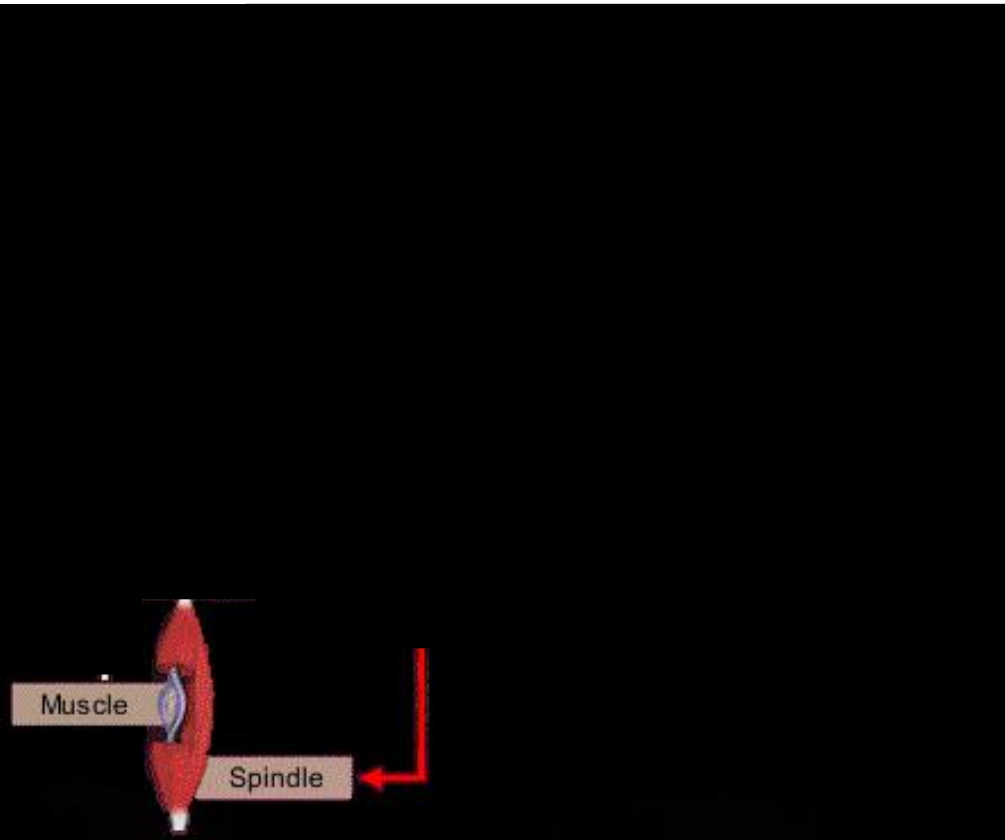
בניגוד למערכות סנסוריות, שמתמירות אנרגיה בעולם החיצוני לאינפורמציה חשמלית עצבית, המערכת המוטורית מקבלת אינפורמציה עצבית ומתמירה אותה לאנרגיה מכנית. היא עושה זאת באמצעות פקודות עצביות מהמח שמועברות אל השרירים על ידי פוטנציאלי פעולה. המערכת המוטורית כוללת שלוש רמות של אירגון:



רמות השליטה על תנועה

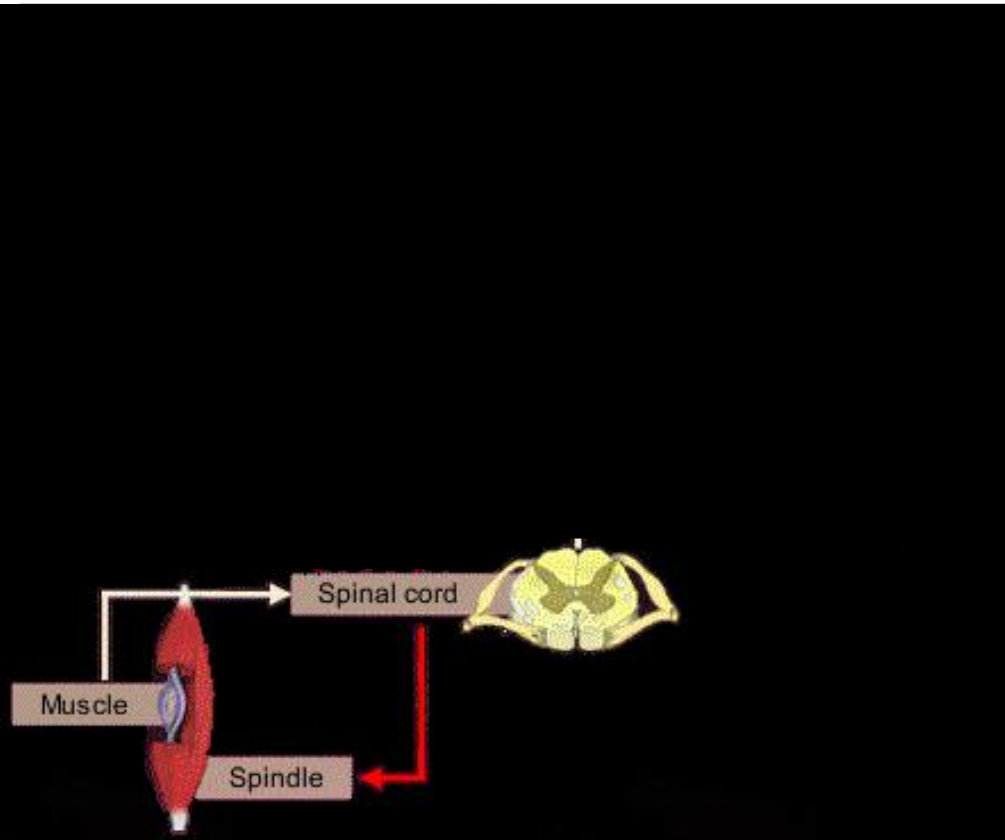
1. רמת השרירים: מהווה

את הרמה הראשונית שכן השליטה על התנועה והיציבה מושגת כולה על ידי כוונון מידת ההתכווצות של שרירי השלד.



רמות השליטה על תנועה

2. רמת הרפלקס: כוללת תגובות אוטומטיות, קבועות, בלתי משתנות, ופשוטות יחסית, שבדרך כלל נגרמות על ידי נוירונים בחוט השדרה בלבד.

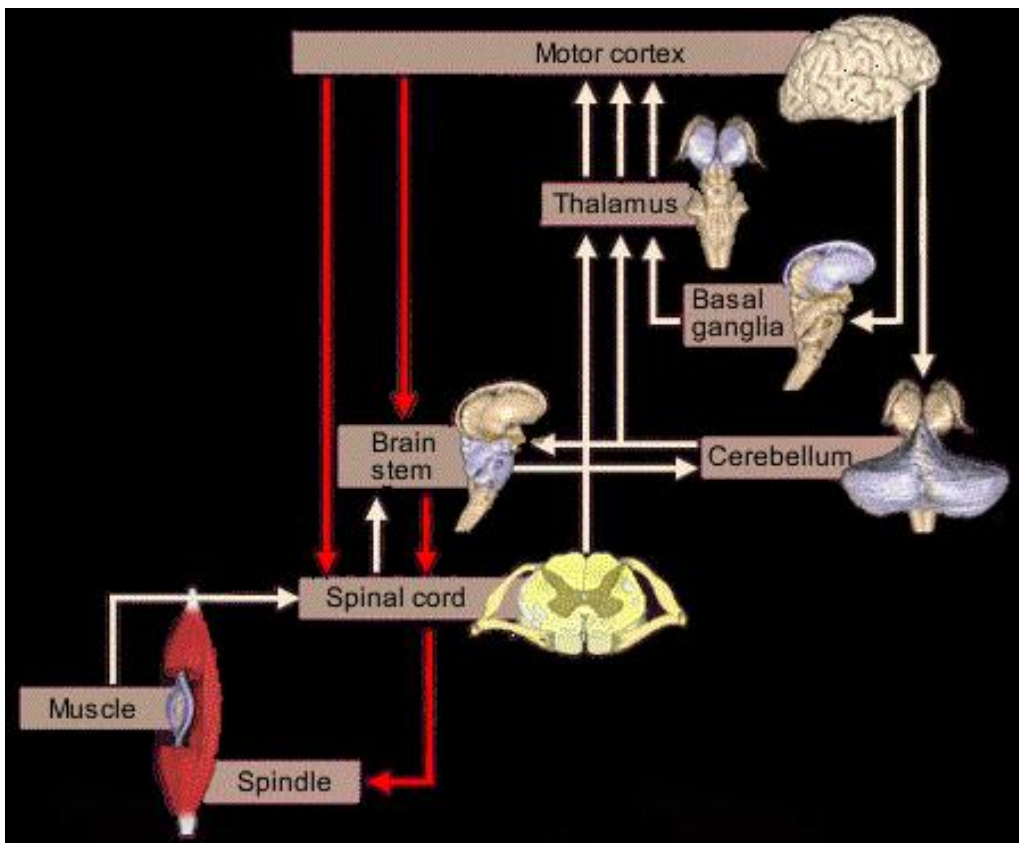


רמות השליטה על תנועה

3. רמת השליטה

והבקרה המוחית על

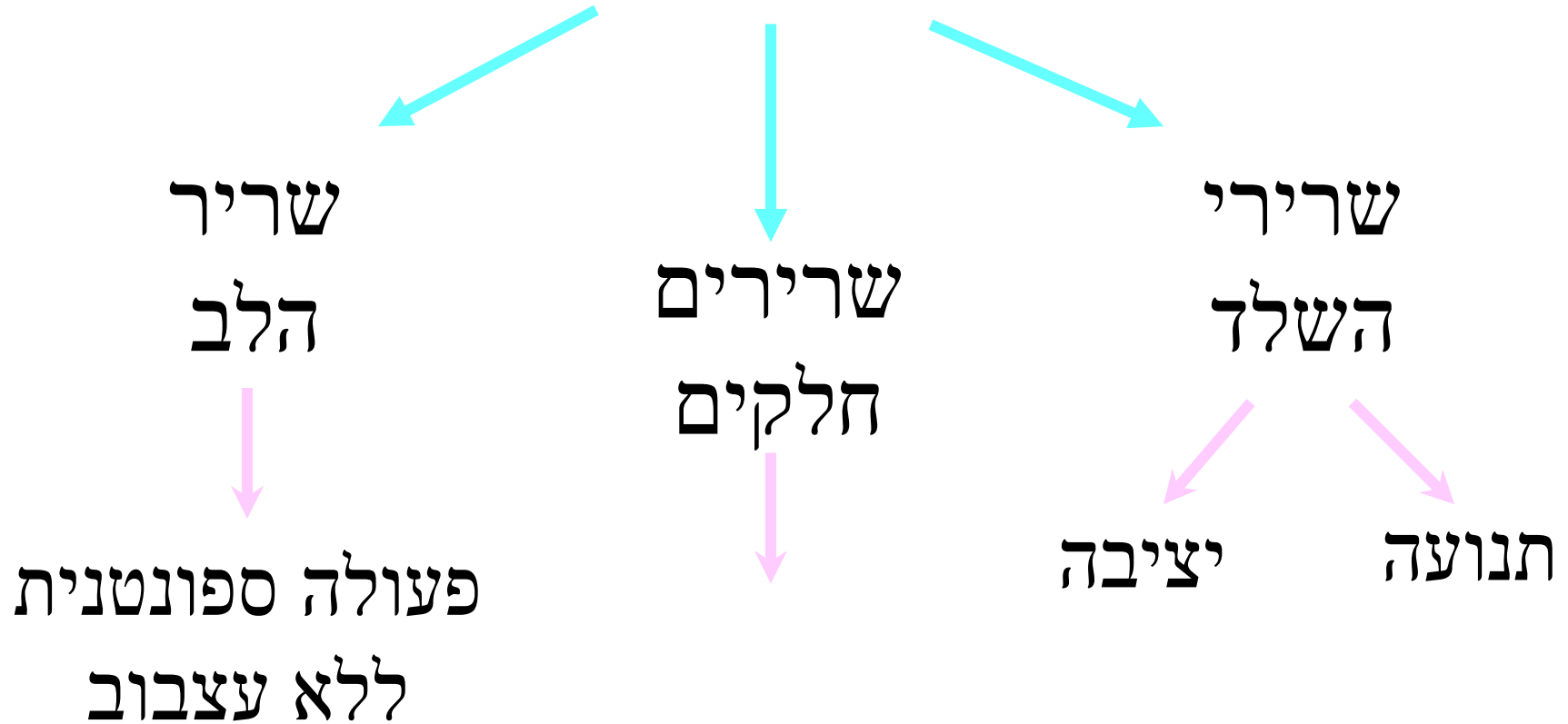
הרמות הנמוכות הללו: מהווה את הרמה הגבוהה והמורכבת בכל המערכת.



מערכות השליטה המוחית על השרירים מחייבות קבלה של אינפורמציה שוטפת מאברי הגוף, שמסופקת על ידי החוש הסומטוסנסורי, בעיקר על ידי אינפורמציה פרופריוצפטיבית שמגיעה מהשרירים.

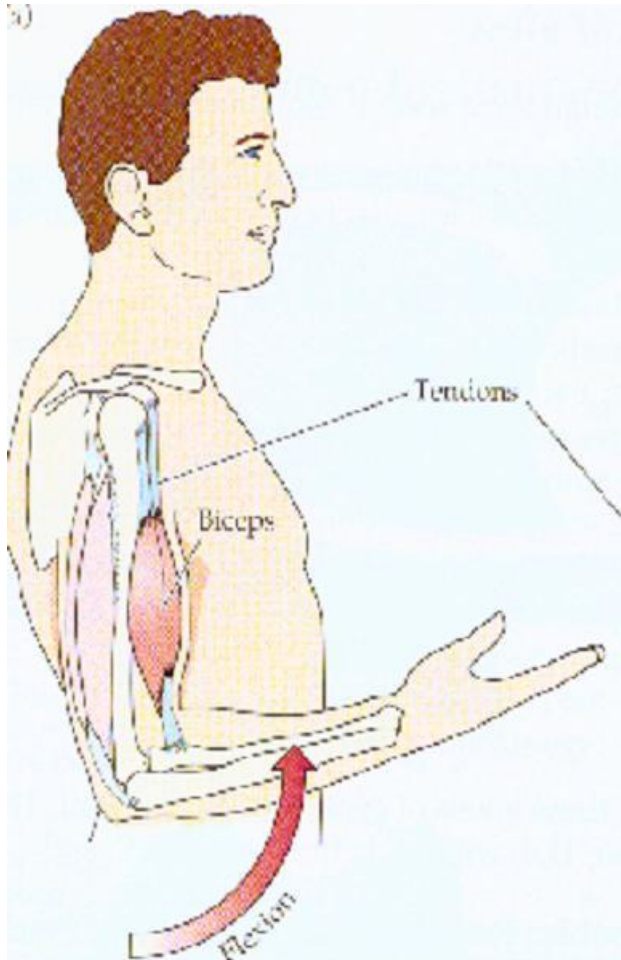
בגוף קיימים שלושה סוגים של שרירים: שרירי השלד, שרירים חלקים ושריר הלב.

סוגי שרירים

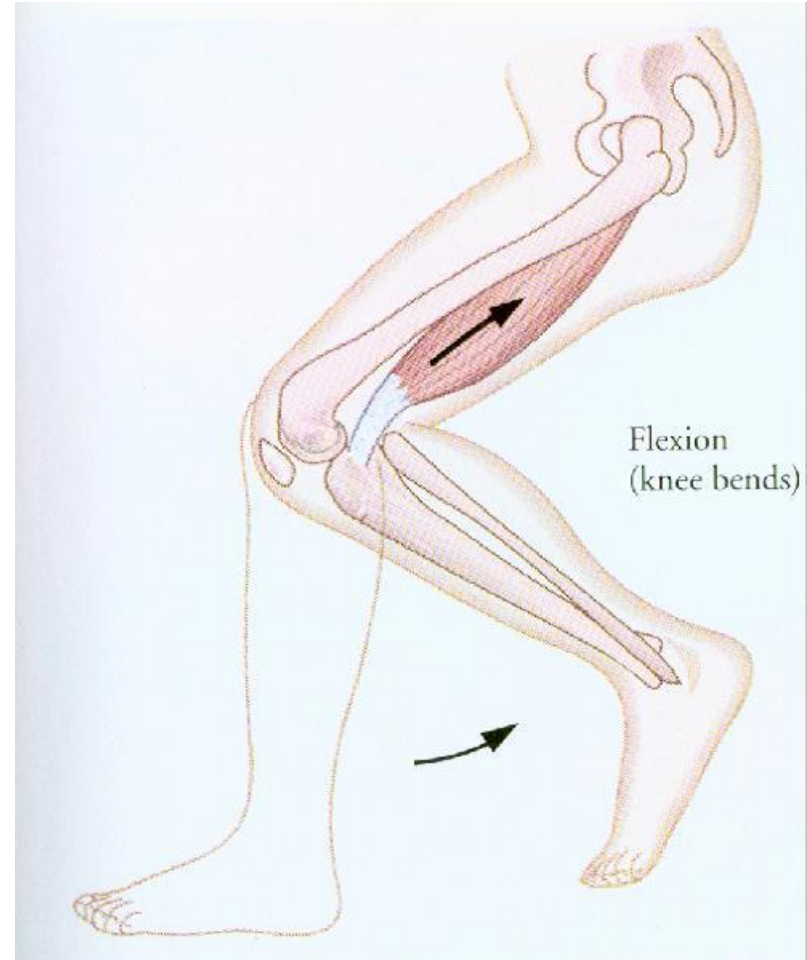


שרירי השלד הם השרירים האחראים לתזוזה, תנועה ויציבה. שרירים אלה מחוברים בשני קצותיהם לעצמות באמצעות גידים (tendons), ובדרך כלל מזיזים עצם כשהם נעים.

תנועה או כיפוף של איבר כלפי הגוף נקראת Flexion.

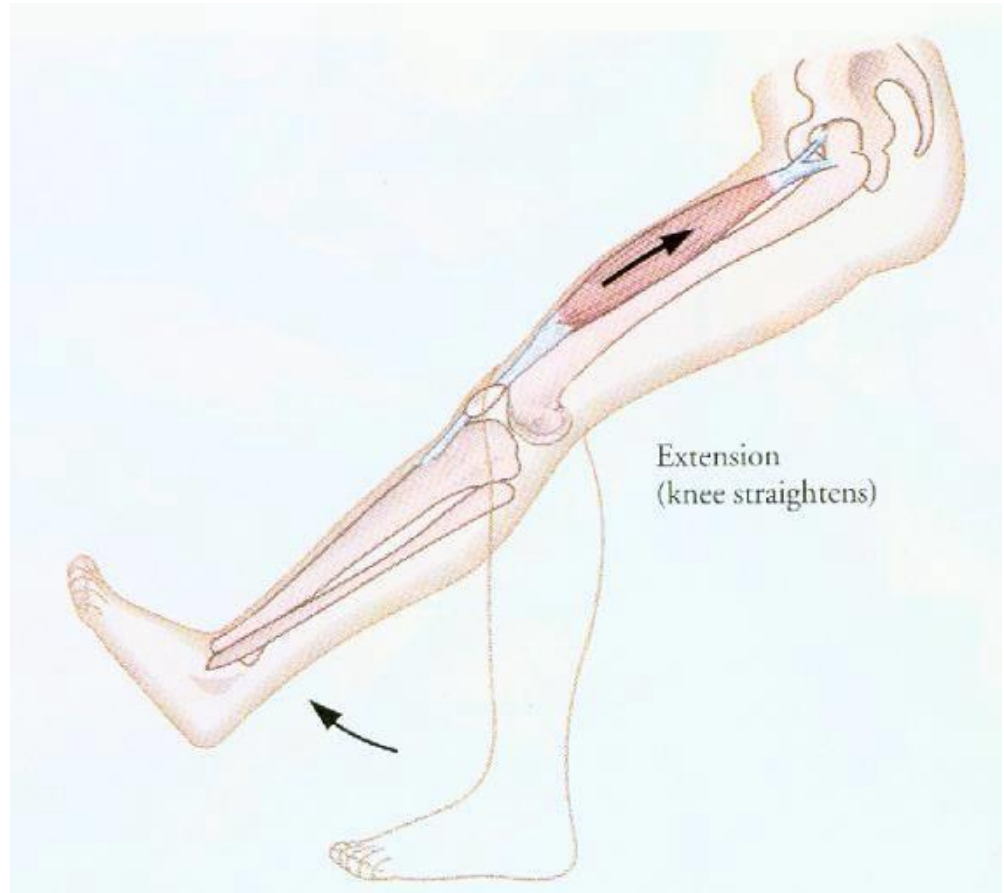
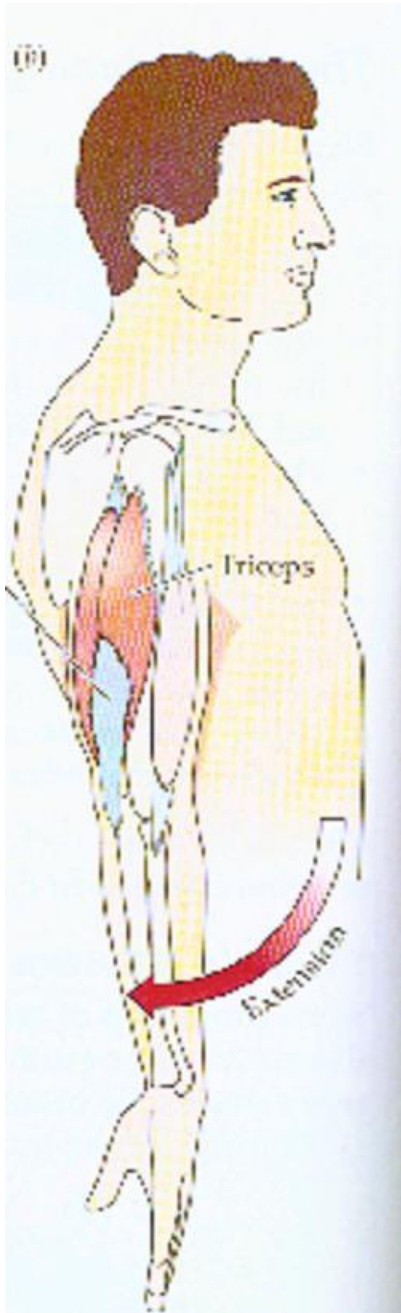


כיווץ השריר הכופף מביא לקיפול המפרק

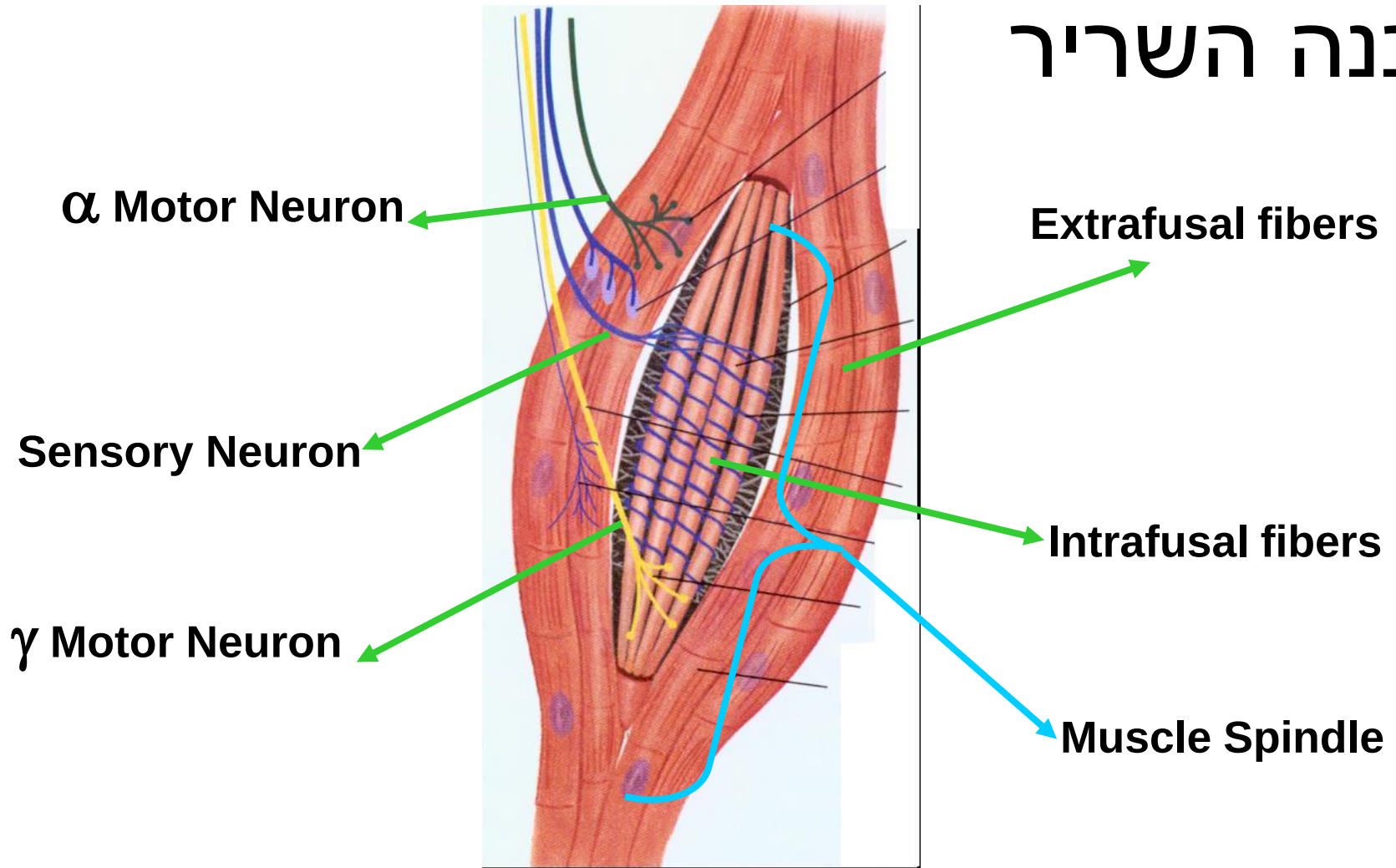


כפיפה Flexion

תנועה הפושטת את האיבר הרחק מהגוף ומביאה
לישור המפרק נקראת פישוט (Extension).
השרירים המעורבים בתנועה כזאת הם
אנטיגרוויטציונים, כלומר עוזרים ליציבה ועמידה תוך
התנגדות לכוחות הגרוויטציונים.

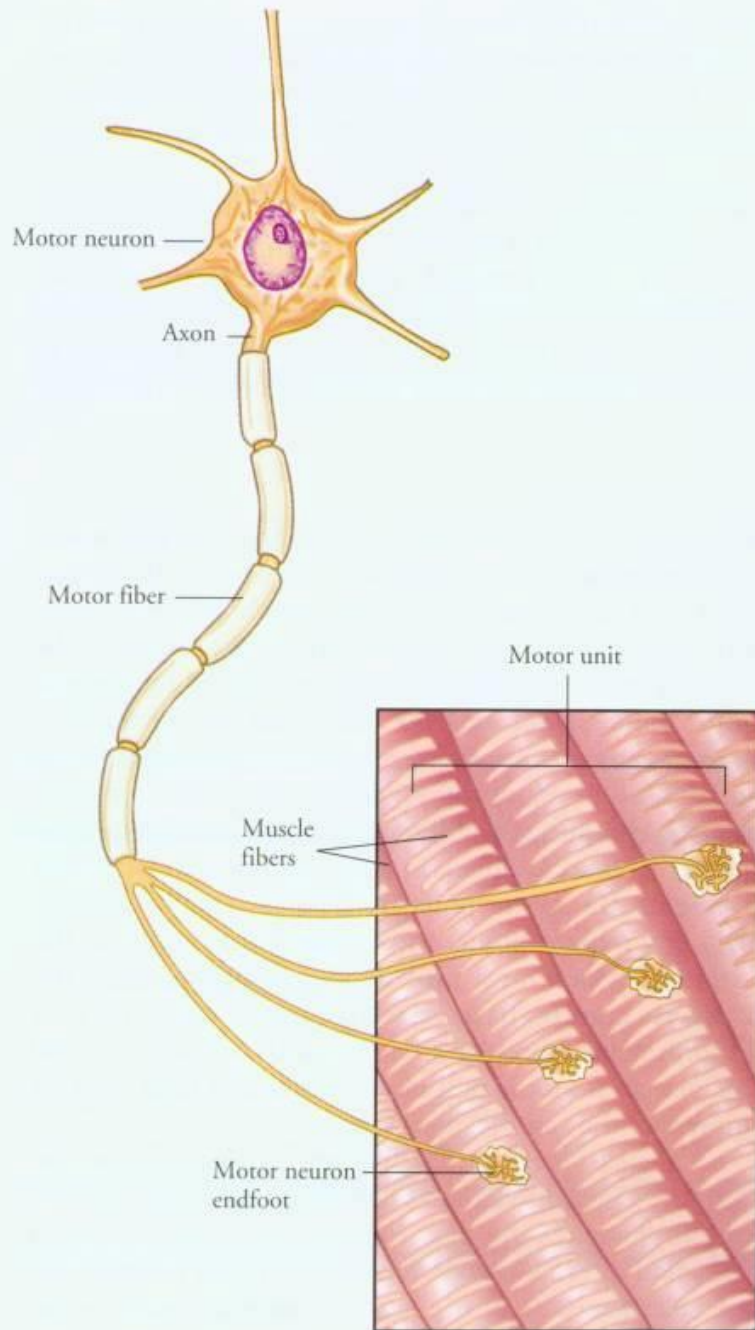


מבנה השריר



השריר השלם מורכב מסיבים רבים, המחולקים לשני סוגים: אינטראפוזלים ואקסטראפוזלים. extrafusal and intrafusal fibers. הסיבים האקסטראפוזלים הם אלה שמפעילים את הכח בשריר. הסיבים האינטראפוזלים משמשים כחיישנים סנסוריים למצב השריר. הסיב האקסטראפוזלי מעוצבב על ידי אקסון של נוירון שיושב בקרן הונטרלית של חוט השדרה ונקרא α -motoneuron. אקסון אחד יכול לעצבב מספר סיבים.

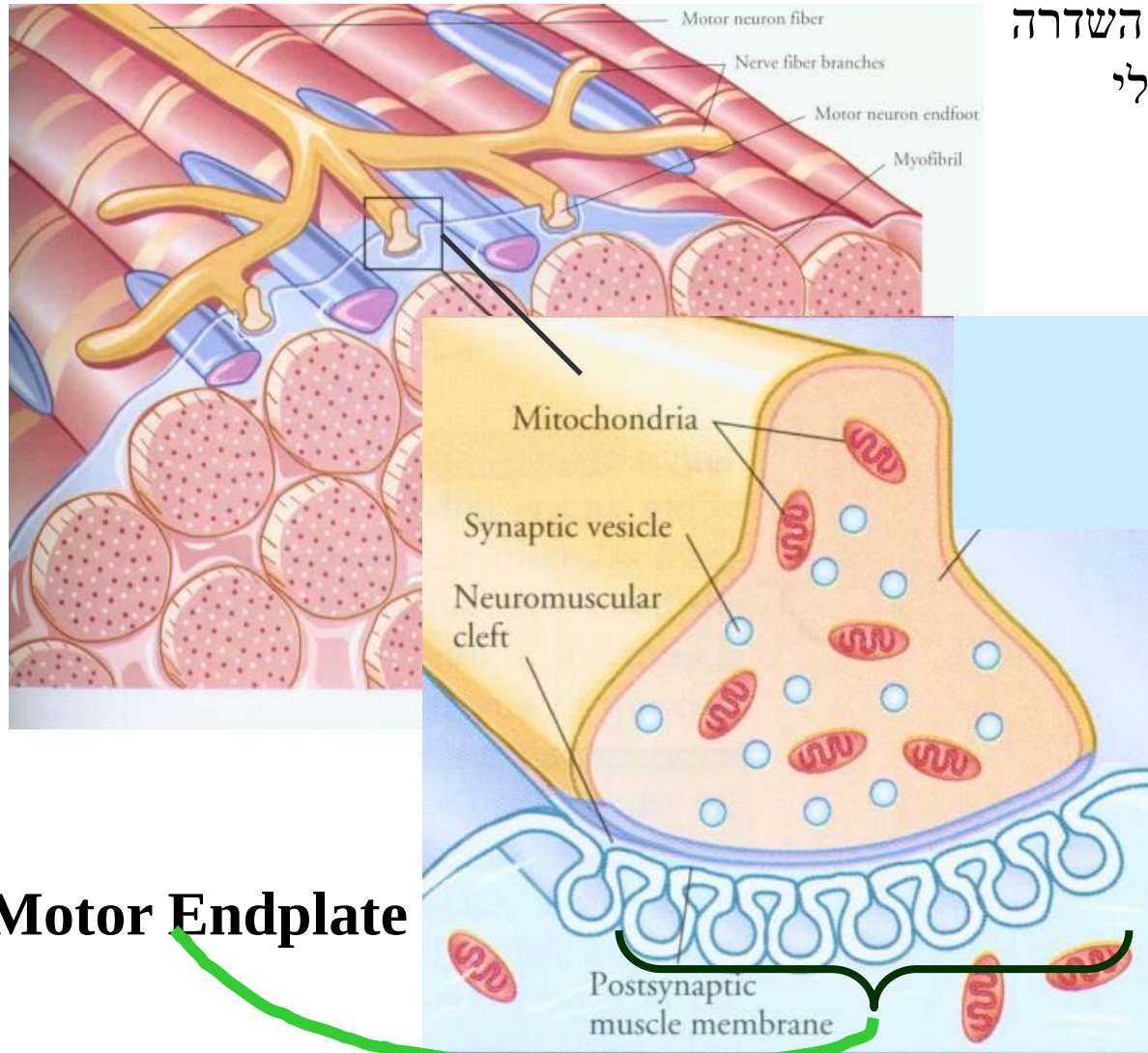
היחידה המוטורית (Motor Unit)



אקסון של מוטונירון אחד יכול לעצבב מספר סיבי שריר. האקסון יחד עם סיבי השריר המעוצבבים על ידו נקראים "היחידה המוטורית" (Motor unit). גודל היחידה המוטורית, כלומר, מספר הסיבים האקסטרפוזלים שנוירון אחד מעצבב משתנה בהתאם לשריר – בשרירים הדורשים דיוק ועדינות, כמו שרירי הידיים והאצבעות, מעוצבב רק מספר קטן של סיבים על ידי נוירון אחד – עצבוב כזה מאפשר הפעלה בדידה ופרטנית של שרירים ואברים ולפיכך כוונון יותר עדין של התנועה. בשרירים שמיועדים לפעולות פחות מדויקות, למשל שרירי הגב, מוטונירון אחד יכול לעצבב מאות סיבים.

האקסון של המוטוניירון מגיע אל סיב השריר ויוצר איתו מבנה דמוי סינפסה שנקרא (NJ) **Neuromuscular junction**.

המוטוניירון הוא נוירון כולינרגי, שגוף התא שלו נמצא בקרן הוונטרלית של חוט השדרה והאקסון שלו הוא חלק מעצב פריפרלי סומטי. הטרמינלים של המוטוניירון משחררים אצטילכולין ב- NJ הצד הפוסט-סינפטי (על גבי השריר) נקרא end-plate ועל גביו נמצאים רצפטורים ניקוטיניים. התקשרות של ACh לרצפטורים הניקוטיניים על גבי השריר גורמת לדפולריזציה של אזור ה end-plate בשריר. הדפולריזציה מתפשטת באופן פסיבי לאורך השריר וגורמת לפתיחת תעלות סידן. כניסת סידן דרך תעלות אלה גורמת לשינוי בחלבונים "מתכווצים" שמובילים להתכווצות של השריר כולו ולהפעלת כח.



Motor Endplate

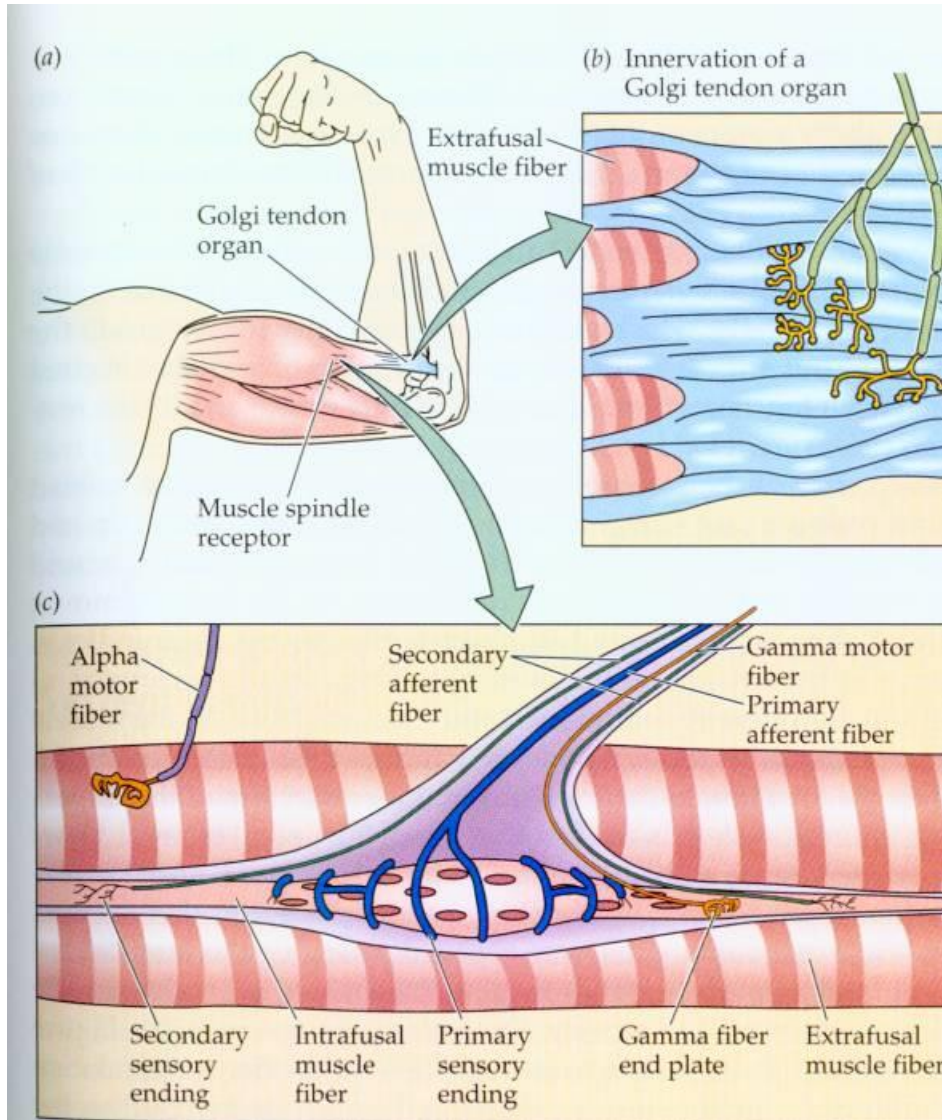
פידבק סנסורי מהשרירים

כדי לשלוט על השרירים יש צורך בפידבק סנסורי לגבי מידת המתיחה של השריר ואורכו. פידבק כזה מתחיל בשני סוגי חיישנים לפרמטרים האלה שמעבירים את המידע דרך אקסונים של המערכת הסומטוסנסורית.

חיישנים בגידים
לגבי מידת
המתיחה של
השריר



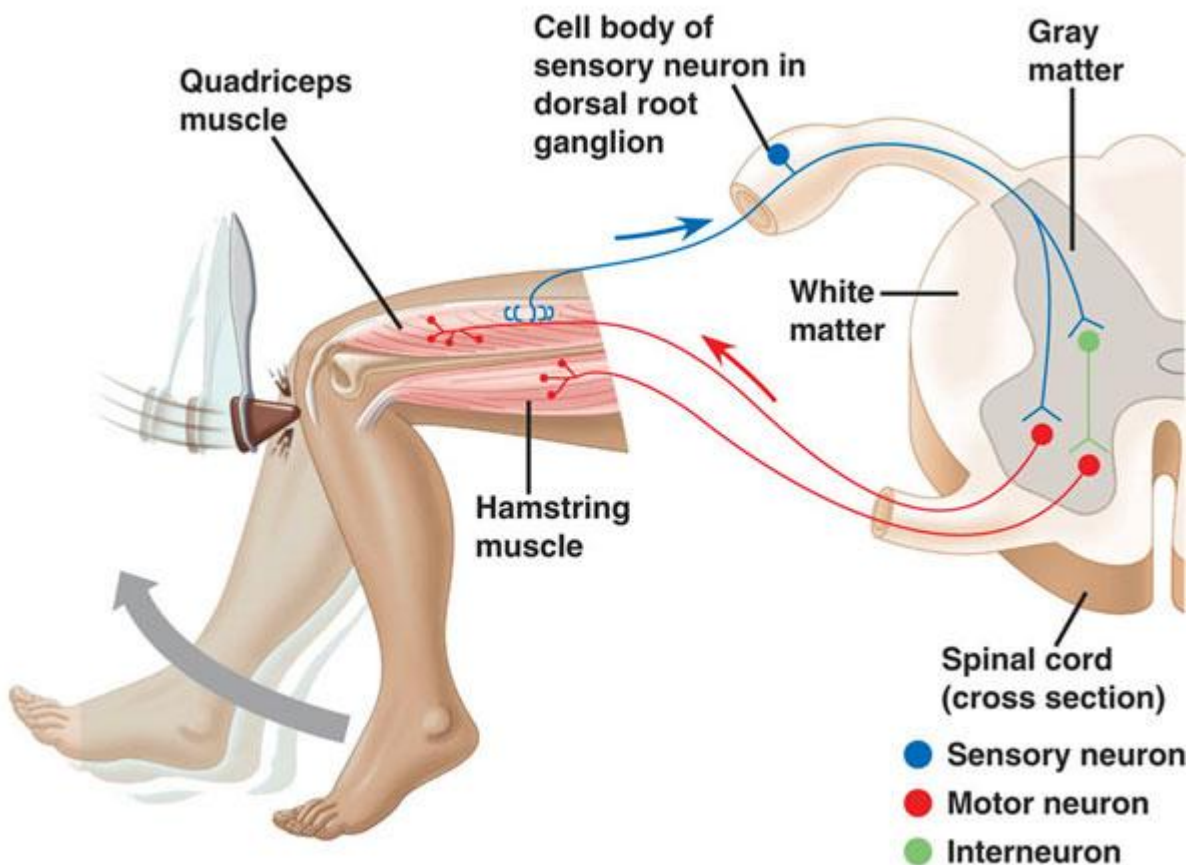
חיישנים בשריר
עצמו (סיבים
אינטרפוזליים) לגבי
אורך השריר



רפלקסים (Reflexes)

הפעילויות ההתנהגותיות הפשוטות ביותר נקראות רפלקסים. רפלקס הוא תגובה אוטומטית, קבועה (בלתי משתנה), מהירה ופשוטה יחסית, המועלית על ידי גרוי סנסורי מסוים. רפלקסים מתווכים על ידי תאים בחוט השדרה, ומהווים את הרמה הפשוטה ביותר של האירגון במערכת המוטורית.

תגובה רפלקסיבית מהירה בהרבה מתגובת תנועה הדורשת התערבות של המערכת המוטורית המוחית. עם זאת, למרות שרפלקסים יכולים להתרחש ללא השפעה של המוח, במצב נורמלי אפילו הרפלקסים הכי פשוטים מפוקחים על ידי המוח, שמווסת את הפעילות של נוירונים בחוט השדרה שאחראים לבצוע הפעולה הרפלקסיבית.



The monosynaptic Stretch reflex

דוגמא לרפלקס הפשוט ביותר היא רפלקס "קפיצת הברך" (knee jerk) שבו משתמשים באופן סטנדרטי בבדיקות נוירולוגיות. ברפלקס זה נותנים טפיחה על הגיד של השריר שנמצא בקדמת השוק. השריר מתארך לרגע וזה גורם לו באופן רפלקסיבי לשוב ולהתכווץ – דבר זה מתבטא בבעיטה של הרגל.

הרפלקס מתווך על ידי שני

נוירונים בלבד – נוירון

סנסורי ב-DRG מקבל

אינפורמציה מסיב אינטרפוזלי

על כך שהשריר התארך.

הנוירון הזה שולח אקסון

לחוט השדרה שעושה סינפסה

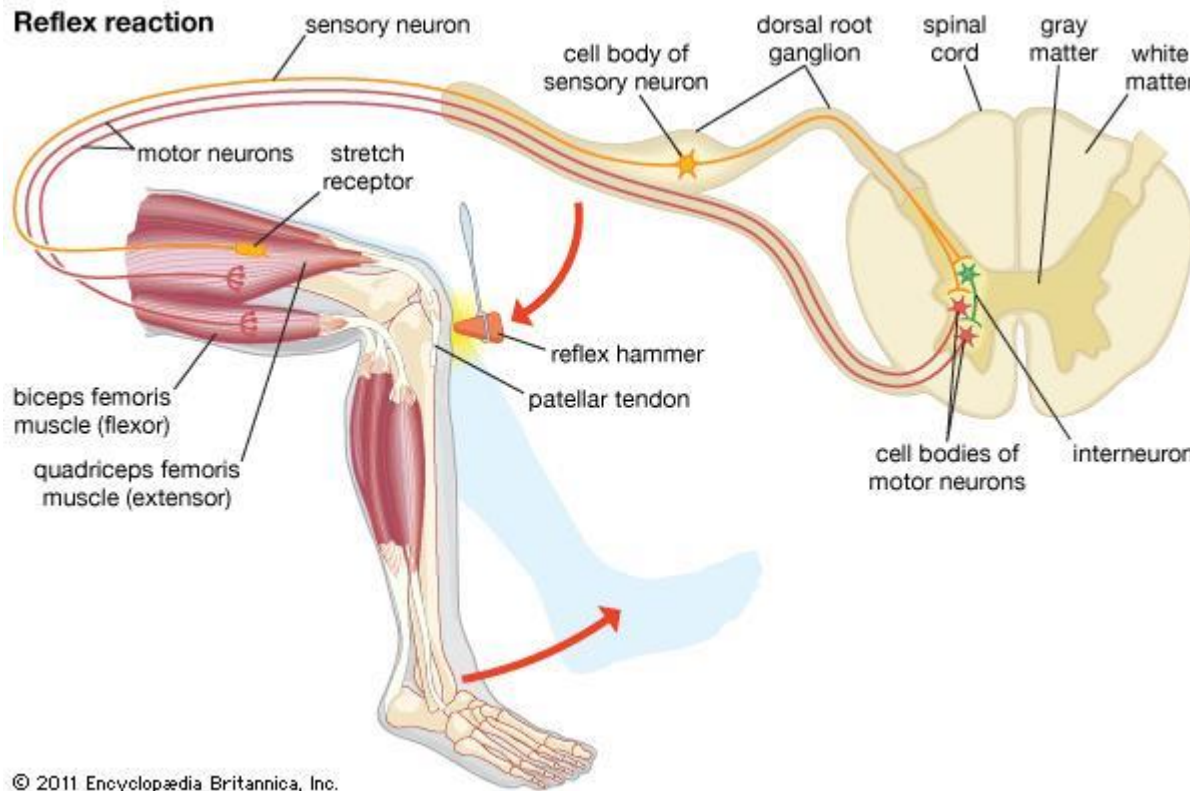
ומפעיל נוירון מוטורי בקרן

הונטרלית אשר גורם

להתכווצות השריר. כל זה

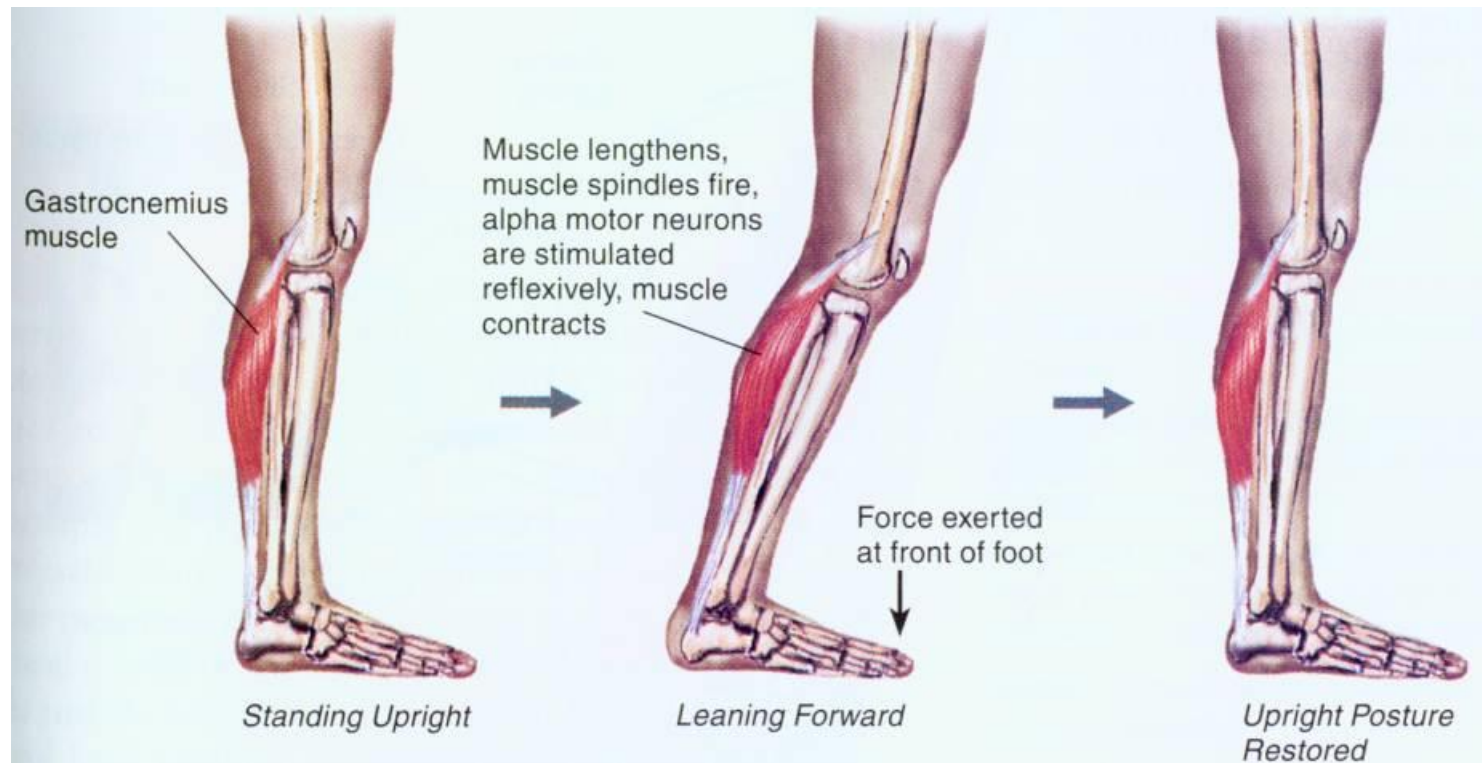
לוקח כ- 50 מילישניות ונקרא

רפלקס המתיחה המונוסינפטי.



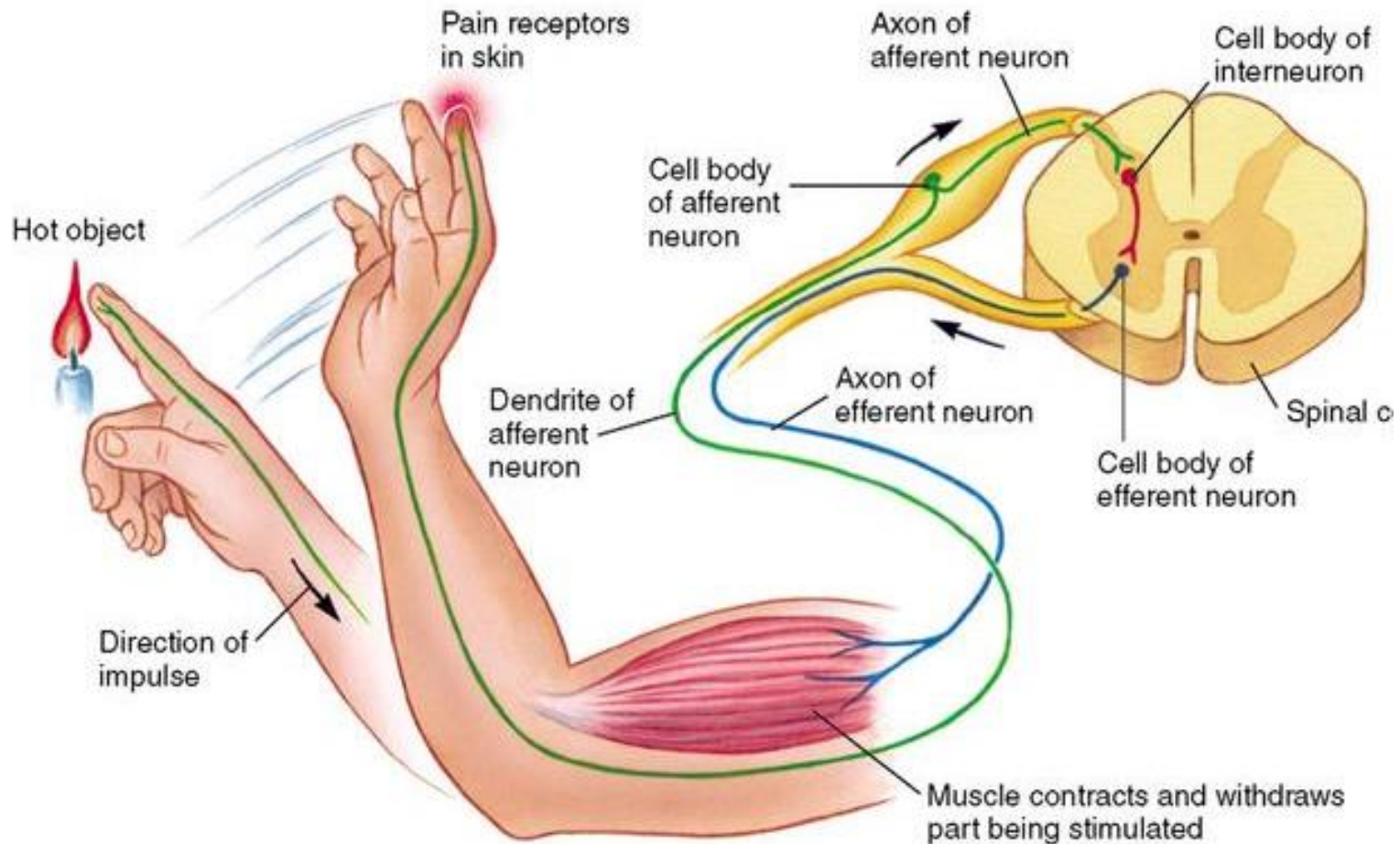
רפלקסים פשוטים (מסוג רפלקס מתיחה) עוזרים לשמור על יציבה

רפלקס המתיחה מסייע לשמירה מתמשכת על יציבה זקופה: התארכות השריר מפעילה סיבים אינטרפוזלים. האינפורמציה (בצורת פוטנציאלי פעולה) מהנוירונים הסנסורים שמחוברים לסיבים האינטרפוזלים מגיעה לחוט השדרה וגורמת להפעלה של המוטוניירונים שמעצבים את השריר וגורמים למתיחה שמחזירה את הגוף למצב זקוף.



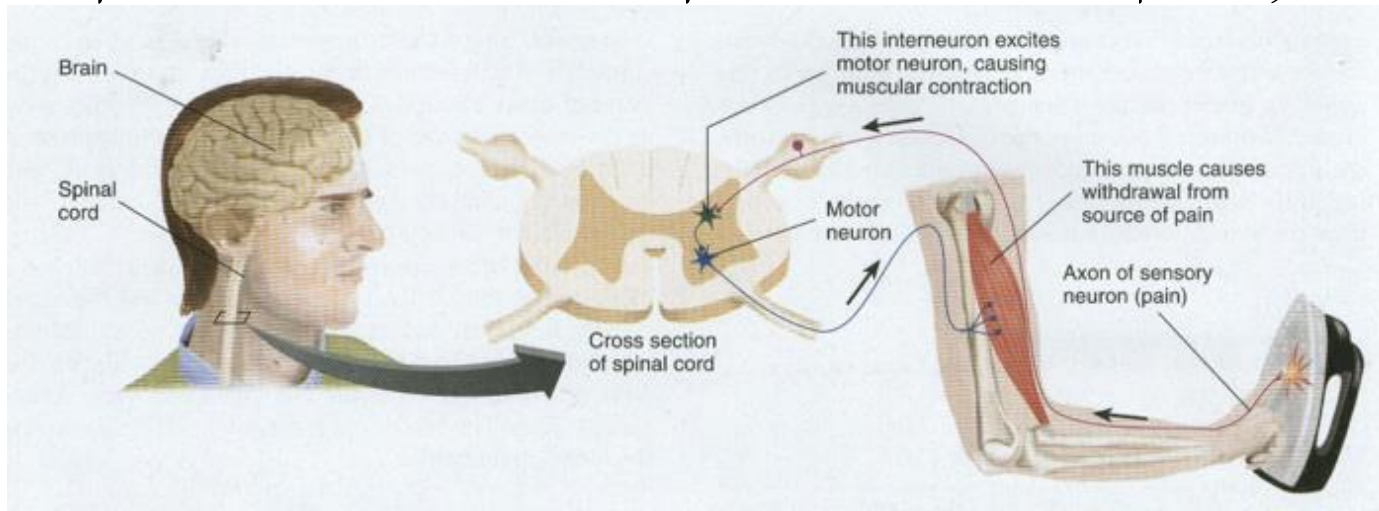
The withdrawal pain reflex

כל שאר הרפלקסים השידרתיים מערבים יותר מאשר שני נוירונים, ונקראים רפלקסים פוליסינפטיים. רפלקסים אלה מערבים גם אינטרנוירונים, שמתווכים בין הקלט הסנסורי והפלט המוטורי. למשל משיכת היד כאשר נוגעים במשהו חם או דוקר (המשיכה מתבצעת עוד לפני שגרוי הכאב הגיע אל המודעות).

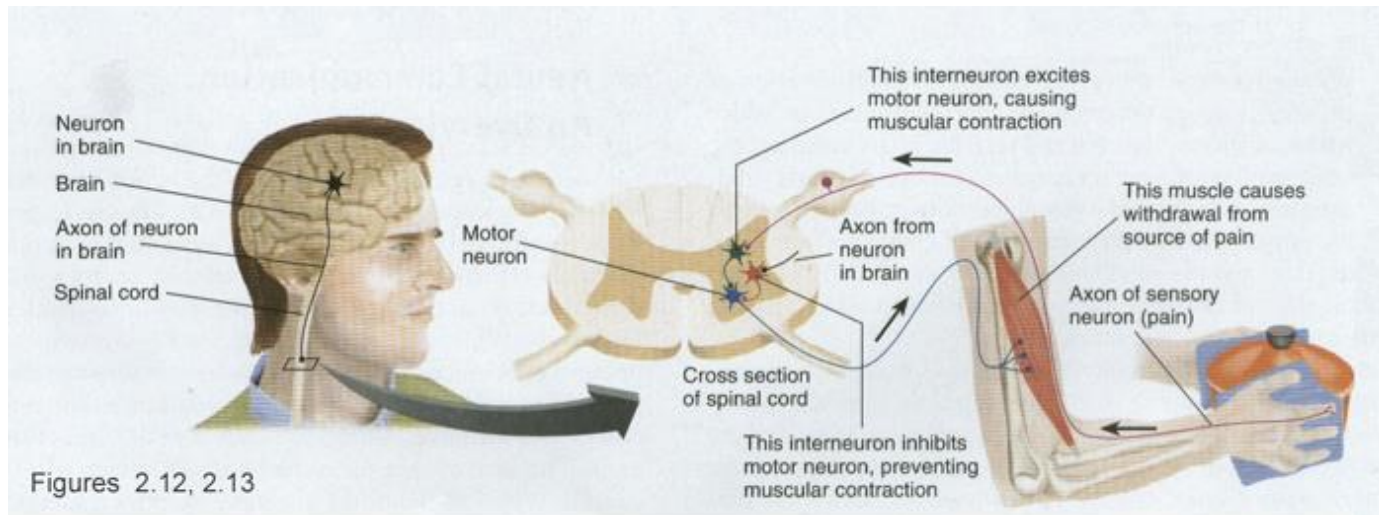


וויסות של רפלקס הנסיגה על ידי המח

באופן נורמלי, רפלקס הנסיגה יוביל לכווץ של השריר ונסיגה מהמגהץ החם

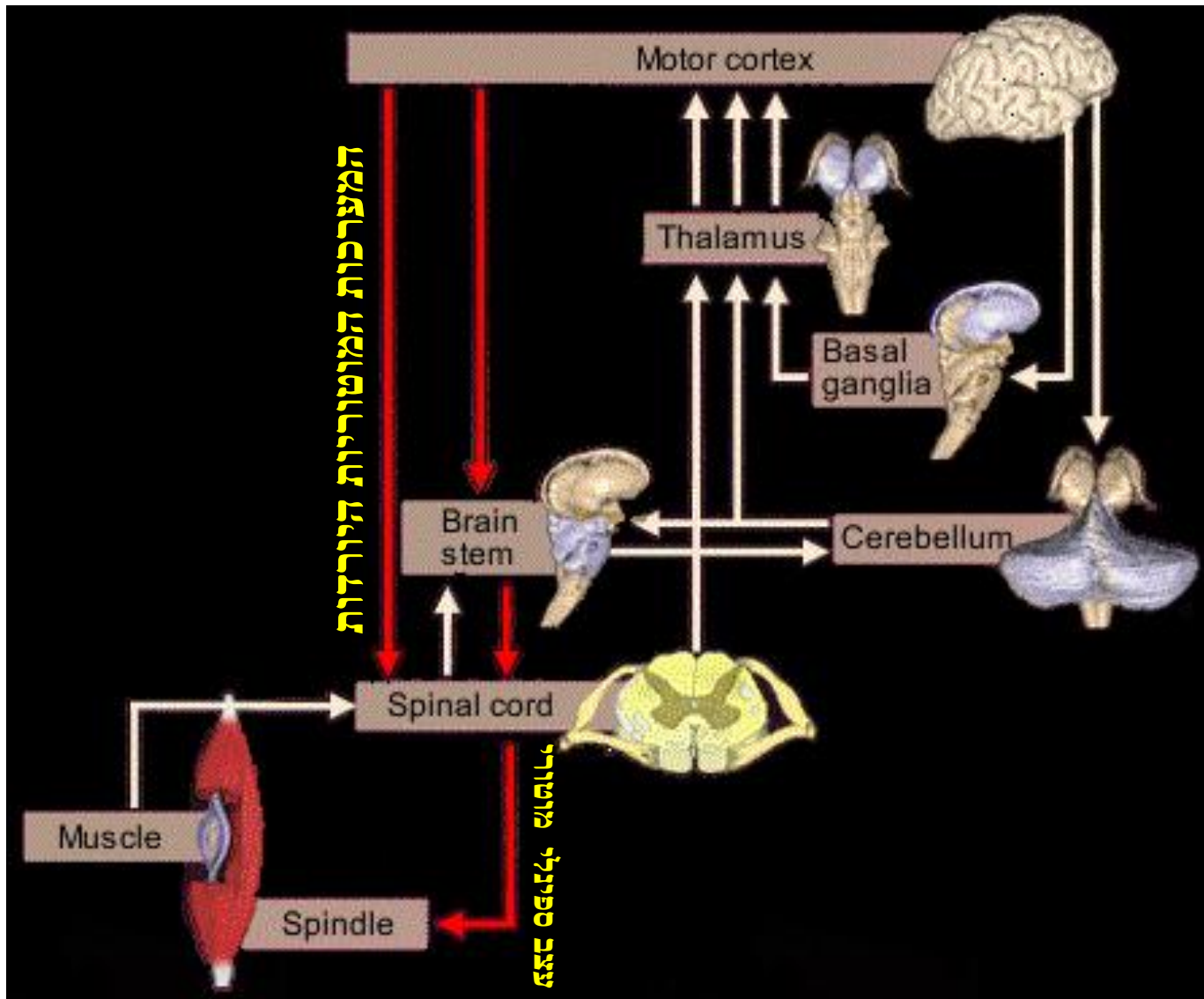


אם הסיר הלוהט מכיל אוכל חשוב בדרך למסיבה, המח שולח קלט אינהיביטורי לנוירונים בחוט השדרה שאחראים לרפלקס הנסיגה ולכן הסיר לא מופל למרות הסבל בהחזקתו.



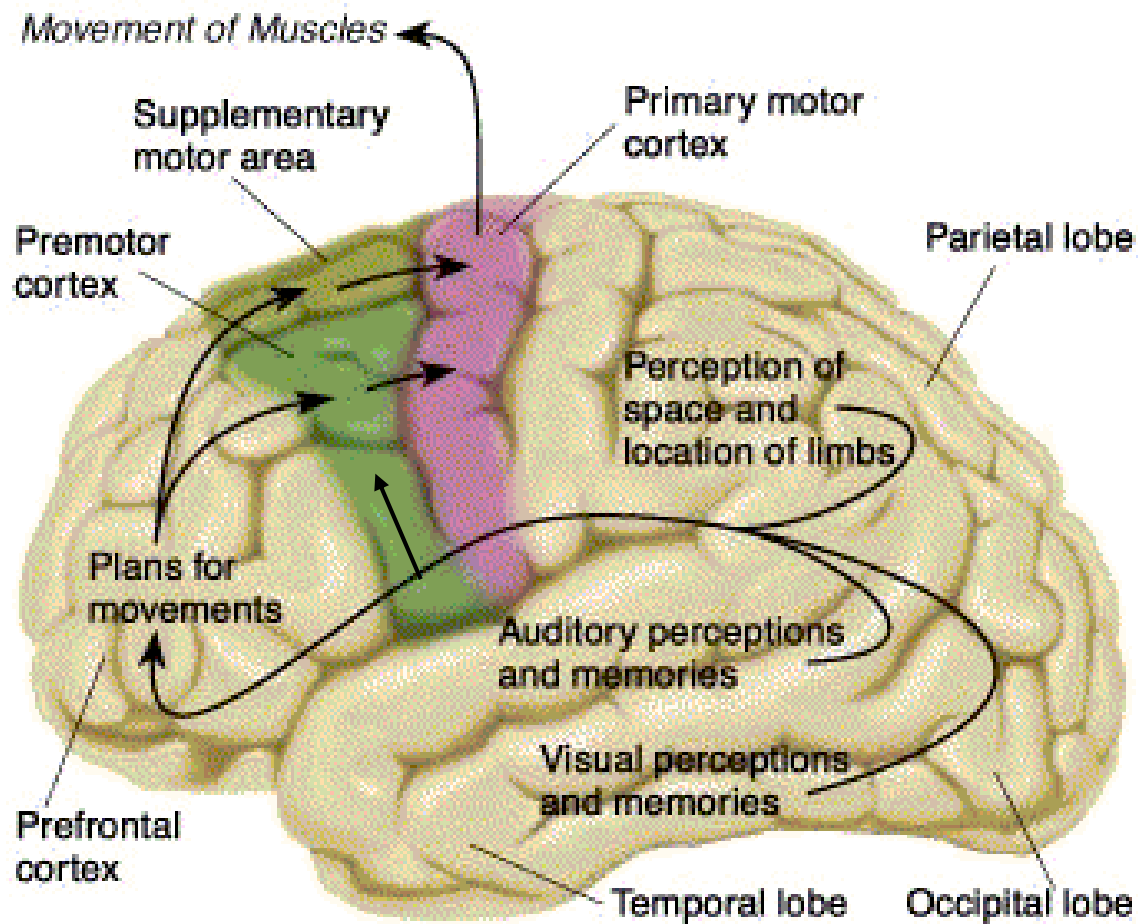
Figures 2.12, 2.13

מערכות השליטה המוחית על תנועה



השליטה המוחית על תנועה מערבת מספר אזורים מוחיים, חלקם בקורטקס וחלקם באזורים תת-קורטיקלים. מניירונים באזורים מוטוריים בקורטקס ובגזע המוח נשלחים מספר נתיבים עיצביים אל הקרן הוונטרלית של חוט השדרה אשר שולטים על אספקטים שונים של הפעילות המוטורית. מערכות אלה נקראות המערכות המוטוריות היורדות.

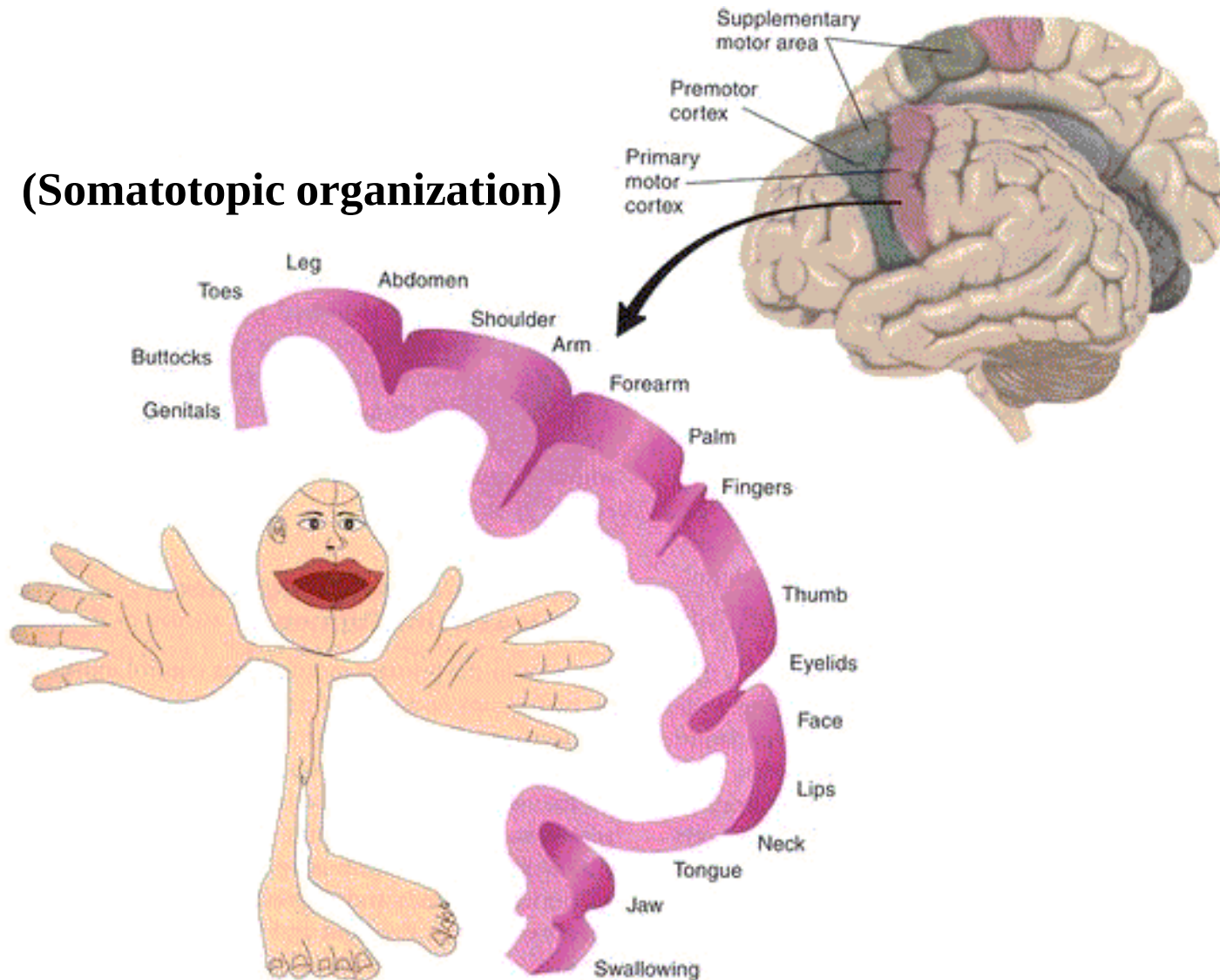
בנוסף למערכות אלה קיימים שני אזורים גדולים במח שמוסטים את הפעילות המוטורית – הגרעינים הבזליים והצרבלום.



תנועות רצוניות מאורגנות בקליפת המוח המוטורית, הכוללת את האזור המוטורי הראשוני (מסומן בוורוד) ושני אזורים מוטוריים אסוציאטיביים (יונימודליים – מסומנים בירוק). הקלט לאזורים אלה מגיע מאזורים סנסוריים "גבוהים" ומהאונה הפרה-פרונטלית, שמהווה אזור אסוציאטיבי מולטימודלי שאחראי לאירגון הכולל והיוזמה לפעילות הגלובלית.

כלומר, על סמך התפיסות העכשוויות (בזמן אמיתי, שמגיעות מאזורי עיבוד סנסורי מתקדם), הזכרונות שממוקמים בחלקים פוסטריריים של המוח, המוטיבציות והצרכים הפיזיים והריגשיים שמעובדים ונשלחים מהמערכת הלימבית, האונה הפרה-פרונטלית "מחליטה" על האסטרטגיה לתנועה. על סמך האסטרטגיה הכוללת הזאת נעשה התרגום לסדרות מורכבות של הזזות שרירים על ידי האזורים המוטוריים השניוניים ולבסוף ניתנות הפקודות להזזה של סיבי שריר בודדים על ידי הקורטקס הראשוני.

(Somatotopic organization)



קליפת המוח
הראשונית נמצאת
ב -
precentral
gyrus והיא
מאורגנת בצורה
סומטוטופית (ניתן
להדגים אירגון זה
על ידי גרוי מוחי
ישיר באזור זה
שגורם לתזוזה
של שרירים או
אברים מסוימים).

אזורים שמצריכים שליטה יותר מדויקת של סיבי שריר בודדים בצורה פרטנית, תופסים שטח יותר גדול (בעיקר שרירי הידיים והאצבעות, ושרירי הפנים, שחשובים לתקשורת ורבליית ולא ורבליית).

הקידוד העיצבי של תנועה בקורטקס המוטורי הראשוני

מעבר לאירגון הסומטוטופי, **התאים בקליפת המוח המוטורית יוצרים רשתות שחשובות עבור הוצאה לפועל של תנועות** – למשל תנועת הושטה של היד מחייבת התכווצות של שרירים בכתף, זרוע עליונה ואמה, ולכן נוירונים באזורים ששולטים על שרירים אלה יהיו מחוברים ברשת של קשרים סינפטיים חזקים יחסית כדי שיוכלו להפעיל זה את זה באופן סינכרוני.

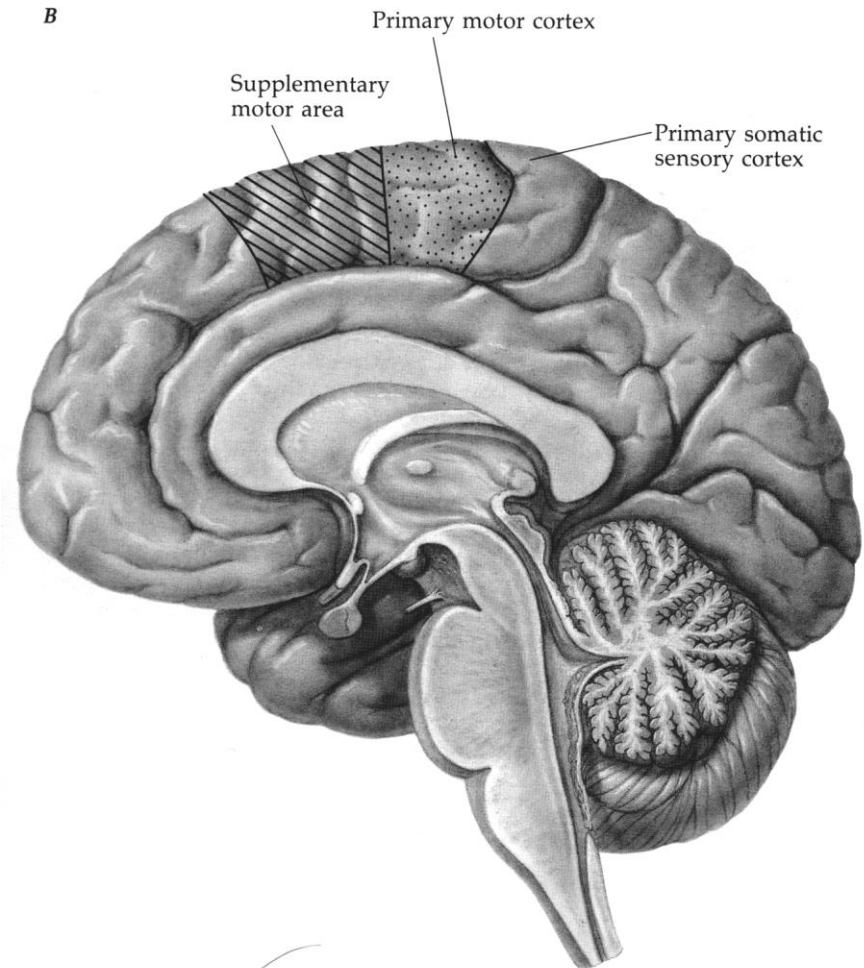
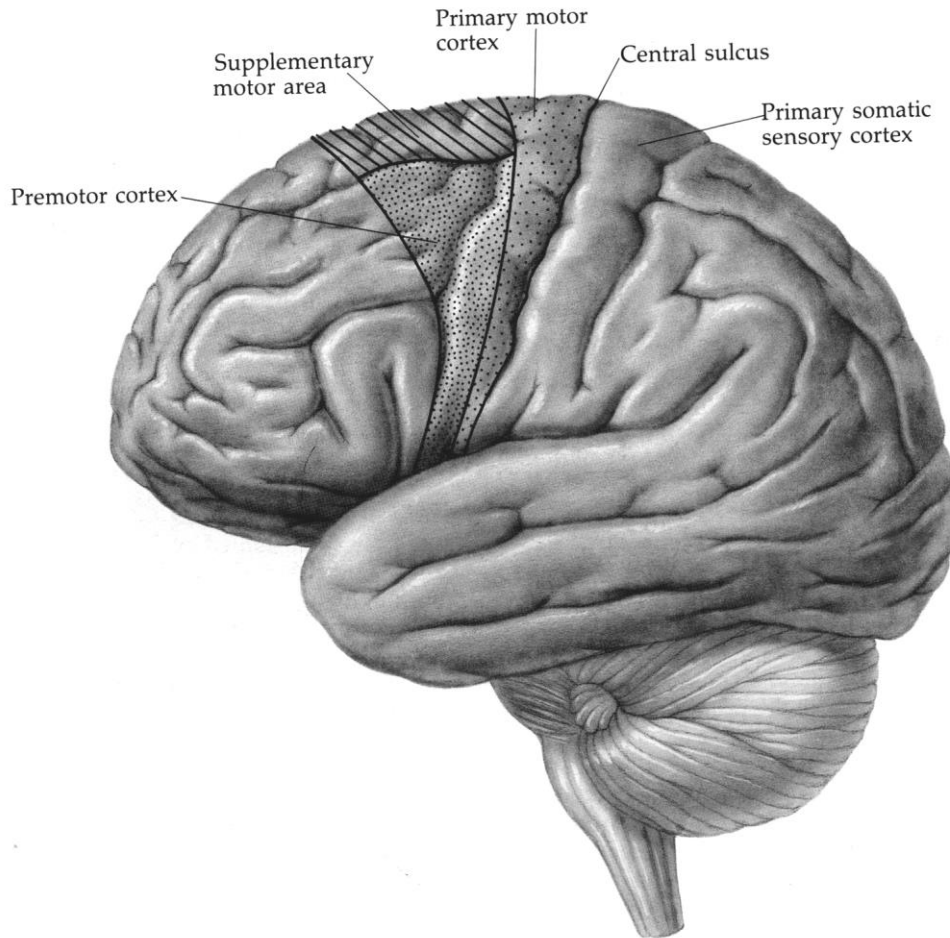
רישום מתאים בודדים בקורטקס הראשוני מראה שאין קשר חד ערכי בין פעילות של תא בודד ובין **תנועה מאורגנת של האיבר**. במהלך התנועה פועלים נוירונים רבים, שכל אחד מהם מפעיל את השריר בכוון מסוים (לאו דווקא בכוון התנועה). כוון התנועה ומידתה (ווקטור התנועה) נקבע על פי ממוצע הכוון ועוצמת הירי של כל אוכלוסית הנוירונים שפועלים ביחד. ממצא זה הוא קריטי אם רוצים לנבא את כוון התנועה על סמך רישום הפעילות החשמלית של תאים בקורטקס (למשל, לצורך הפעלה של מכשיר חיצוני באמצעות המחשבה).

התאים בקליפת המוח הראשונית מקודדים את הכח שהשריר צריך להפעיל, כלומר ככל שהכח הדרוש יותר גדול, למשל, משקל גדול יותר שצריך להזיז, כך קצב הירי של פוטנציאלי הפעולה יהיה יותר גדול.

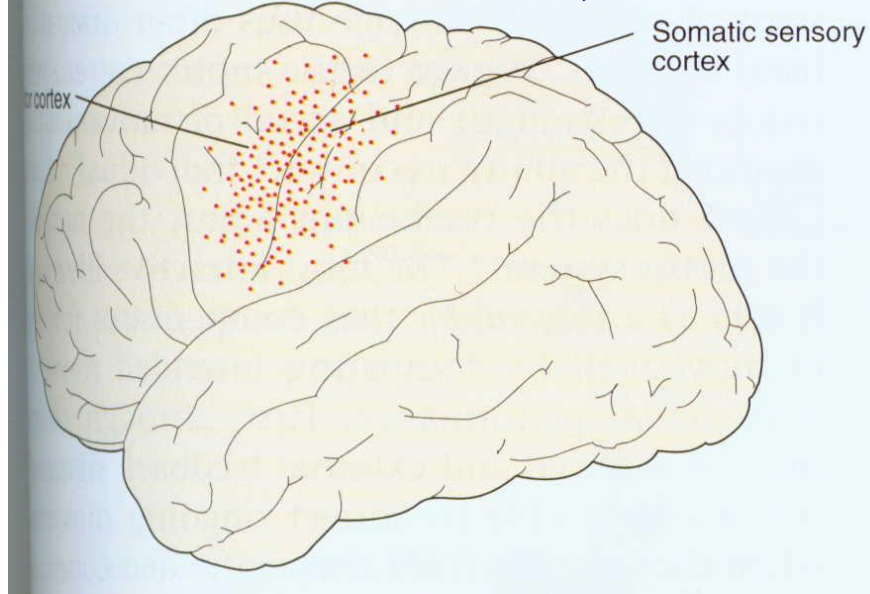
• **נוירון קורטיקלי שמפעיל שריר מסוים בזמן תנועה לא תמיד יפעל כשהשריר זז**, למשל, נוירון שקשור בהפעלה של היד בתנועה רצונית לא יפעל כשהיד מונפת בתנועה של כעס (שמאורגנת על ידי נוירונים במערכת הלימבית ובגזע המוח). או נוירון שמפעיל בצורה רצונית את שרירי הלסת לא יופעל כשהאדם עוסק בלעיסה ומפעיל את אותו שריר באופן כמעט אוטומטי.



ישנם שני אזורים מוטוריים שניוניים שנמצאים אנטריורית (רוסטרלית) לקורטקס הראשוני: בחלק הדורסלי נמצא ה supplementary motor cortex (SMA). ונטלית לאזור זה, נמצא האזור הקורטיקלי הפרה-מוטורי (Premotor cortex)



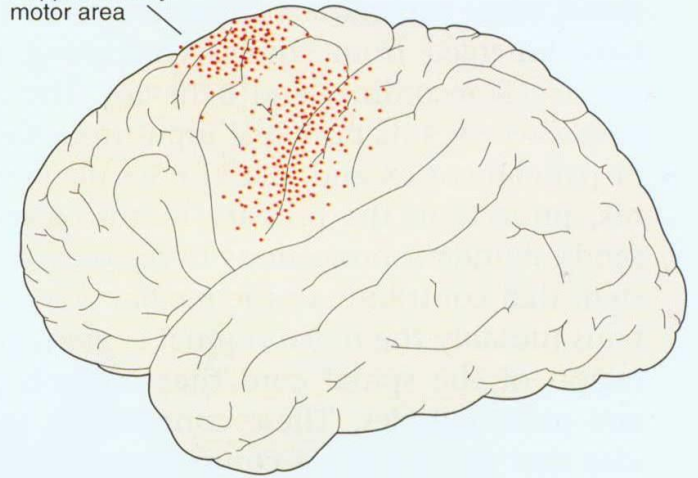
תנועת כוויץ פשוטה של האצבעות



ביצוע סדרת תנועות של האצבעות

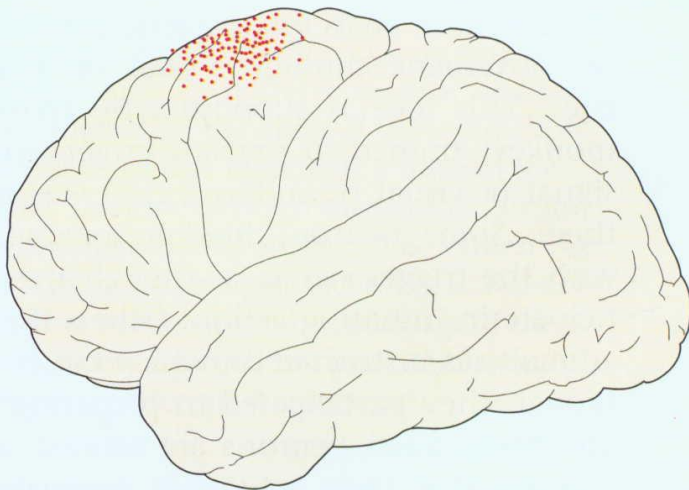
B Finger movement sequence (performance)

Supplementary motor area



חזרה מנטלית על סדרת התנועות של האצבעות

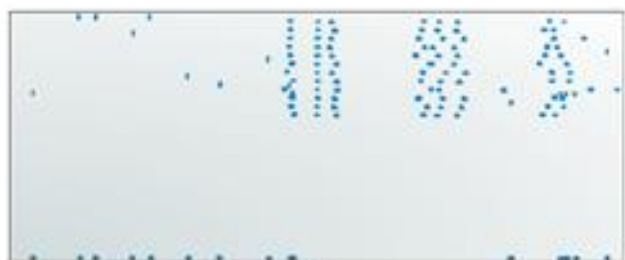
C Finger movement sequence (mental rehearsal)



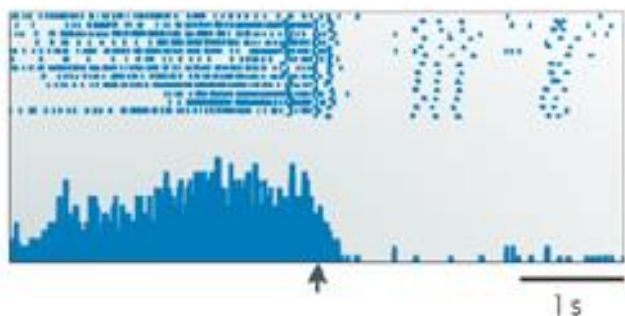
ל supplementary motor (SMA) cortex יש תפקיד חשוב בתכנות של סדרות מורכבות של תנועות. לדוגמא, אזור זה מופעל (כפי שמודגם במדידת PET) לא רק כשמבצעים סידרה מורכבת של תנועות של האצבעות אלא גם כשמדמיינים (עושים "חזרה מנטלית") על סידרה כזאת.



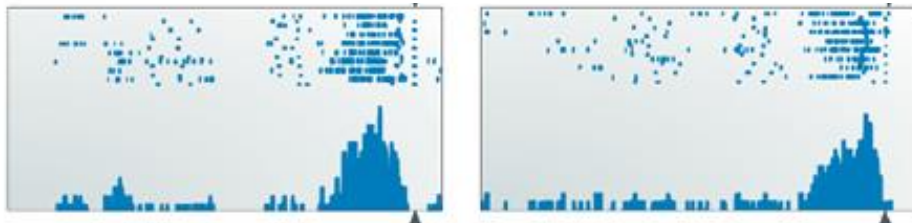
משוך דחוף סובב



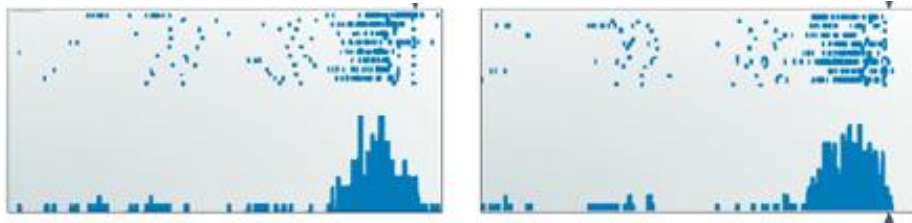
דחוף משוך סובב



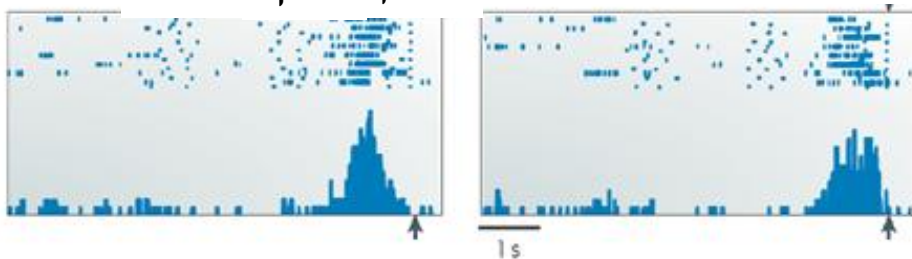
b דחוף משוך סובב דחוף סובב דחוף



סובב דחוף משוך דחוף סובב דחוף



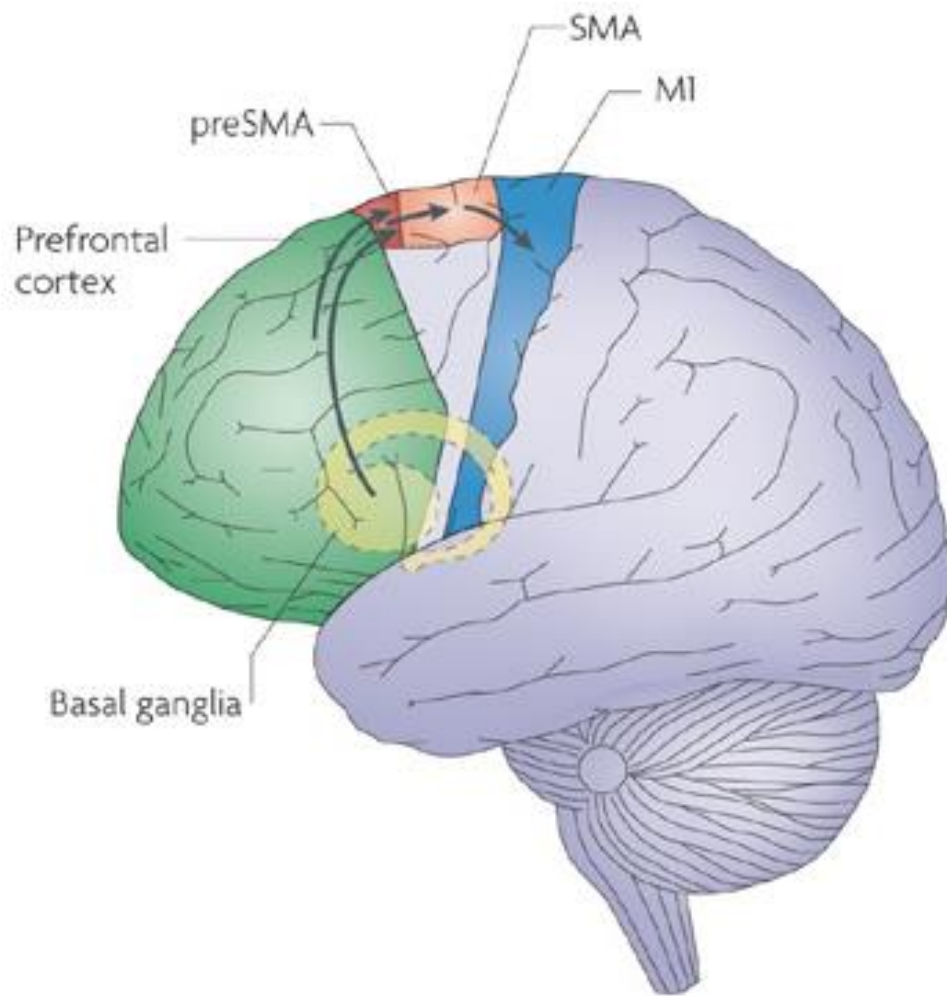
דחוף סובב משוך דחוף סובב משוך



נוירון זה יורה פ"פ רק לפני תנועה שלישית בסדרה, לא חשוב אם התנועה השלישית היא דחיפה, משיכה או סיבוב ולא חשוב מה התנועה שקדמה לה.

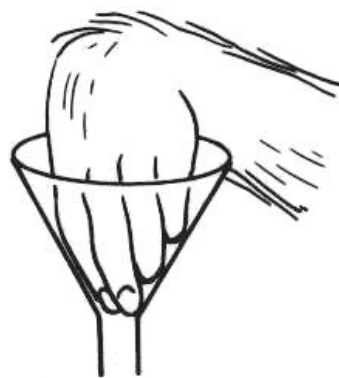
רישום מנוירון ב SMA מראה שהוא פועל לפני תנועת סיבוב, אבל רק אם היא מופיעה אחרי דחיפה ולא אחרי משיכה.

החלק הקדמי של ה SMA, חשוב
ביצירת תנועה ספונטנית. אזור זה
מקבל אינפורמציה מהקורטקס
הפרה-פרונטלי, שאחראי לייזמת
האסטרטגיה ההתנהגותית
הכוללת, מהאונה הפרייטלית
ומהגרעינים הבזליים, ויוצר את
התחושה של רצון לבצע פעילות
מוטורית שעולה מבפנים – כלומר
שלא נשלטת בתגובה לגרוי
חיצוני כלשהו (גריה חשמלית
בבני אדם, במלך ניתוח מח,
מעלה את הרצון לפעולה
כלשהיא).



הרס של אזור ה-SMA (יוביל ל: 1) בתקופה ראשונית אחרי הנזק – חסר שימוש באיברים מסוימים (בהתאם לגודל הנזק – motor neglect). (2) חוסר יכולת לבצע סדרות מורכבות של תנועות. (3) חוסר יכולת לכוון את היד והאצבעות במהלך משימה מוטורית רצונית מורכבת (למשל הוצאת בוטן מתוך בארית קטנה).

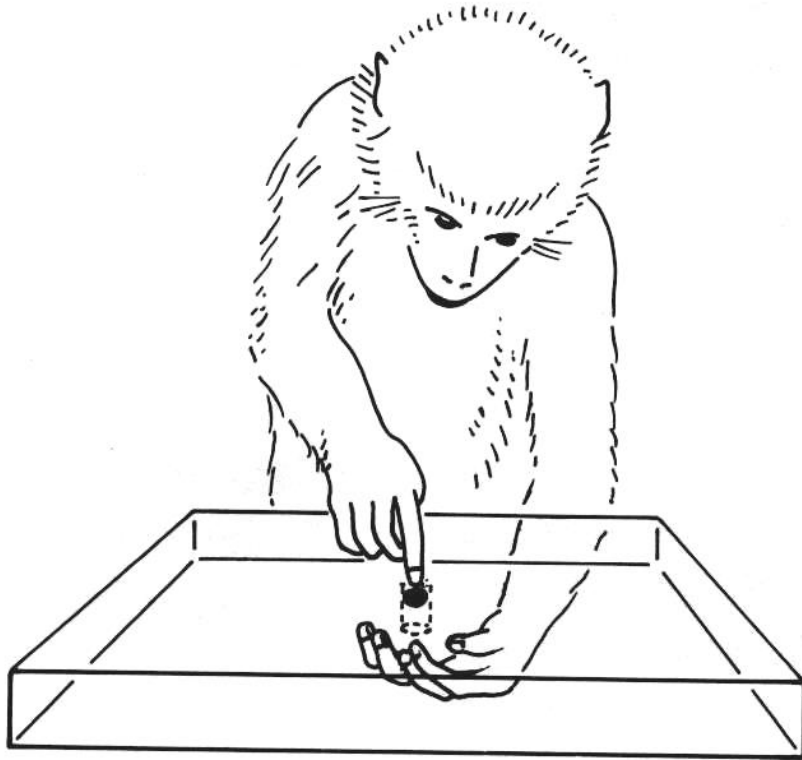
IPSI



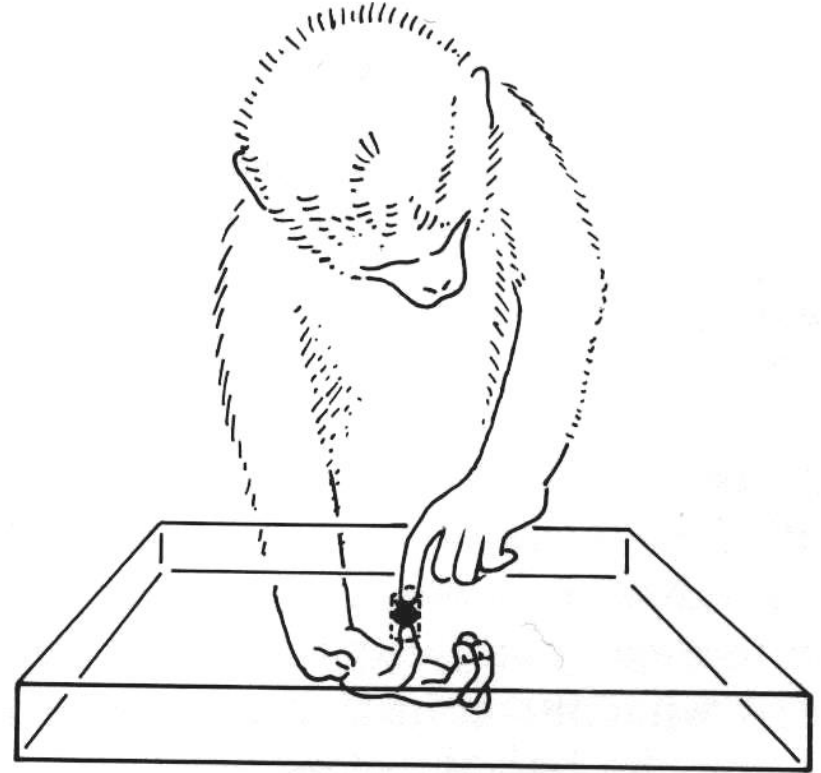
CONTRA



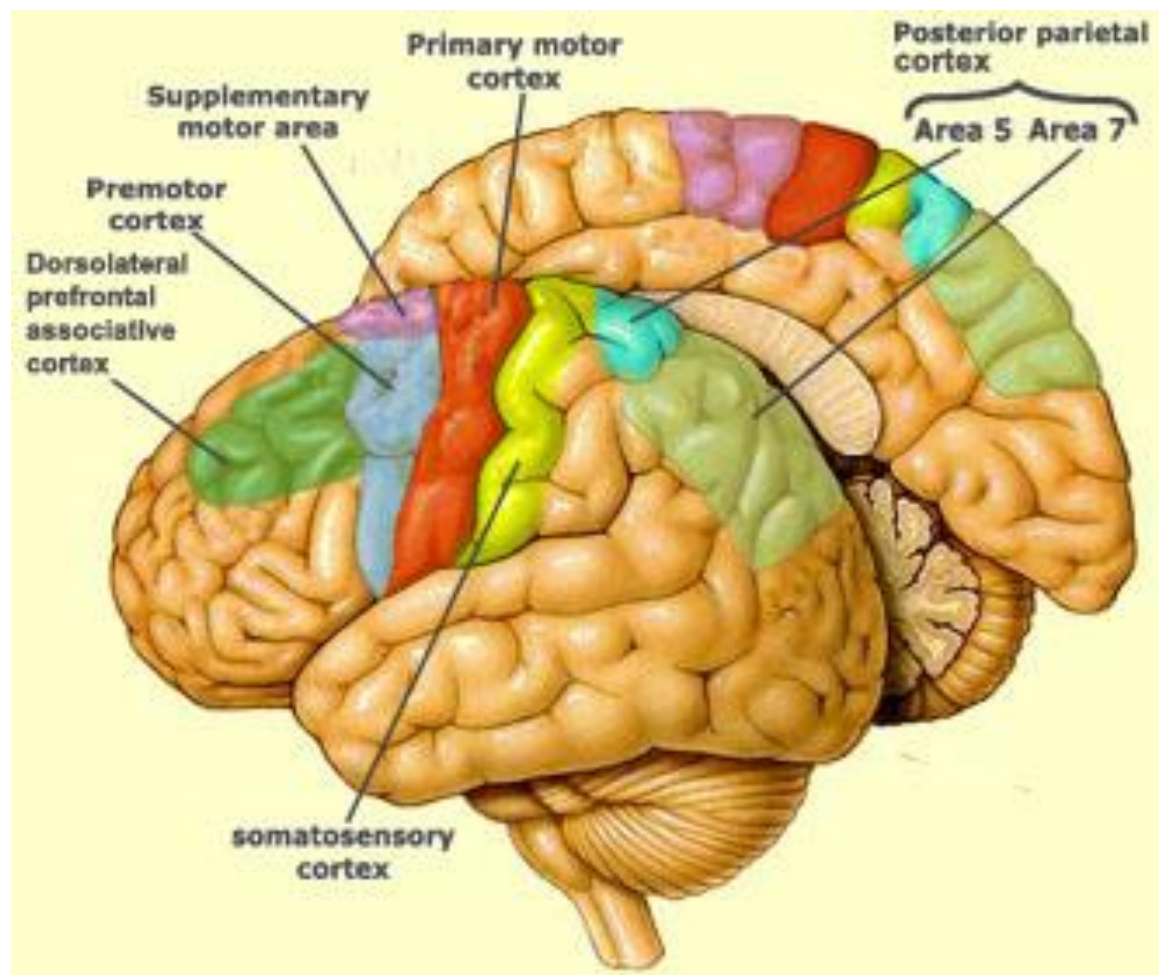
Normal animal



5 months after right SMA lesion



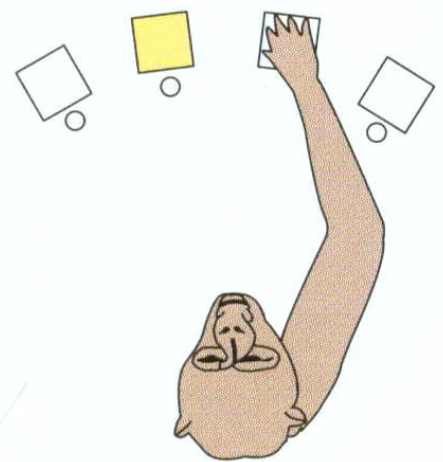
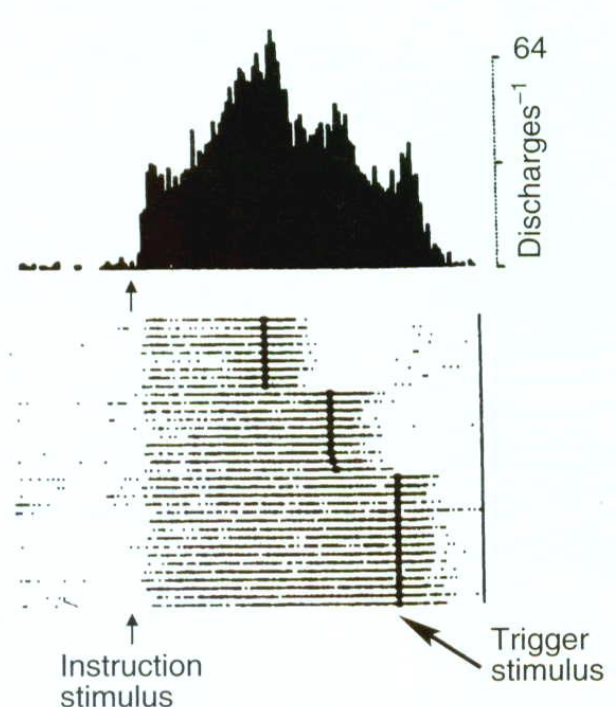
4) חוסר יכולת לתאם בין הידיים במשימה מוטורית כלשהיא (למשל הוצאת מזון דרך חור על ידי דחיפתו דרך חור בשולחן ותפישתו בצד התחתון של השולחן).



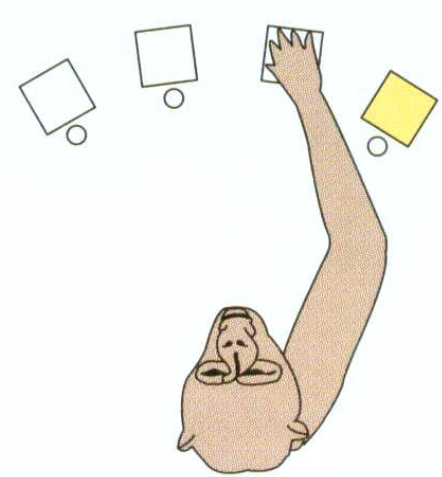
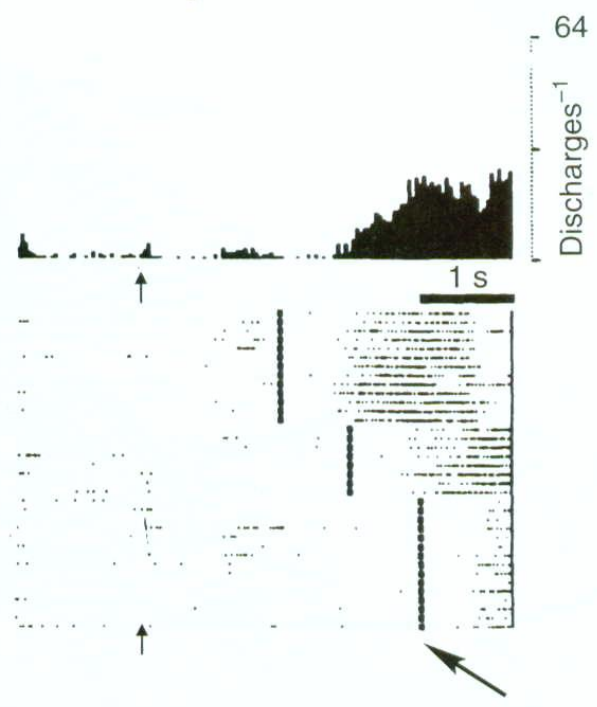
האזור הפרה-מוטורי
(Premotor cortex)
(מסומן בצבע כחול) נמצא
ונטרלית ל SMA. הוא
מקבל אינפורמציה מאזורים
סנסוריים רבים, בעיקר מה-
posterior parietal lobe,
שאחראי על תפיסת המרחב.
האזור הפרה-מוטורי עוסק
בהכנה לקראת תנועה
ובהדרכה מרחבית של
התנועה בהתאם לגרויים
סנסוריים.

התאים באזור זה מופעלים זמן רב יחסית לפני תחילת התנועה וכן במהלך התנועה.

Instruction left



Instruction right



בתמונה ניתן לראות את הפעילות של נוירון בודד בקורטקס הפרה מוטורי. הקוף מניח יד על הריבוע השלישי משמאל. הדלקת ריבוע אחר באור צהוב מהווה סימן עבור הקוף (instruction) שעליו להתכונן ללחוץ על ריבוע זה כשיקבל סימן נוסף (trigger). כל נקודה בשורות האמצעיות היא פוטנציאל פעולה בזמן נתון (ציר הזמן הולך משמאל לימין בכל שורה וכשהשורה נגמרת עובר לשורה התחתונה יותר). ההיסטוגרמה למעלה סוכמת את פוטנציאלי הפעולה לאורך הזמן. לאחר למידת המטלה, הנוירון יורה בזמן ההכנה להזזה לריבוע משמאל, אבל לא לפני הזזה לריבוע מימין.

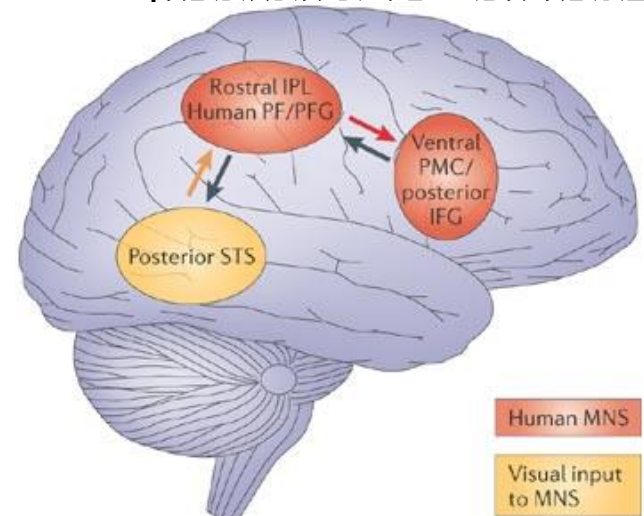
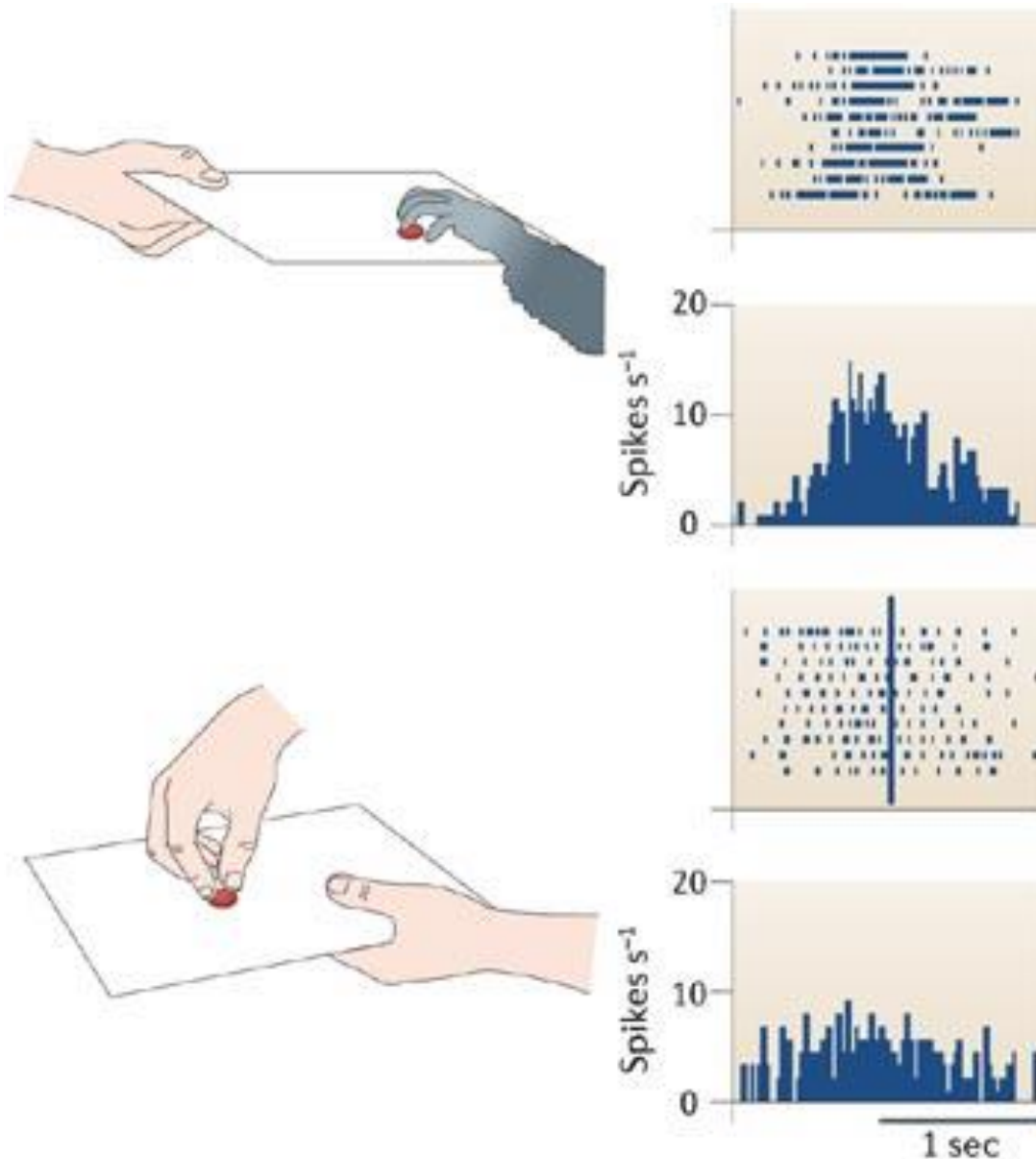
Preparation for movement is reflected by neural activity in the premotor cortex



הסרט מראה
(באמצעות רישום
אלקטרופיסיולוגי
במח של קורף)
את הפעילות של
תא מסוים באזור
הפרה מוטורי
בזמן כוונה
לתנועה בכוון
מסוים (ולא
אחר).

נוירוני מראה (Mirror neurons)

איפיון חשוב של תאים בקורטקס הפרה מוטורי (כולל האזור של הגירוס הפרונטלי התחתון (F5) שנמצא קצת קדימה לאזור זה) הוא יכולתם להגיב כאשר מסתכלים על התנהגות מוטורית של אחרים. למשל במח של קופים נמצאו נוירונים באזור זה שפועלים גם כאשר הקוף מבצע פעולה כלשהיא (תפיסה של חתיכת מזון), וגם כאשר הקוף מסתכל על הנסיין תופס חתיכת המזון. נוירונים אלה נקראים נוירוני מראה "mirror neurons". [אזור נוסף של נוירוני מראה קיים באונה הפרייטלית התחתונה]



a

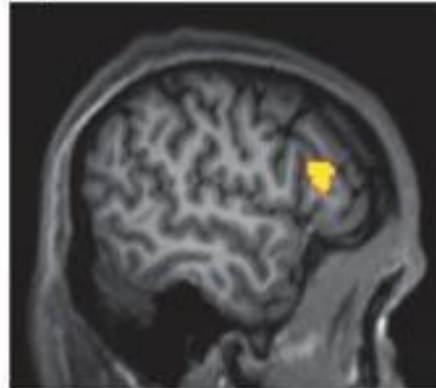
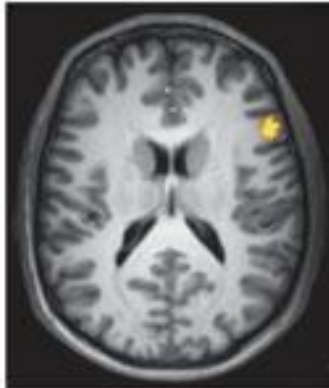
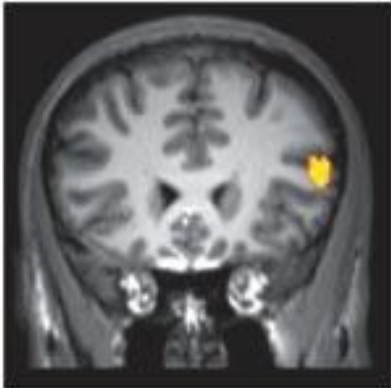


גם אצל בני אדם ניתן להראות
בשיטות הדמיה נוירוני מראה
שפועלים בזמן חיקוי מוטורי
(למשל, חיקוי של נגינה בגיטרה).
יתרה מזאת – נוירוני המראה
עוזרים לנו לא רק בחיקוי ולמידת
תנועות מהאחר אלא בהבנת
הפעולה של האחר – כלומר
כשאנו רואים את האחר עושה
משהו, מופעל האזור בקורטקס
הפרה מוטורי שהיה מופעל אילו
היינו עושים את אותה פעולה
בעצמנו, וזה מה שמהווה את
ההבנה שלנו לגבי הפעולה של
האחר.

b Coronal

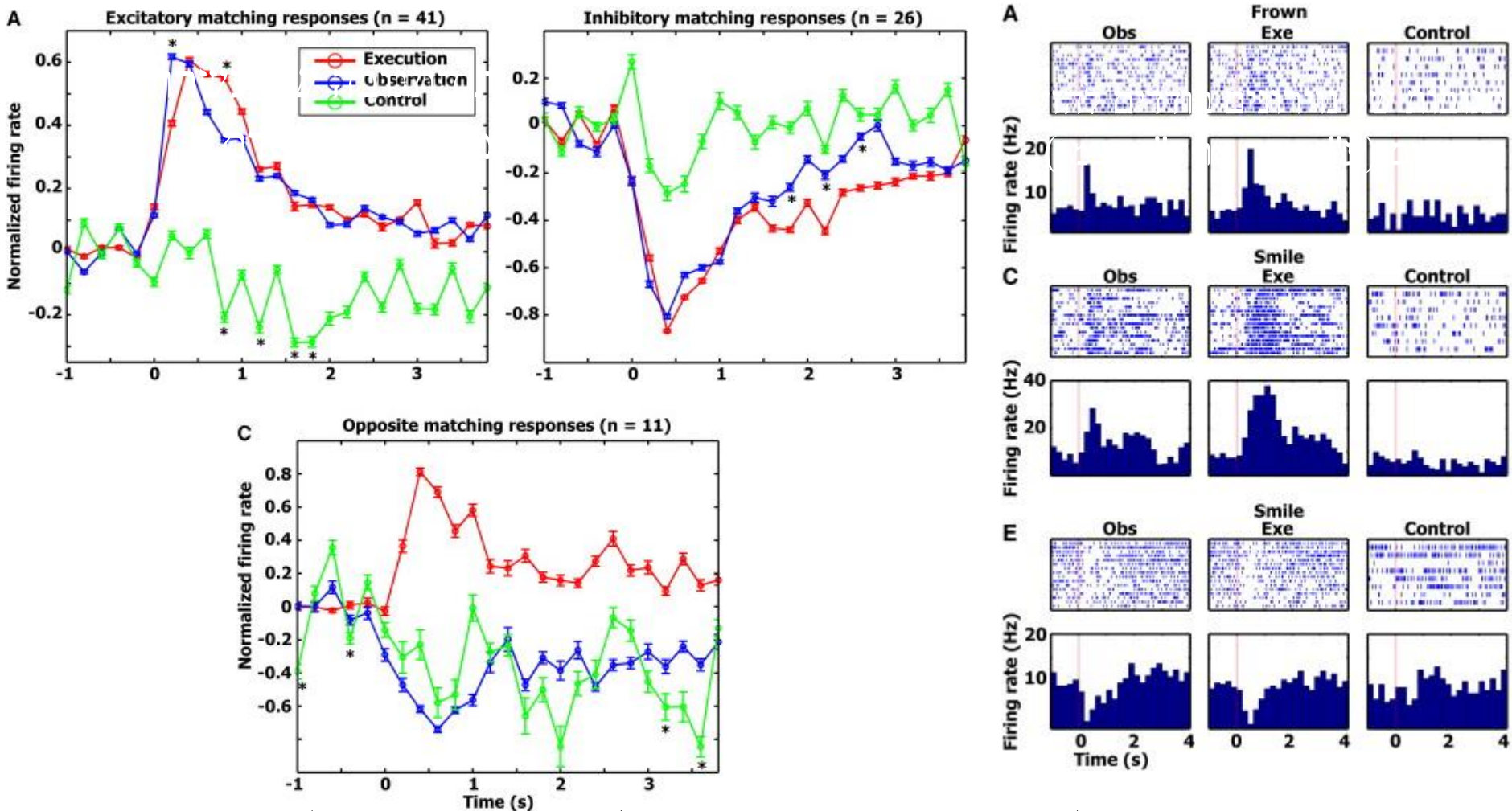
Axial

Sagittal



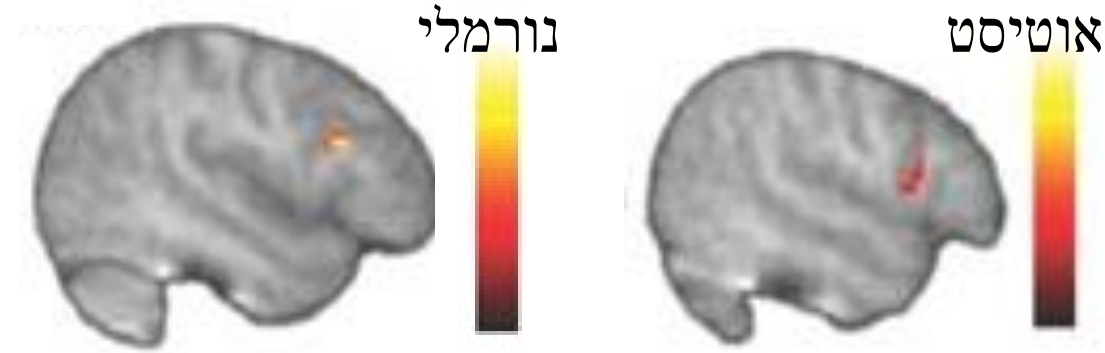
בדוגמא משמאל למעלה ניתן להראות הפעלה של אזור נוירוני המראה כאשר רואים מישהו תופס כוס כדי
לשתות. ההפעלה היא יותר חלשה כאשר רואים מישהו תופס כוס כדי לפנות אותה מהשולחן.
כלומר ההפעלה היא לא רק בהתאם לפעולה של האחר אלא גם בהתאם לכוונה שלו. באופן דומה מערכת
נוירוני המראה פועלת בתגובה להבעות הפנים של האחר – במקרה זה מערכת נוירוני המראה עוזרת לנו
לפרש את רגשותיו של האחר.

רישום מניירוני מראה בקורטקס של בני אדם



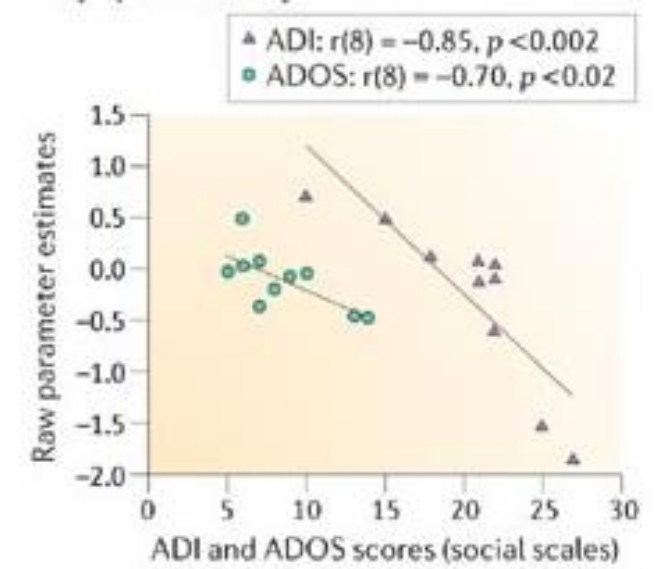
ישנה טענה שההתפתחות של נוירוני המראה היא ייחודית לבני אדם וקרתה בשלב מאוחר יחסית באבולוציה הפרימטית/אנושית. מערכת זו איפשרה אבולוציה מואצת כיוון שהיא זו שאחראית על יכולת החיקוי והעברת הידע הנילמד – כגון איך לעשות כלים, איך להדליק אש, וכו'. כלומר, זוהי מערכת מוחית שמאפשרת את המערכת התרבותית שמייחדת בני אדם ומאפשרת את הצלחתם הביולוגית בצורה כל כך דרמטית.

a



נקודה מענינת היא שאצל אנשים עם אוטיזם יש פעילות מופחתת של מערכת נוירוני המראה למשל כשמבקשים ילדים נורמלים ואוטיסטים לחקות הבעות פנים כמו אלה שמוצגות בתמונה משמאל, יש יותר פעילות אצל נורמלים (הרבה צבע צהוב מציין הפעלה חזקה) מאשר אצל אוטיסטים (אין כמעט צהוב = פחות הפעלה).

ניתן לראות מתאם בין מידת ההפעלה של נוירוני המראה והציון לחומרת האוטיזם (בהתאם לשני סולמות מדידה מקובלים – ADI ו- ADOS). יתכן שחסר התפקוד של מערכת נוירוני המראה מהווה את אחת הסיבות לחסר היכולת של אוטיסטים להבין את כוונותיו ורגשותיו של האחר.



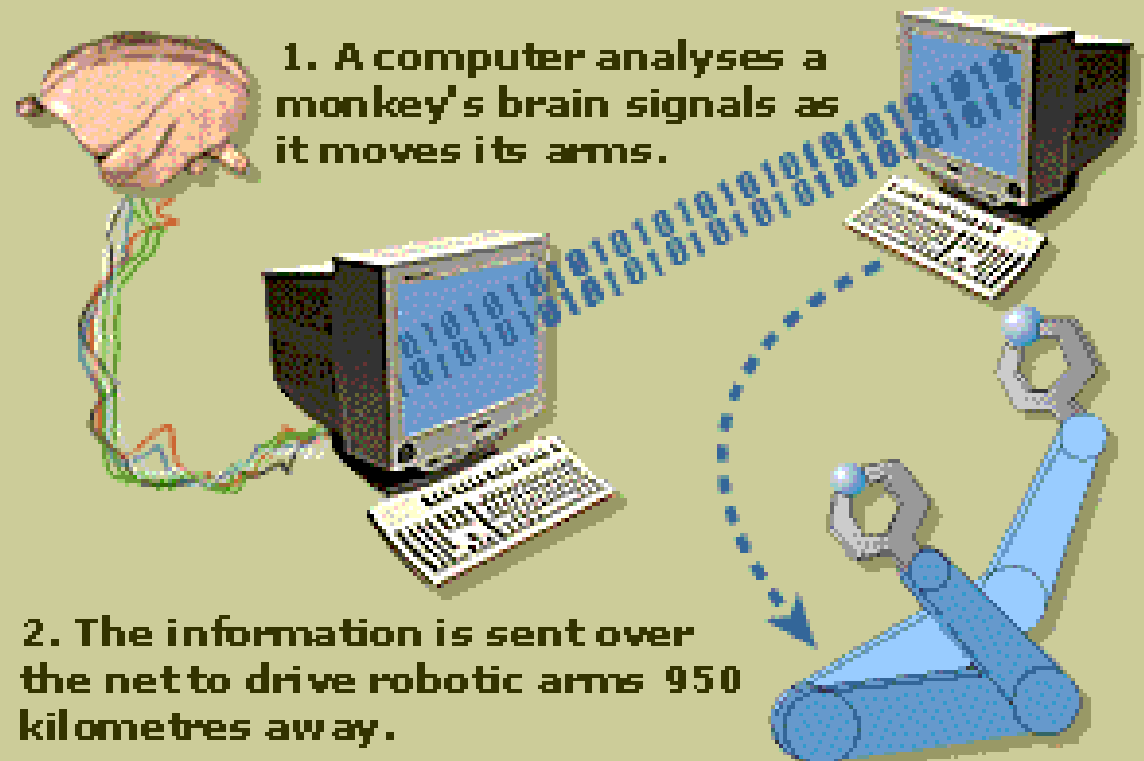
Mirror Neurons Movies

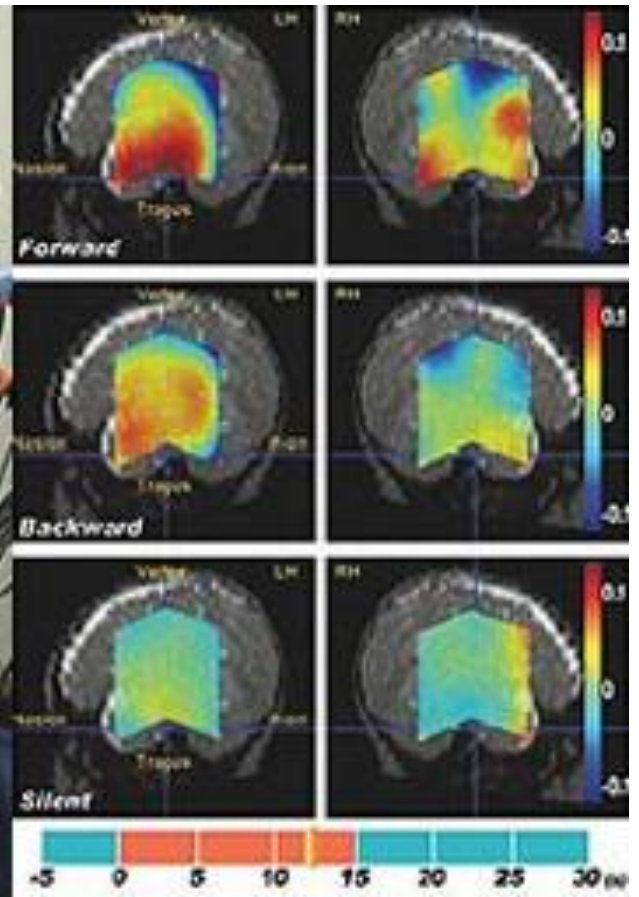
Remote control of a robotic arm by motor cortex signals



בשנים האחרונות ישנם נסיונות לפצח את קוד ההפעלה של פעילות הקורטקס המוטורי, כדי להפעיל מכשירים חיצוניים רק באמצעות גלי מח. בניסיונות אלה נירשמים גל המח של הניבדק כשהוא חושב על תנועה מסוימת, למשל הזזה של היד. האות החשמלי מעובד על ידי מחשב שמזהה תבנית מסוימת של ההפעלה ולפיה מזיז זרוע מכנית, שיכולה להיות רחוקה אפילו לפי קילומטרים מהניבדק. טכניקה זו מיושמת עם בני אדם משותקים.

Monkey robot brain





בניסויים קליניים נמצא שניתן ללמד אנשים (בעיקר משותקי גפיים כמו האדם בתמונה משמאל) להזיז את הסמן (cursor) של מחשב או להזיז יד רובוטית באמצעות יצירת תבניות הפעלה מסוימות של ה-EEG (בעיקר באזור השליטה על תנועות העיניים). בעזרת המערכת הנראית בתמונה ניתן לעקוב אחרי זרימת הדם בקורטקס המוטורי ובהתאם לתבנית ההפעלה לעשות פעולות פשוטות כמו לפתוח ולסגור מתגים.

בקרה מוחית על תנועה

מסילות יורדות

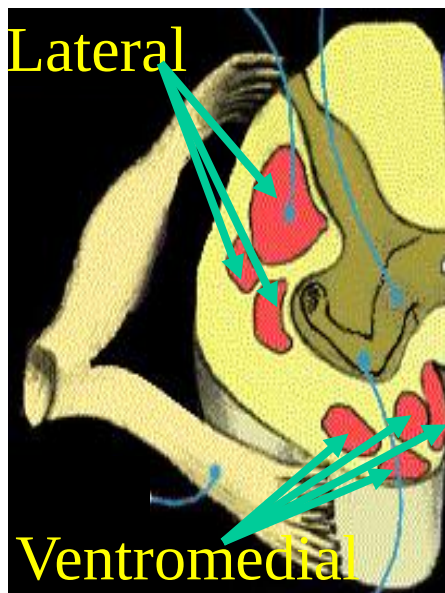
ונטרו-מדיאליות

שליטה על שרירים בחלק המרכזי של הגוף ועל יציבה

לטרליות

שליטה על תנועות רצוניות, בדידות ומיומנות, בעיקר בגפיים

המערכת המוטורית שולטת על מספר נתיבים עיצביים שיורדים לחוט השדרה בו הם מפעילים מוטוניירונים. נתיבים אלה נקראים המערכות המוטוריות היורדות (descending motor systems/pathways). ניתן לחלק את המערכות היורדות לשני סוגים – המערכות הלטרליות נקראות כך משום שהן יורדות בחלק הלטרלי של חוט השדרה, והמערכות הונטרומדיאליות יורדות בחלק הונטרלי-מדיאלי של חוט השדרה. המערכות הלטרליות שולטות על תנועות רצוניות, בדידות (כלומר בסיבי שריר בודדים) ומיומנות, בעיקר בשרירי הפנים והגפיים – ידיים ורגליים. המערכות הונטרומדיאליות מפקחות על שרירים בחלק המרכזי של הגוף (כתפיים, חזה, גב, אגן). שרירים אלה בדרך כלל מופעלים בצורה יותר גלובלית ולא בדידה ולוקחים חלק חשוב בשמירה על היציבה, כלומר על מיקום הגוף במרחב וביחס לכוחות הגרביטציה.



בקרה מוחית על תנועה

מסילות יורדות

ונטרו-מדיאליות

שליטה על שרירים בחלק
המרכזי של הגוף ועל יציבה

■ קורטיקוספינלית

ונטרו-מדיאלית

■ וסטיבולוספינלית

■ רטיקולוספינלית

■ טקטוספינליות

לטרליות

שליטה על תנועות רצוניות,
בדידות ומיומנות, בעיקר
בגפיים

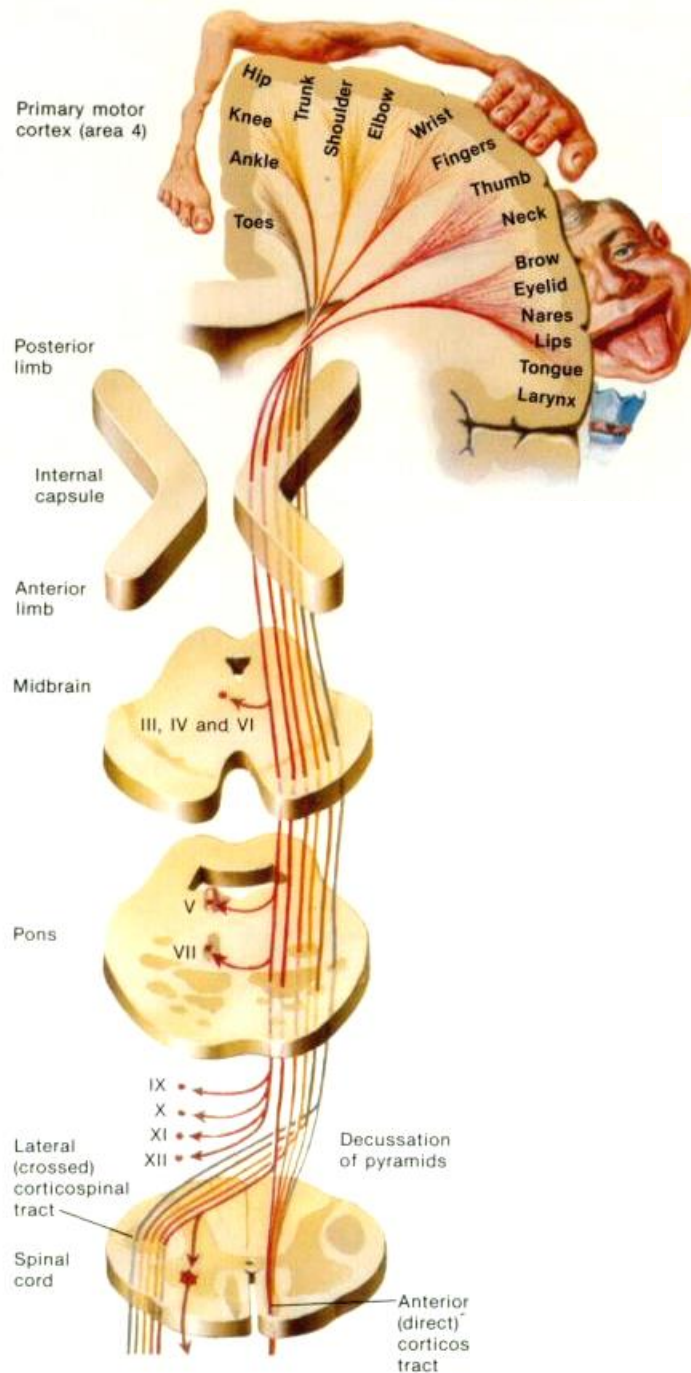
■ קורטיקוספינלית

לטרלית

■ קורטיקובולברית

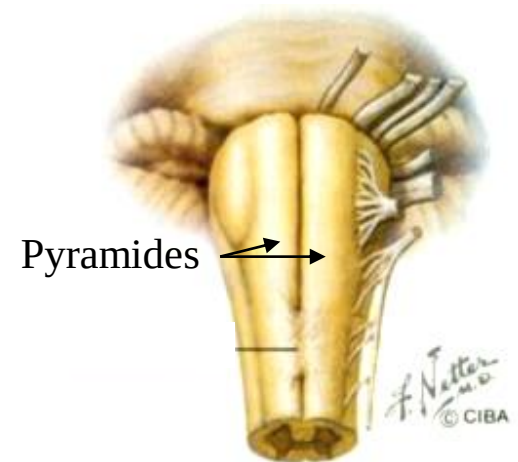
■ [רוברוספינלית]

The corticospinal (pyramidal) tract



המערכת היורדת הגדולה והחשובה ביותר היא המערכת הקורטיקוספינלית. זוהי מערכת של נוירונים שגופם באזור המוטורי הראשוני ובאזורים השניוניים של קליפת המוח המוטורית והאקסונים שלהם נשלחים ישירות למוטונוירונים בקרן הונטרלית של חוט השדרה. מערכת זו מאפשרת שליטה ישירה של הקורטקס על סיבי שריר ספציפיים. המערכת כוללת כמיליון נוירונים בכל צד של המוח. מבחינה פילוגנטית, זוהי מערכת חדשה, שקיימת רק ביונקים ועברה התפתחות ניכרת באדם (אפילו ביחס לקופים).

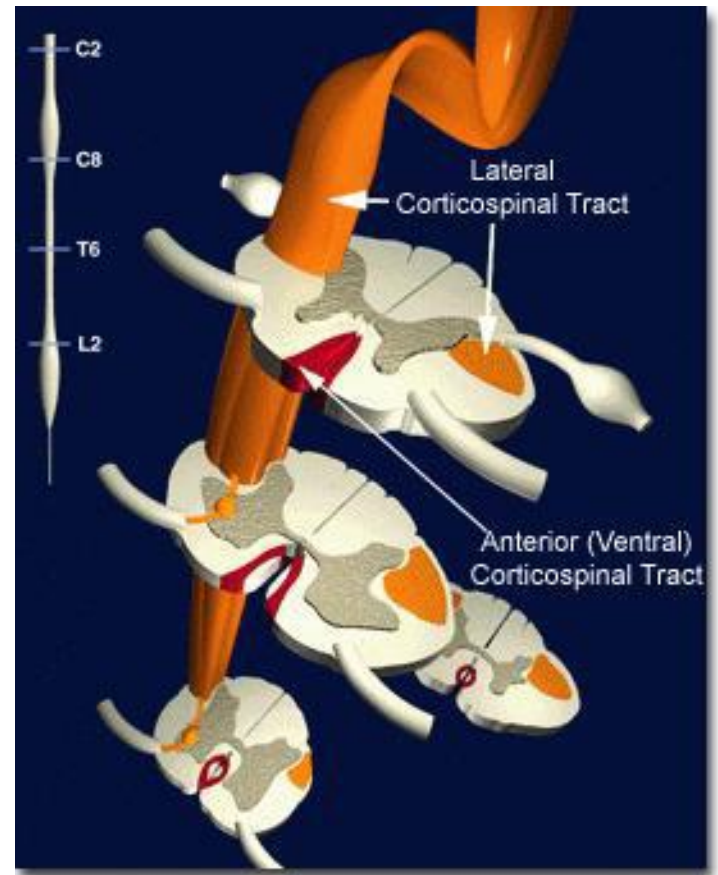
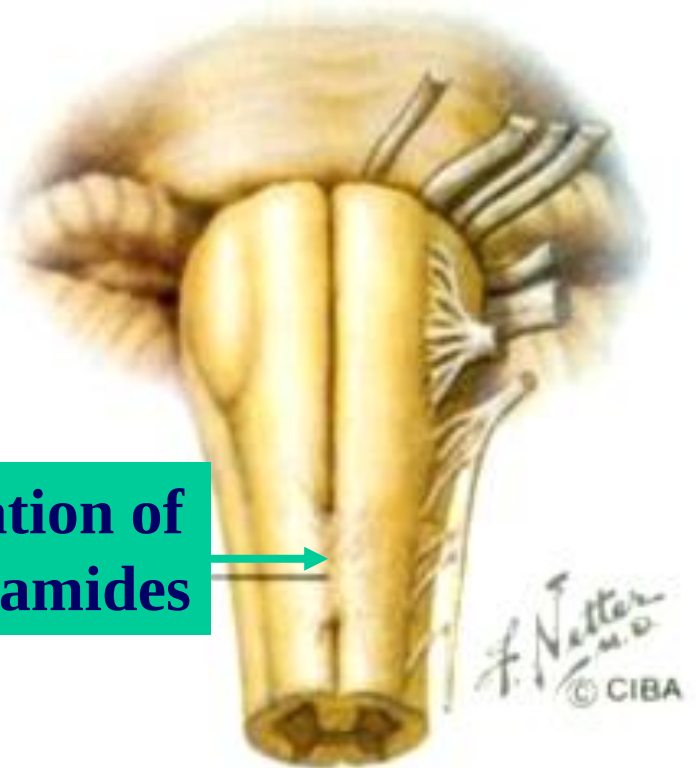
המסילה יורדת לאורך גזע המוח בצידו הקדמי ויוצרת מעין בליטות על החלק הונטרלי של המדולה – בליטות אלה נקראות הפירמידות (Pyramides). לכן, המערכת הזאת נקראת גם המערכת הפירמידלית.



המסילה הקורטיקוספינלית הלטרלית

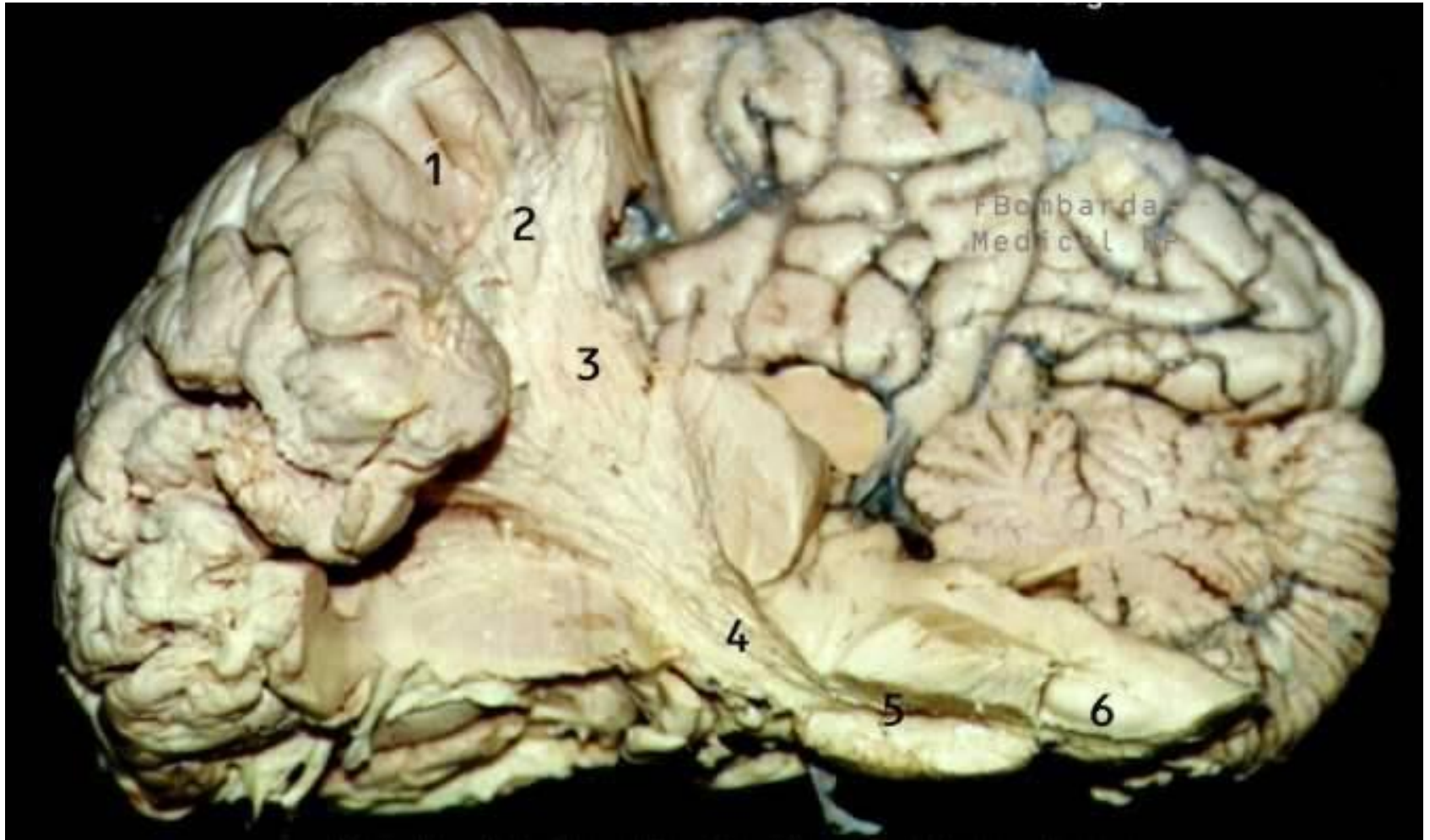
Lateral corticospinal tract

בחלקה הקאודלי של המדולה חוצים רב האקסונים (כמעט 90%) של המסילה הקורטיקוספינלית אל הצד הנגדי (אזור הדקוזציה של הפירמידות). לאחר החציה האקסונים יורדים בחלק הלטרלי של חוט השדרה (צבע כתום) ומהווים את המסילה הקורטיקוספינלית הלטרלית. מסילה זו שולטת על תנועות רצוניות, בדידות ומיומנות של הידיים (בעיקר האצבעות) והרגליים.

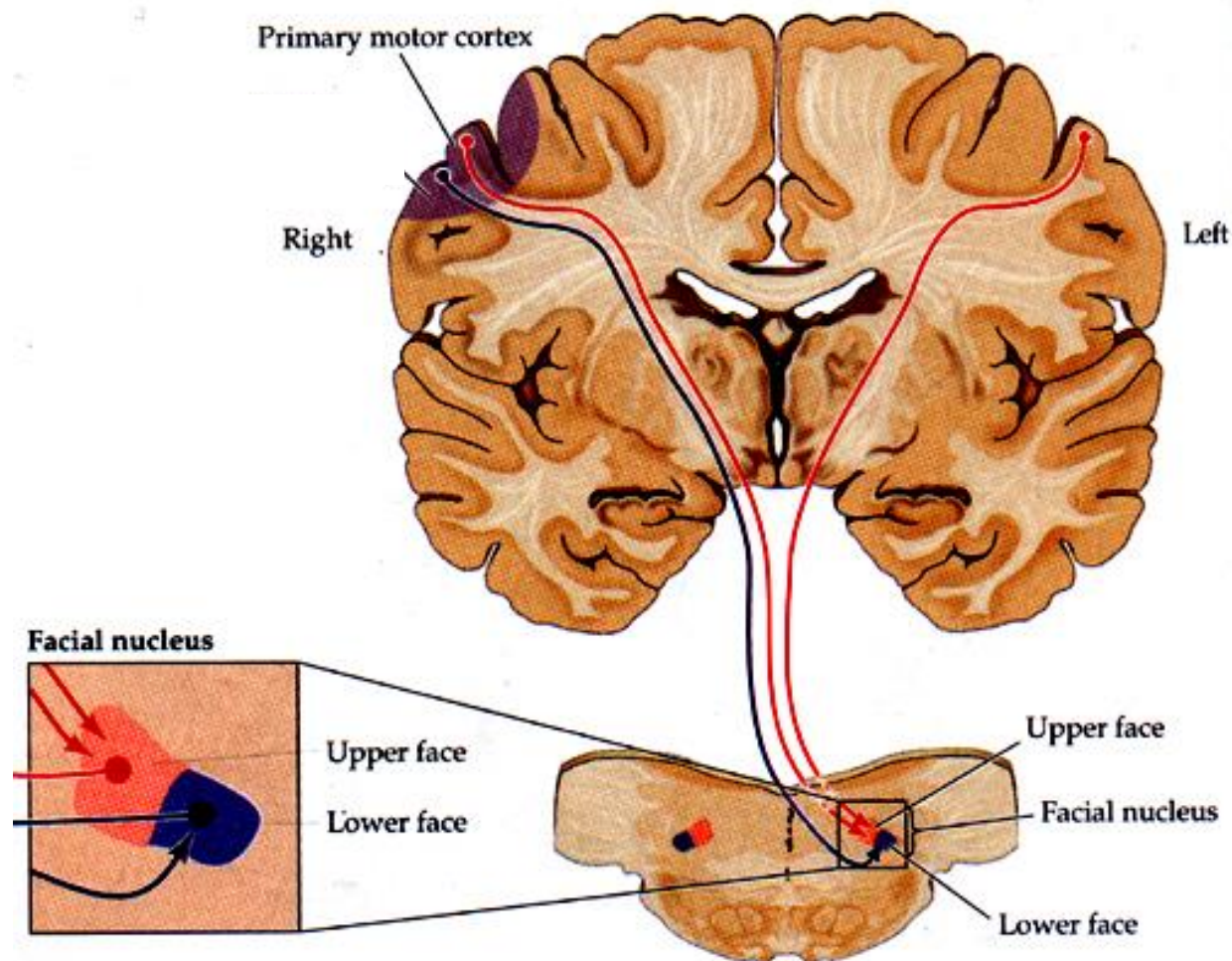


**Decussation of
The pyramids**

The corticospinal (pyramidal) tract

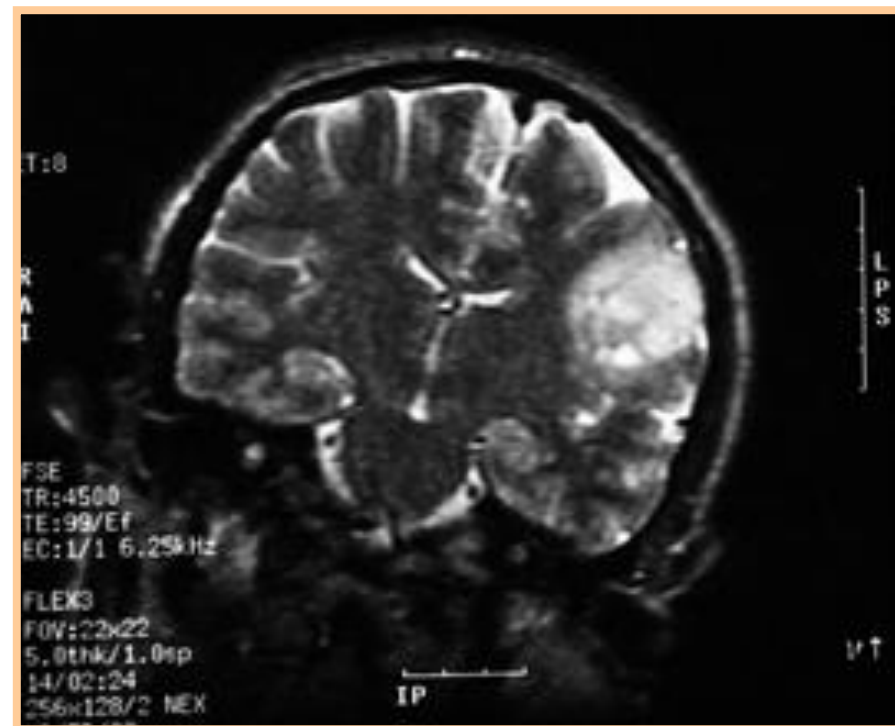
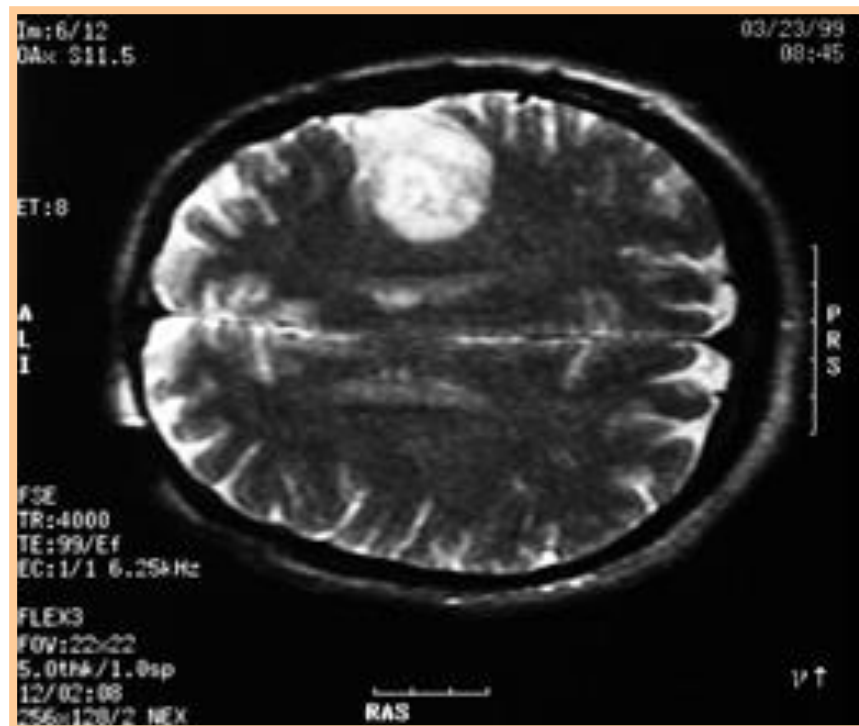


Corticobulbar tract



במקביל למערכת הקורטיקוספינלית הלטראלית ישנה מערכת cortico-bulbar שבה תאים מהקורטקס נשלחים לגרעינים של עצבים קרניים מוטוריים שמעצבבים את שרירי הפנים והראש (כולל השרירים שחשובים לדיבור והבעת רגשות – כלומר לתקשורת ורבלית ולא ורבלית). בתמונה מוצג העצבוב של ה- facial nerve (העצב הקרנילי השביעי, שמעצבב חלק משרירי הפנים וההבעה).

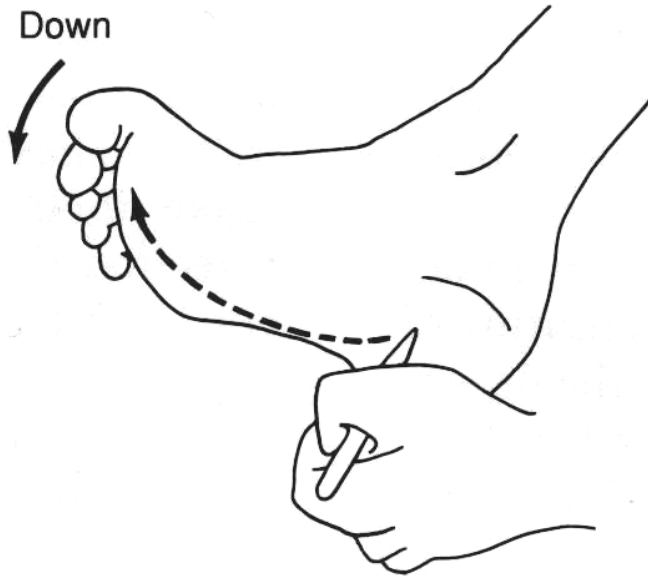
Stroke within the motor cortex



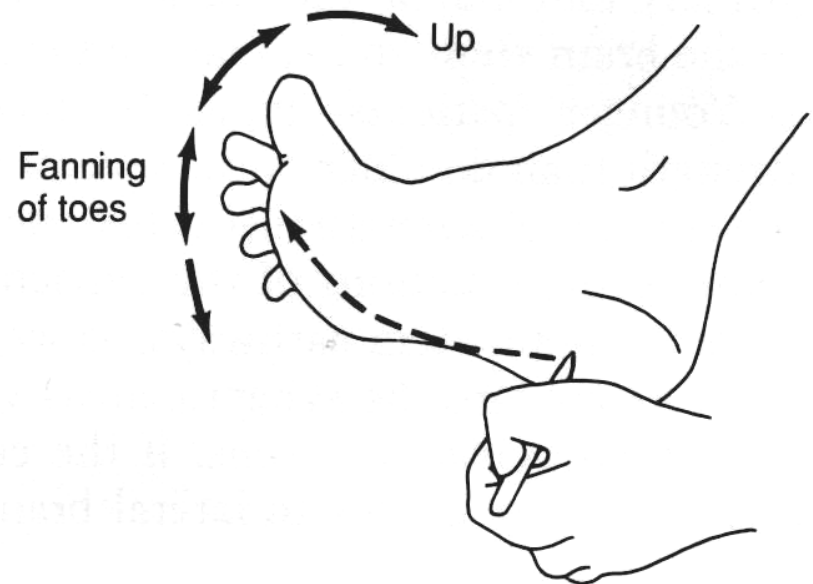
המערכות הקורטיקליות המוטוריות הן המערכות העיקריות לשליטה רצונית, מדויקת ומיומנת על השרירים – בעיקר ידיים, רגליים ופנים. נזק למערכת הקורטיקוספינלית הלטראלית בכל רמה שלה – בקורטקס, בגזע המוח או בחוט השדרה, יביא לחוסר יכולת לבצע פעולות מדויקות ועדינות, בעיקר חוסר יכולת להפעיל את האצבעות באופן דיפרנציאלי. אם ההרס הוא מוחלט יתפתח שתוק מוחלט של הגפיים.

The Babinski sign

Normal plantar response



Extensor plantar response
(Babinski sign)



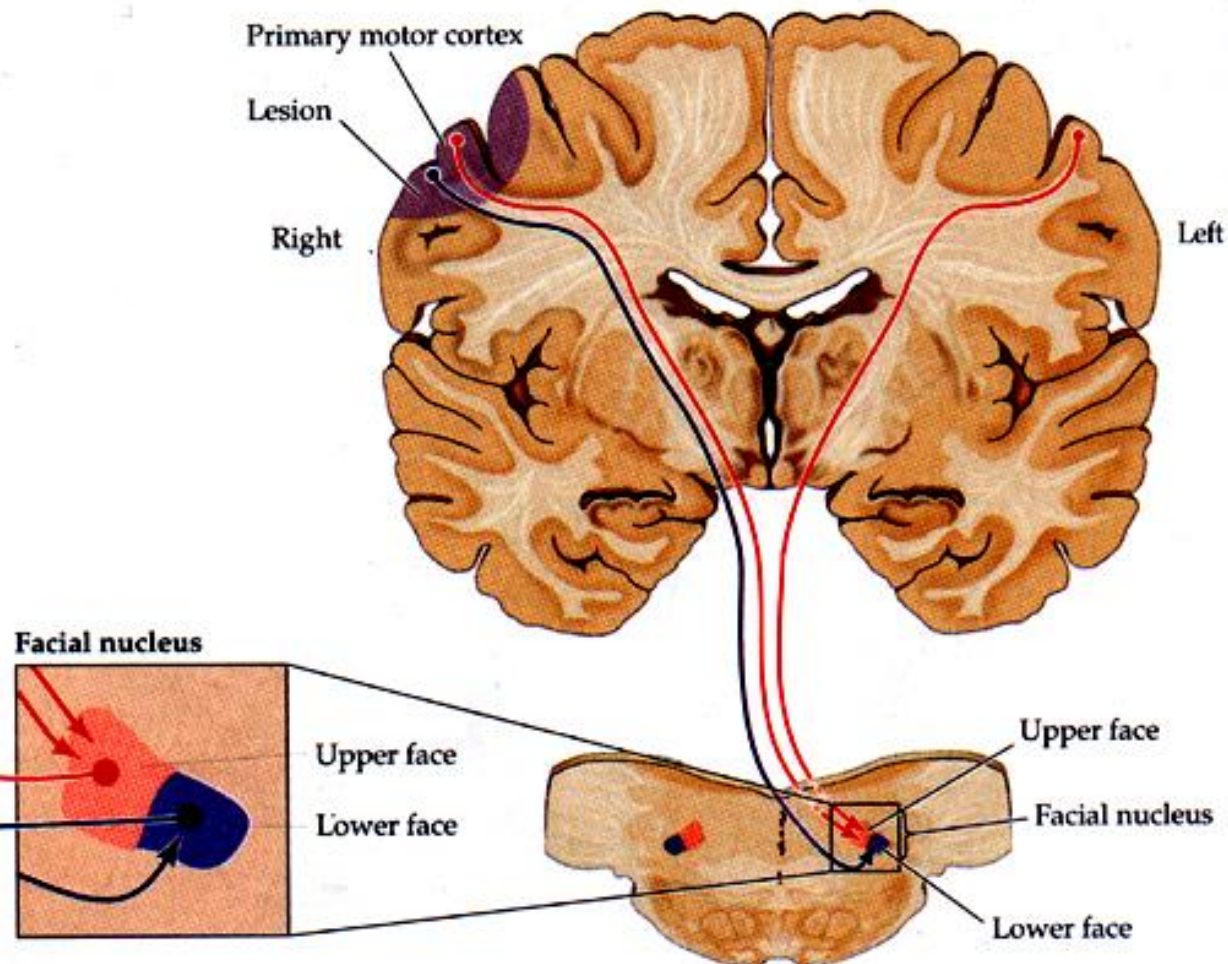
כמו כן, בעקבות נזק כזה מתפתחת היפר-רפלקסיביות, כלומר תגובות רפלקסיביות חזקות מהרגיל. עובדה זו מראה שהקורטקס באופן נורמלי עושה אינהיביציה לרפלקסים השדרתיים. כמו כן יש חזרה לרפלקסים ינקותיים, למשל רפלקס בבינסקי.

Lesion in the corticobulbar tract

Before lesion



After lesion



נזק למערכת הקורטיקובולברית יפחית את היכולת להפעיל את שרירי הפנים (פני מסכה) וישפיע על יכולת הדיבור. למשל בשקף מוצגת ההשפעה של נזק לאזור הקורטיקלי ששולט על השרירים בחלק התחתון של הפנים.

בקרת הקורטקס על תנועה

מסילות יורדות

ונטרו-מדיאליות

שליטה על שרירים בחלק
המרכזי של הגוף ועל יציבה

■ קורטיקוספינלית

ונטרו-מדיאלית

■ וסטיבולוספינלית

■ רטיקולוספינלית

■ טקטוספינליות

לטרליות

שליטה על תנועות רצוניות,
בדידות ומיומנות, בעיקר
בגפיים

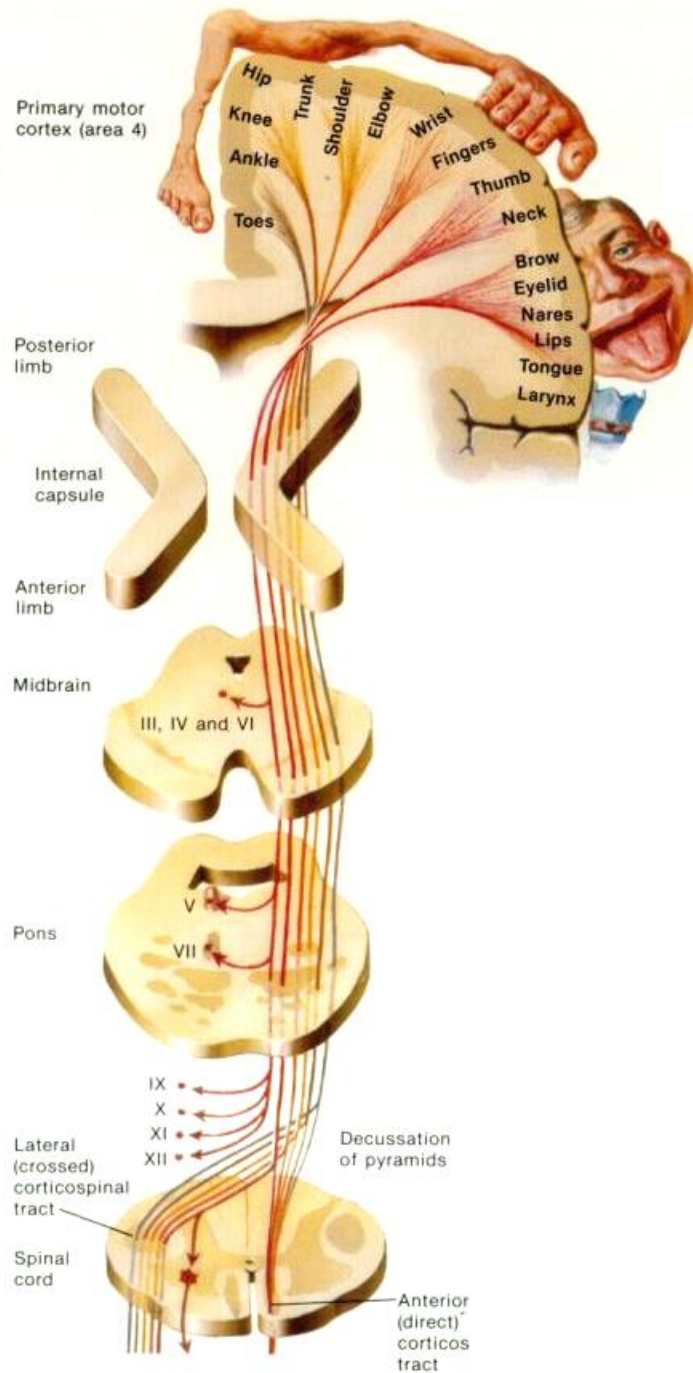
■ קורטיקוספינלית

לטרלית

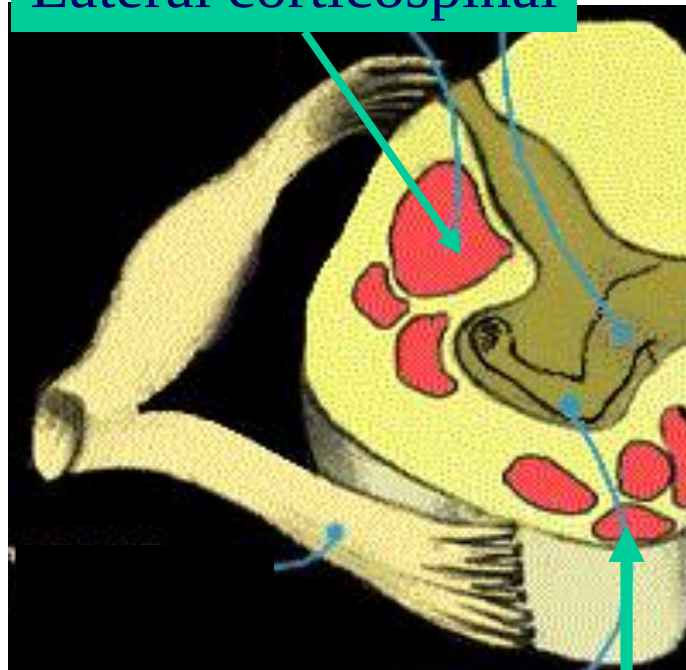
■ קורטיקובולברית

■ [רוברוספינלית]

שתי המערכות הקורטיקוספינליות



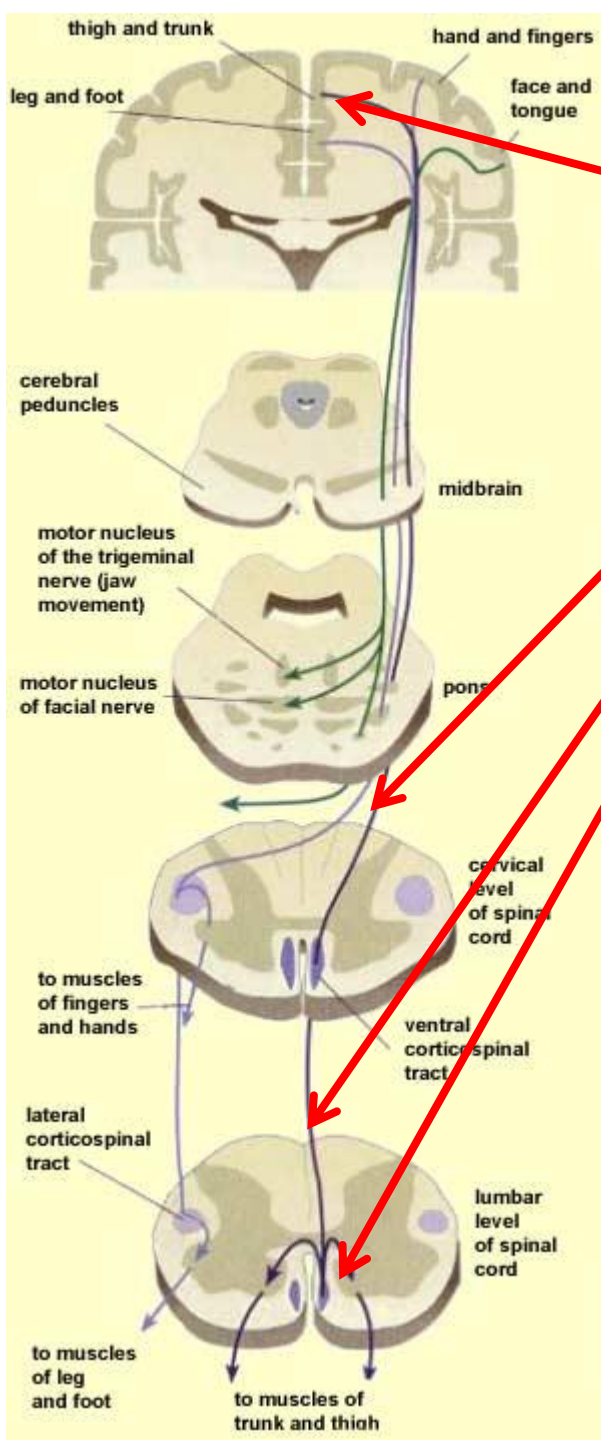
Lateral corticospinal



Ventromedial corticospinal

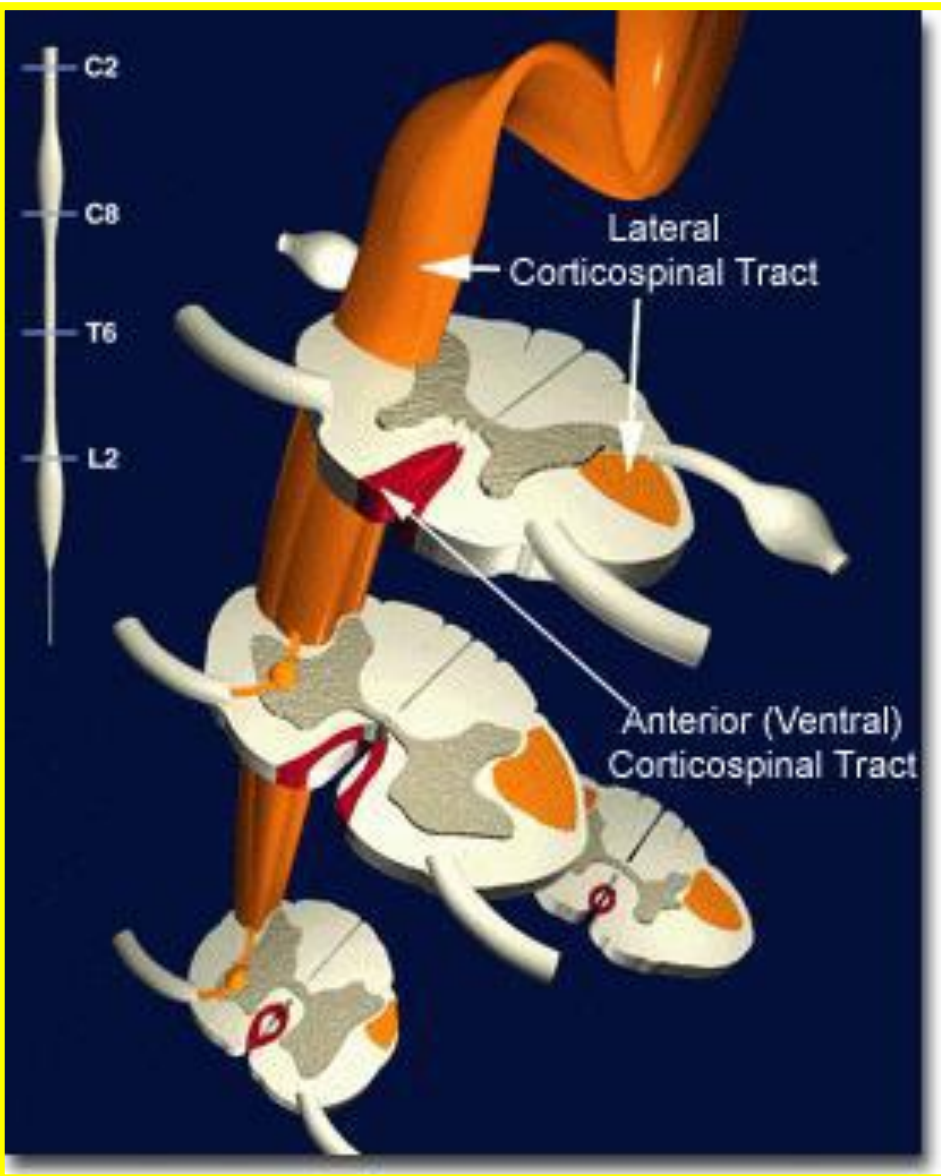
המסילה הקורטיקוספינלית הונטרו-מדיאלית Ventromedial corticospinal tract

האקסונים של המסילה הקורטיקוספינלית
הונטרו-מדיאלית (כ-10% מהמערכת
הקורטיקוספינלית) לא עוברים דקווציה,
נשארים באותו צד, ויורדים בחלקו
הונטרו-מדיאלי של חוט השדרה. מערכת
זו מעורבת בשליטה רצונית על שרירים
בחלק המרכזי של הגוף (כתפיים, חזה, גב,
אגן). אקסונים אלה עושים סינפסה באופן
ישיר על מוטוניורונים בחלקים מרכזיים
של חוט השדרה.



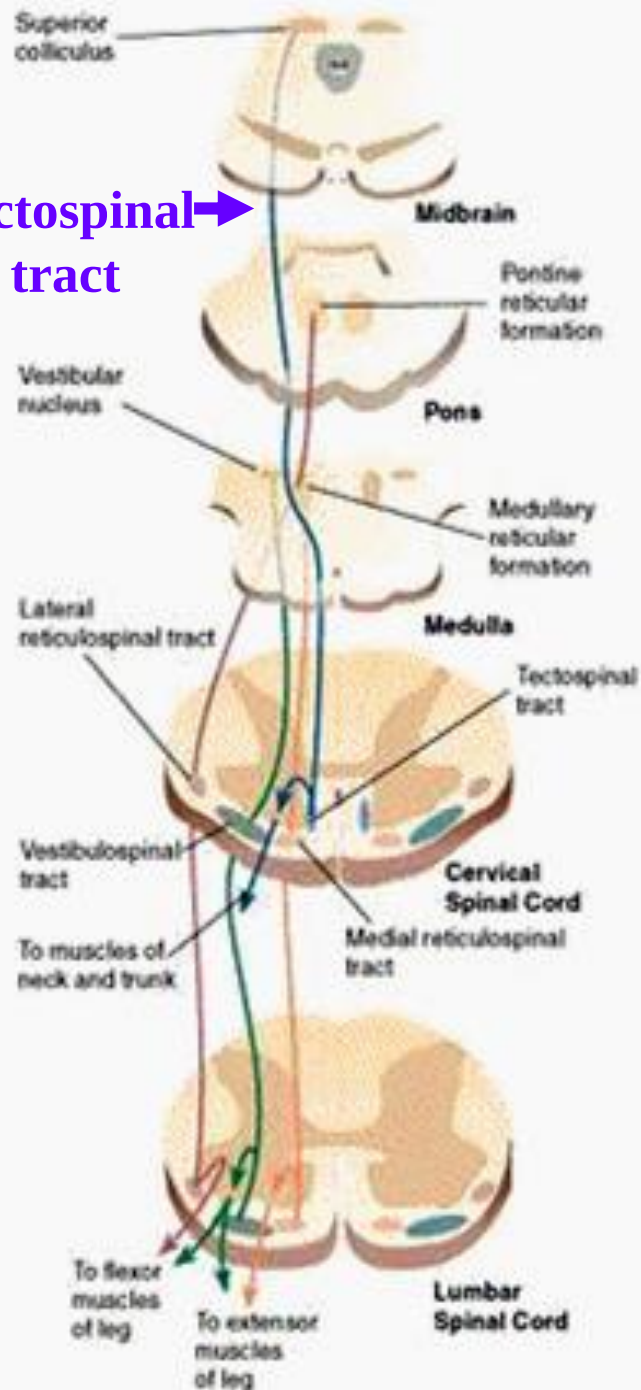
המסילה הקורטיקוספינלית הונטרו-מדיאלית

Ventromedial corticospinal tract



האקסונים של המסילה הקורטיקוספינלית הונטרו-מדיאלית (כ-10% מהמערכת הקורטיקוספינלית) לא עוברים דקוזציה, נשארים באותו צד (צבע אדום), ויורדים בחלקו הונטרו-מדיאלי של חוט השדרה. מערכת זו מעורבת בשליטה רצונית על שרירים בחלק המרכזי של הגוף (כתפיים, חזה, גב, אגן). אקסונים אלה עושים סינפסה באופן ישיר על מוטוניירונים בחלקים מרכזיים של חוט השדרה.

Tectospinal tract →

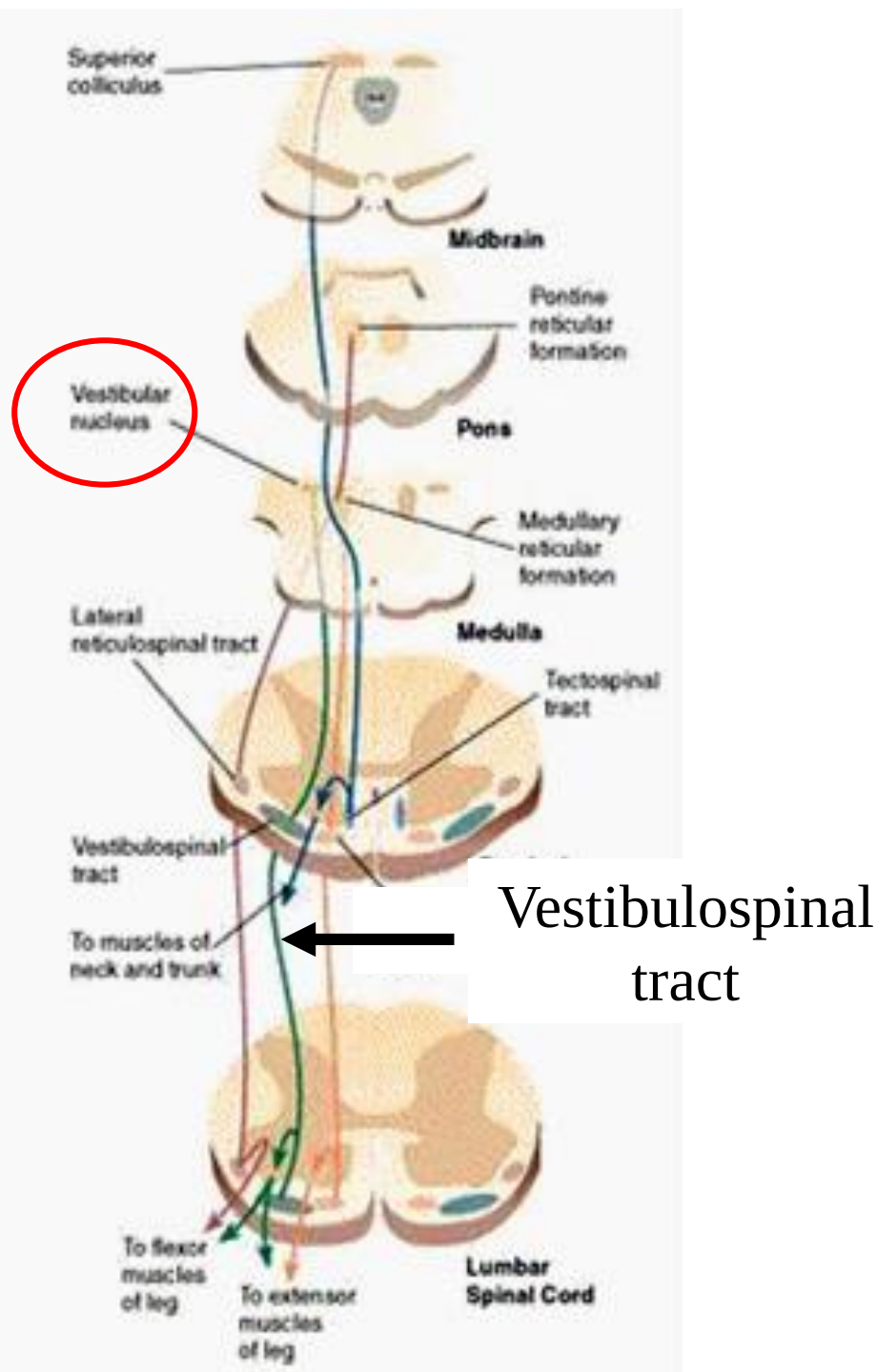


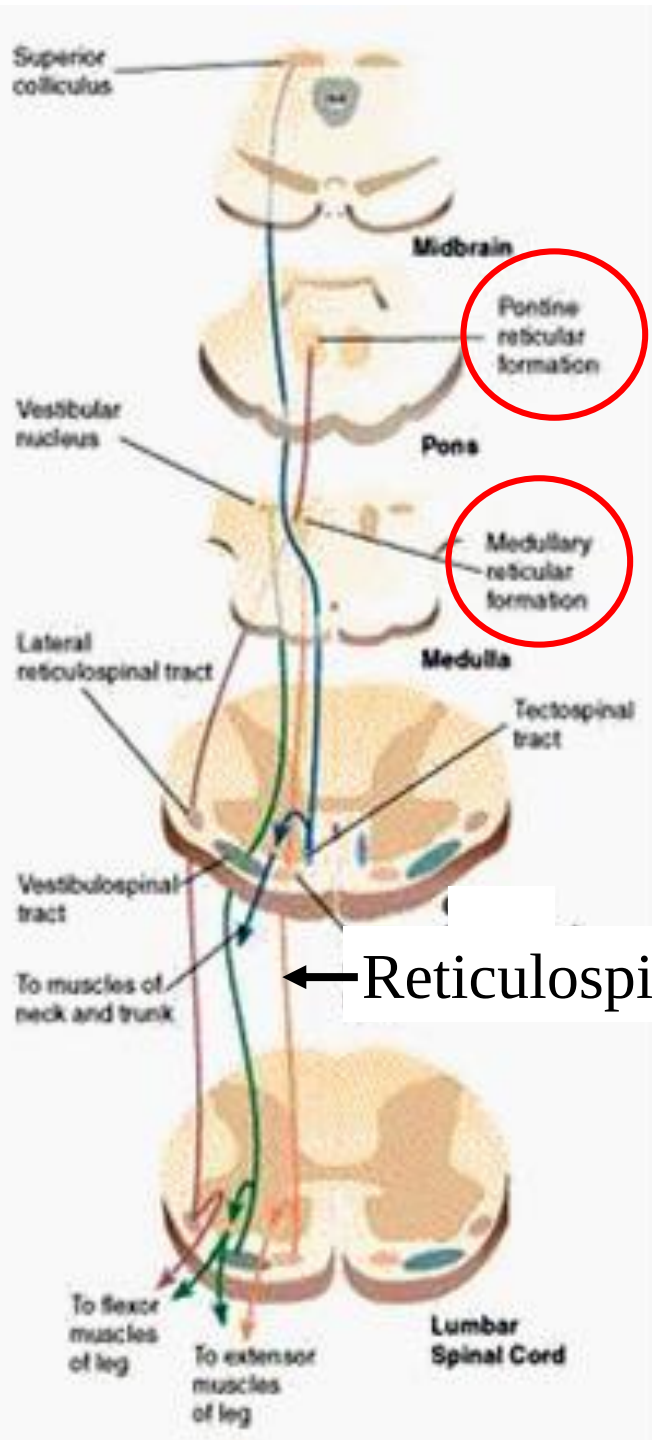
מספר מערכות ונטרו-מדיאליות נוספות יוצאות מגזע המוח. גם מערכות אלה מקבלות קלט מהקורטקס המוטורי אך פעילותן אינה תלויה רק בפיקוח קורטיקלי ויש להן מקורות קלט יחודיים. מערכות אלה יורדות בחלק הונטרומדיאלי של חוט השדרה. והן כוללות 3 מערכות:

המערכת הטקטוספינלית (tectospinal tract) – מערכת של תאים שממוקמים בטקטום של ה-midbrain, בעיקר ב-superior colliculus, והאקסונים שלהם נשלחים הן לגרעינים בגזע המוח ששולטים על תנועות עיניים והן לאזורים הגבוהים של חוט השדרה. מערכת זו אחראית לאוריינטציה רפלקסיבית של העיניים ופלג הגוף העליון כלפי גרויים משמעותיים בסביבה.

המערכת הוֹסְטִיבּוּלוֹסְפִינָלִית (Vestibulospinal tract) –

זוהי מערכת שגופי התאים שלה נמצאים במקבץ של גרעינים בגזע המוח ושנקראים הגרעינים הוֹסְטִיבּוּלָרִים. גרעינים אלה מקבלים אינפורמציה מאיברי שווי המשקל באוזן הפנימית ושולחים את האקסונים לשרירי הגוף שמאפשרים שמירה על יציבה (למשל מאפשרים להתכופף ולהזיז אברים בלי לאבד את שווי המשקל וליפול). גם מערכת זו חשובה בפקוח על תנועות העיניים כיון שהיא מתאמת בין תנועות הראש והכתפיים לתנועות העיניים כדי להבטיח שהאובייקט שעליו מסתכלים ישאר על פני אותו אזור ברשתית וכך העולם לא מרצד לנו כל הזמן.





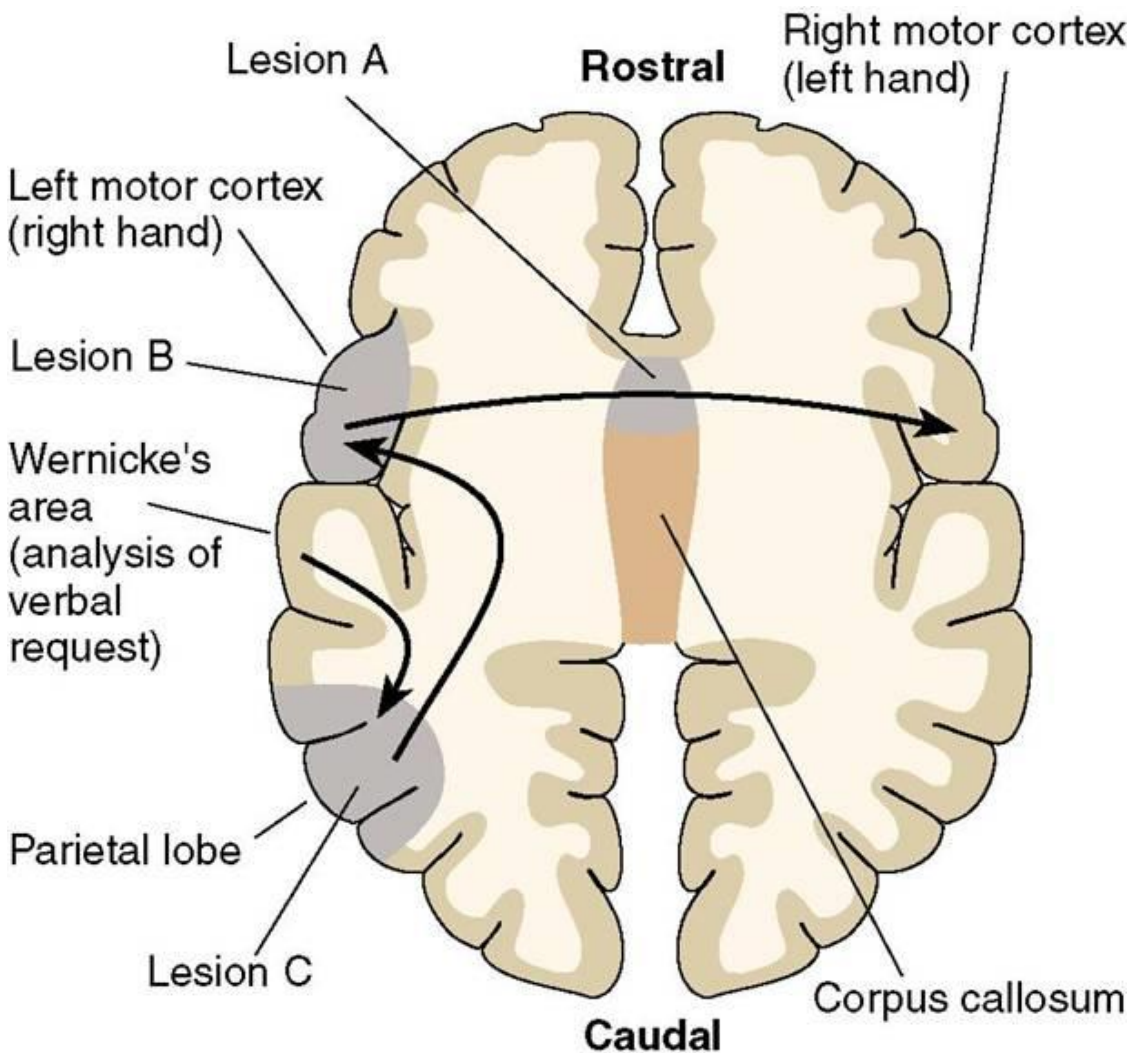
• המערכת הרטיקולוספינלית – (Reticulospinal tract)

- זוהי מערכת שנשלחת מהתצורה הרישתית (reticular formation) לחוט השדרה. היא עוסקת בפקוח על תנועות אוטומטיות כמו נשימה, שעול, וכד'. כמו כן היא מפקחת על תנועות ריתמיות חוזרות ונשנות כמו הליכה ולעיסה. מערכת זו חשובה גם עבור שמירת המתח הבסיסי של השרירים, למשל בזמן שנת חלום המערכת עוברת אינהיביציה ואז מתח השרירים יורד והם רפויים לגמרי.

הפרעות מוטוריות בהתנהגות מיומנת כתוצאה מפגיעות בקורטקס לא מוטורי (אפרקסיות)

1. אפרקסיה (apraxia) היא הפרעה בפעילות מוטורית שאיננה מערבת נזק בקורטקס המוטורי עצמו, אלא באזורים שקשורים ביצירת הפקודה המוטורית, כמו הקורפוס קלוסום, הקורטקס הפרונטלי והקורטקס הפרייטלי האחורי (posterior parietal lobe) שעוסק בתפיסת המרחב האישי והבין-אישי.
2. אפרקסיה משתקפת בחוסר יכולת לבצע פקודות וורבליות, בסוגים שונים של פעולות בלתי נכונות למצב או למתבקש, או חוסר יכולת לבצע פעילויות עם כלים שונים.
3. אחד הסוגים הנפוצים של אפרקסיה נקראת Limb apraxia. הפרעה זו מודגמת כאשר מבקשים מנבדק לבצע פעולה מסוימת של היד, למשל להראות כאילו הוא פותח מנעול במפתח שנמצא בידו. זוהי פעולה מורכבת שדורשת מהנבדק להבין את המתבקש, לדמיין את האובייקט ולהרכיב סדרת תנועות שדומה לסידרה האמיתית.

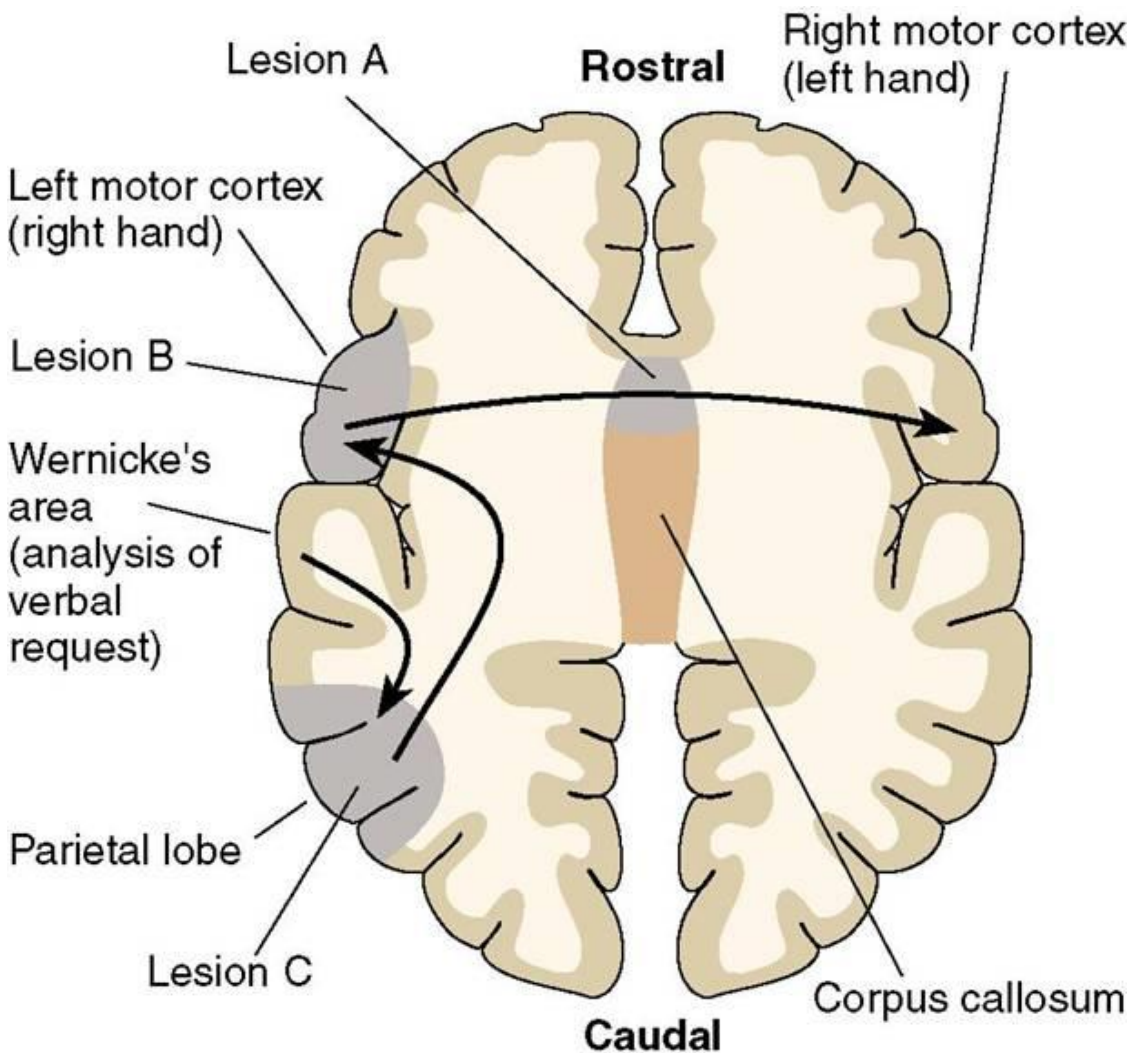
Lesion A = Corpus callosum
Lesion B = Left motor cortex
Lesion C = Left parietal lobe



יתכנו מספר סיבות ל Limb
:apraxia

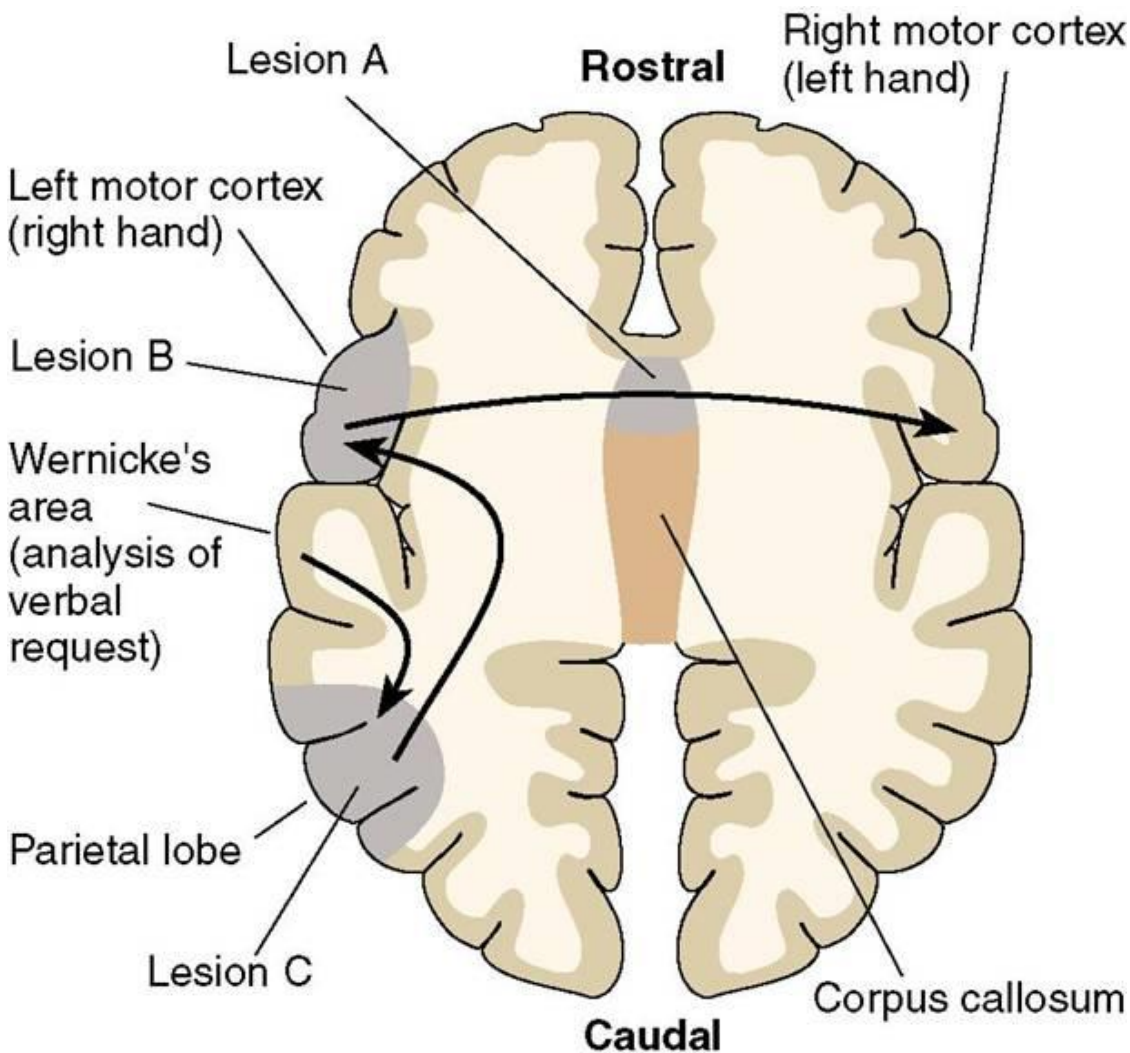
אפרקסיה ביד שמאל יכולה לנבוע
מנזק לחלק הקידמי של הקורפוס
קלוסום. במקרה זה האינפורמציה
הורבלית, שמעובדת בצד שמאל של
המח מפעילה נוירונים ב-
premotor השמאלי. משם
האינפורמציה צריכה לעבור ל-
premotor הימני כדי להפעיל
נוירונים בקורטקס הראשוני הימני.
הנזק מונע מעבר זה, ולכן ניתן
לבצע פקודות ביד ימין אך לא ביד
שמאל.

Lesion A = Corpus callosum
Lesion B = Left motor cortex
Lesion C = Left parietal lobe



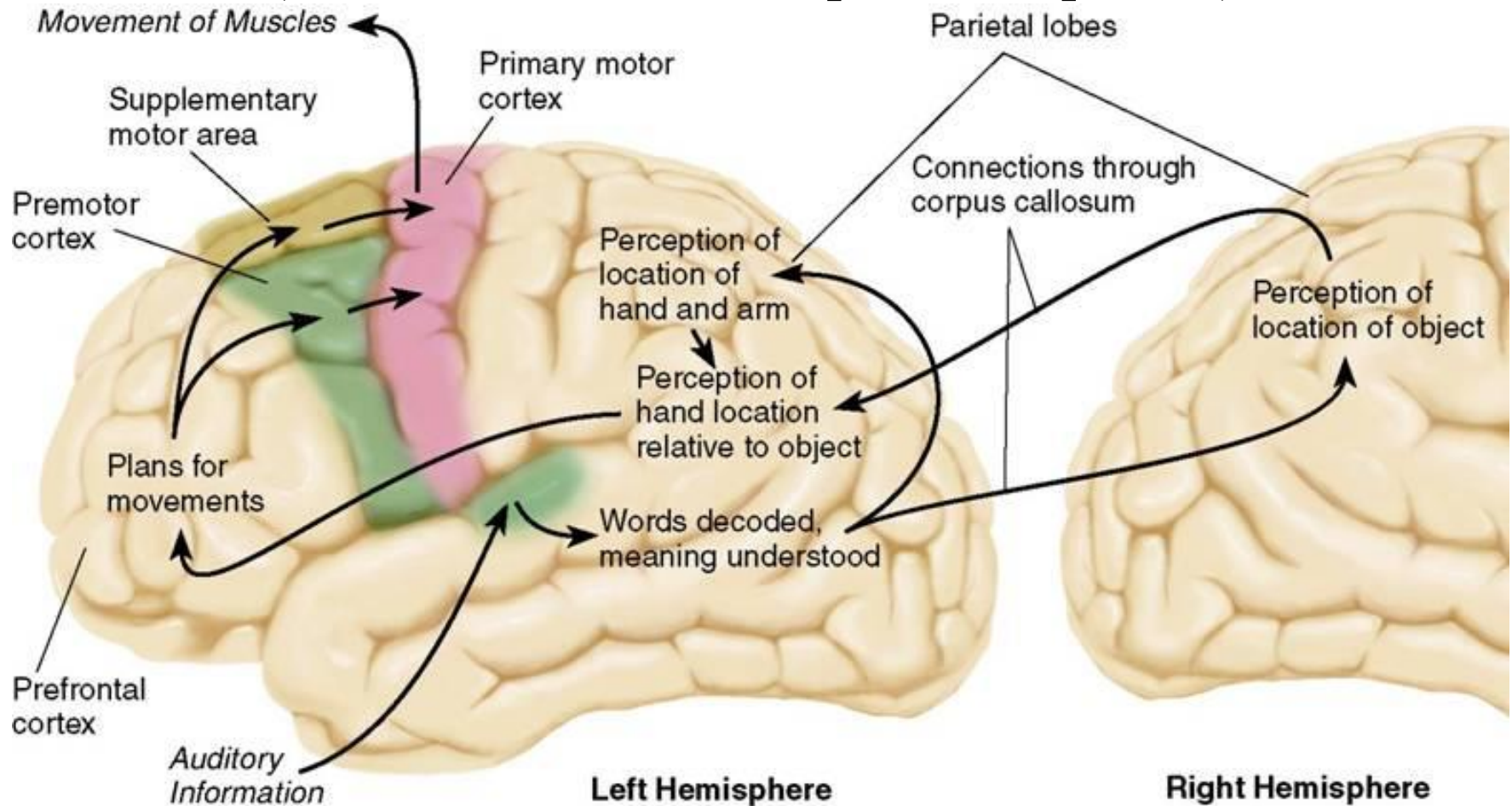
כאשר יש נזק לקורטקס המוטורי
השמאלי – במקרה זה יש פגיעה
מוטורית ממשית בצד ימין של
הקורטקס, יחד עם אפרקסיה ביד
שמאל שכן הצד השמאלי לא
משתתף בהעברה של הפקודות
הורבליות מנוירונים בצד שמאל
לנוירונים הומולוגיים בצד ימין.

Lesion A = Corpus callosum
Lesion B = Left motor cortex
Lesion C = Left parietal lobe

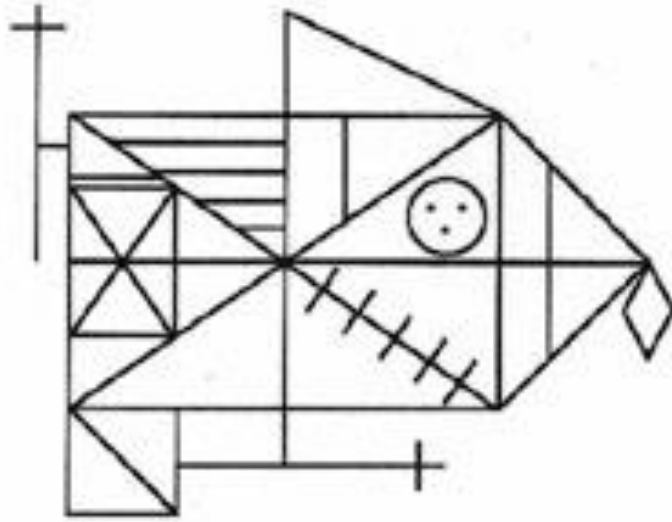


נזק באונה הפרייטלית
השמאלית. נגרמת אפרקסיה
בשתי הידיים כיון שמידע
מרחבי שקשור לפקודה או
לחיקוי התנועה לא מגיע
לקורטקס הפרהמוטורי.

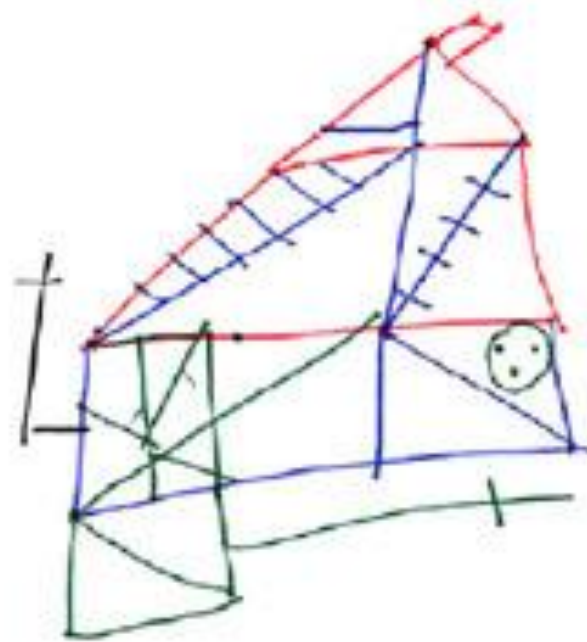
The “command apparatus” of the left parietal lobe (lesion will cause left parietal apraxia)



מדוע דווקא האזור הפרייטלי השמאלי וללא הימני? הסיבה היא שהאונה הפרייטלית הימנית מעבדת מידע הקשור לאוביקטים חיצוניים במרחב בעוד שהשמאלית מעבדת מידע שקשור למיקום של אברי הגוף עצמו. אי לכך, כאשר ניתנת פקודה ורבלית להגיע לעצם כלשהוא הפקודה מעובדת באזור האסוציאטיבי בגבול האונה הפרייטלית-טמפורלית. זה גורם לאונה הפרייטלית השמאלית להשיג מידע מהאונה הימנית לגבי מיקום האוביקט, לעשות אינטגרציה של מידע זה עם המידע לגבי מיקום היד והזרוע ולהעביר האינטגרציה לחלקים המוטוריים הפרונטליים.



Rey-Osterreith Figure

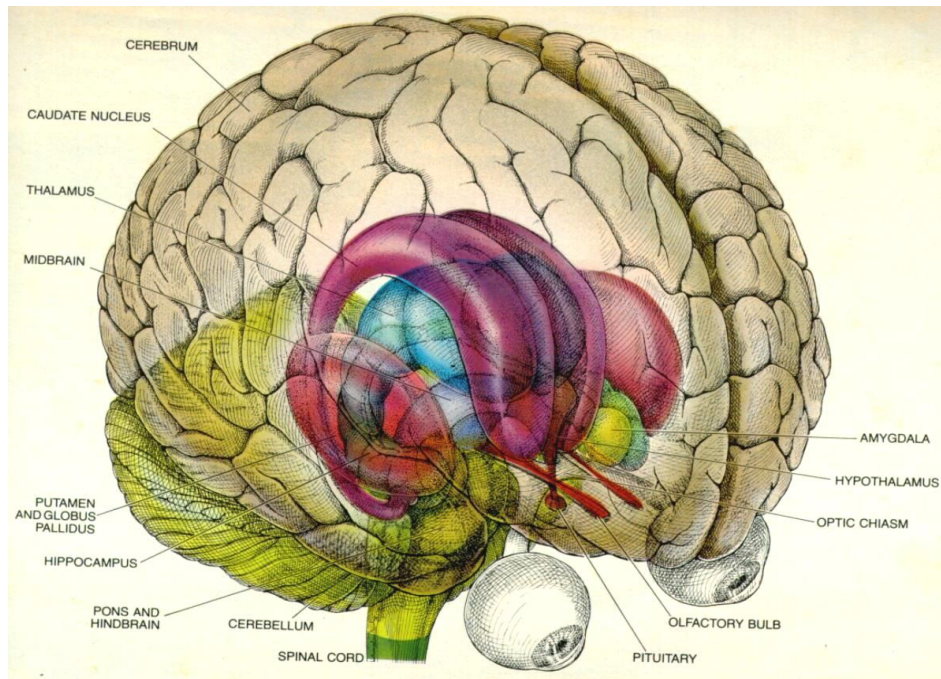


Copy made by a right hemisphere stroke patient

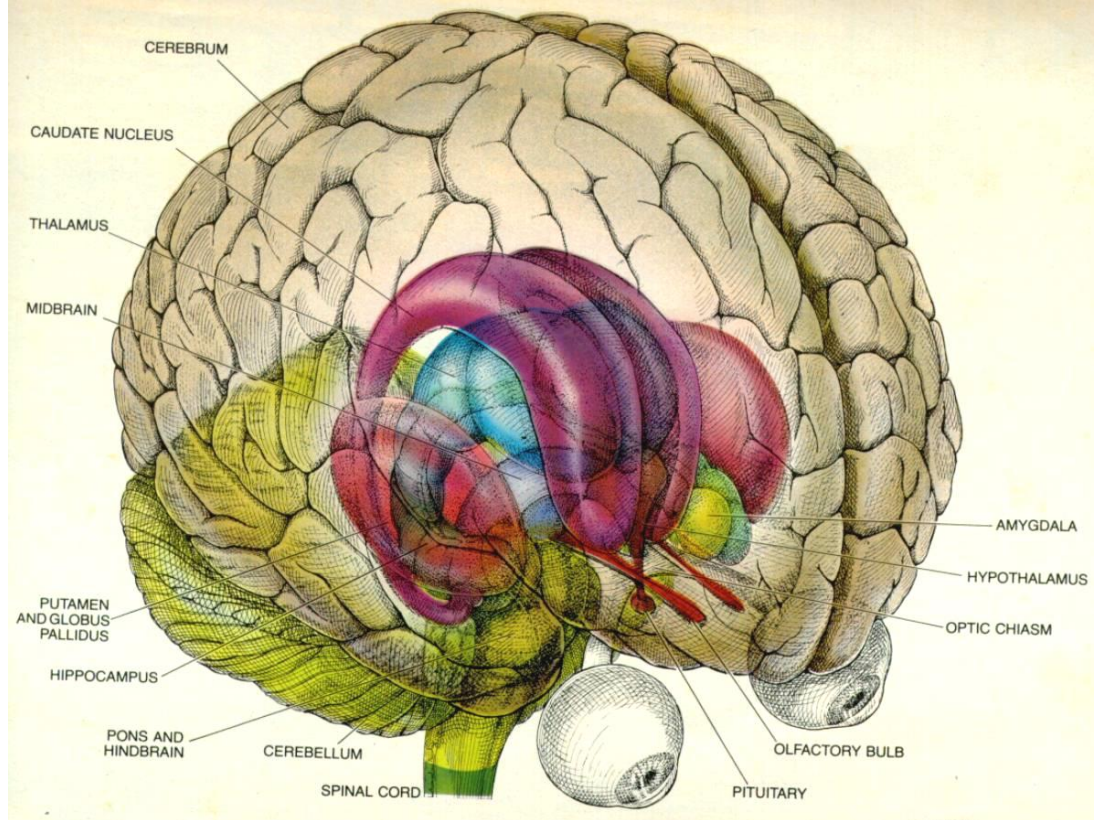
Constructional apraxia נגרמת בגלל נזק לאונה הפרייטלית הימנית. אנשים עם נזק כזה מתקשים בתנועות מיומנות בזרועות ובידיים. הם משתמשים ללא קושי בכלים ויכולים לחקות תנועות אך מתקשים בציור ובהרכבת אובייקטים מתוך המרכיבים הבסיסיים שלהם, למשל מלבני משחק. הבעיה היא בהבנת יחסים גאומטריים – למשל אי אפשר לצייר קוביה לא כי יש בעיה מוטורית לידיים אלא כי אין תפיסה ויכולת דמיון של המבנה של הקוביה.

The Basal Ganglia

הגרעינים הבזליים אינם שולטים ישירות על המערכות היורדות ועל מוטונירונים בחוט השדרה, אלא הם מווסתים את הפעילות של נוירונים בקורטקס המוטורי, בעיקר ה SMA והאזור הפרהמוטורי. הגרעינים הבזליים חשובים לתפקודים הבאים:



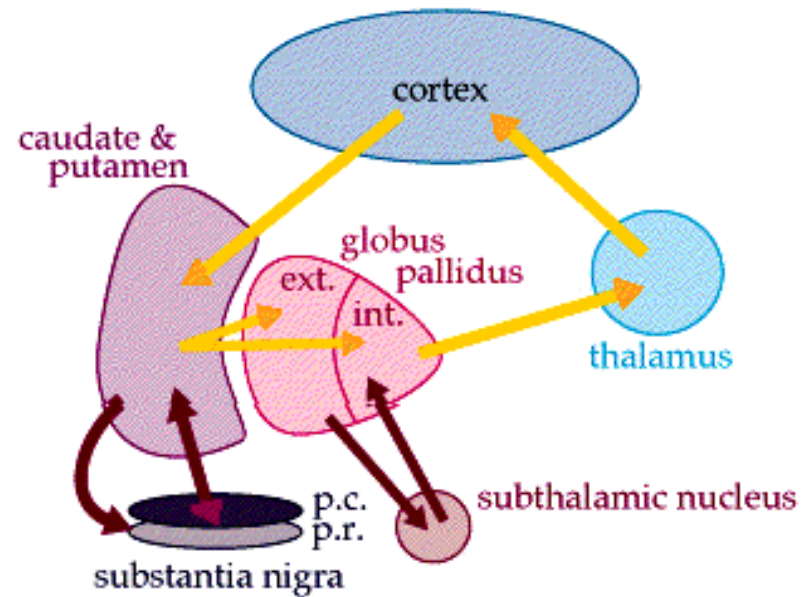
- (1) ברירת התנועה היעילה והאפקטיבית ביותר מתוך הרפרטואר של תנועות אפשריות לסיטואציה סנסורית מסוימת
- (2) איפשור של תנועות רצוניות
- (3) עדכון של הקורטקס לגבי מידת ההצלחה של תנועות מוטוריות עכשוויות (ביחס לכוונה ההתנהגותית) בהתאם לקלט הסנסורי למידה אינסטרומנטלית ולמידת הרגלים (habits). הגרעינים הבזליים מעורבים בקישור של תבניות סנסוריות עם תגובות מסוימות דרך החיזוק ההתנהגותי שגורם לשחרור דופמין. המרכיב הדופמינרגי בגרעינים הבזליים (ובמח בכלל) הוא זה שמצמיד ערך (value) לכל גרוי או פעולה.



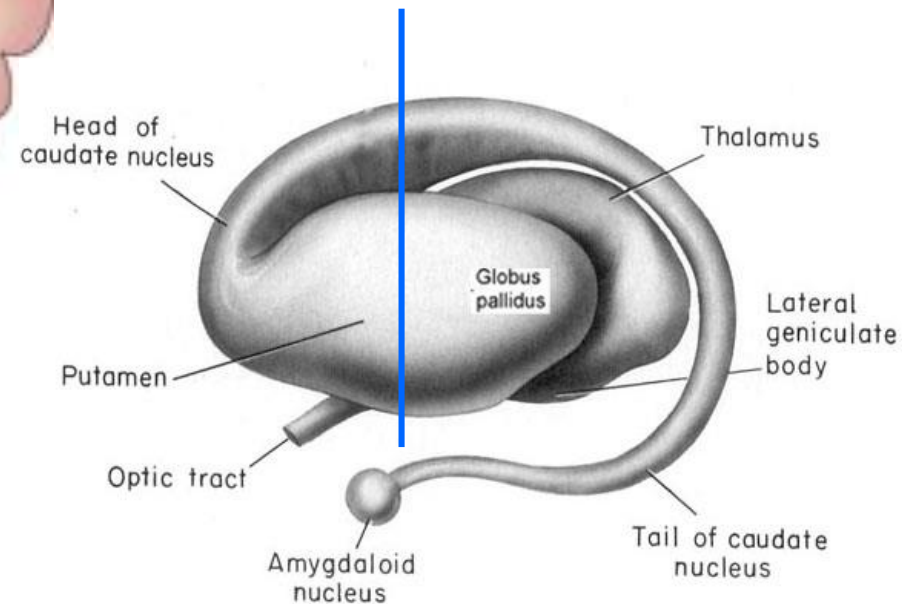
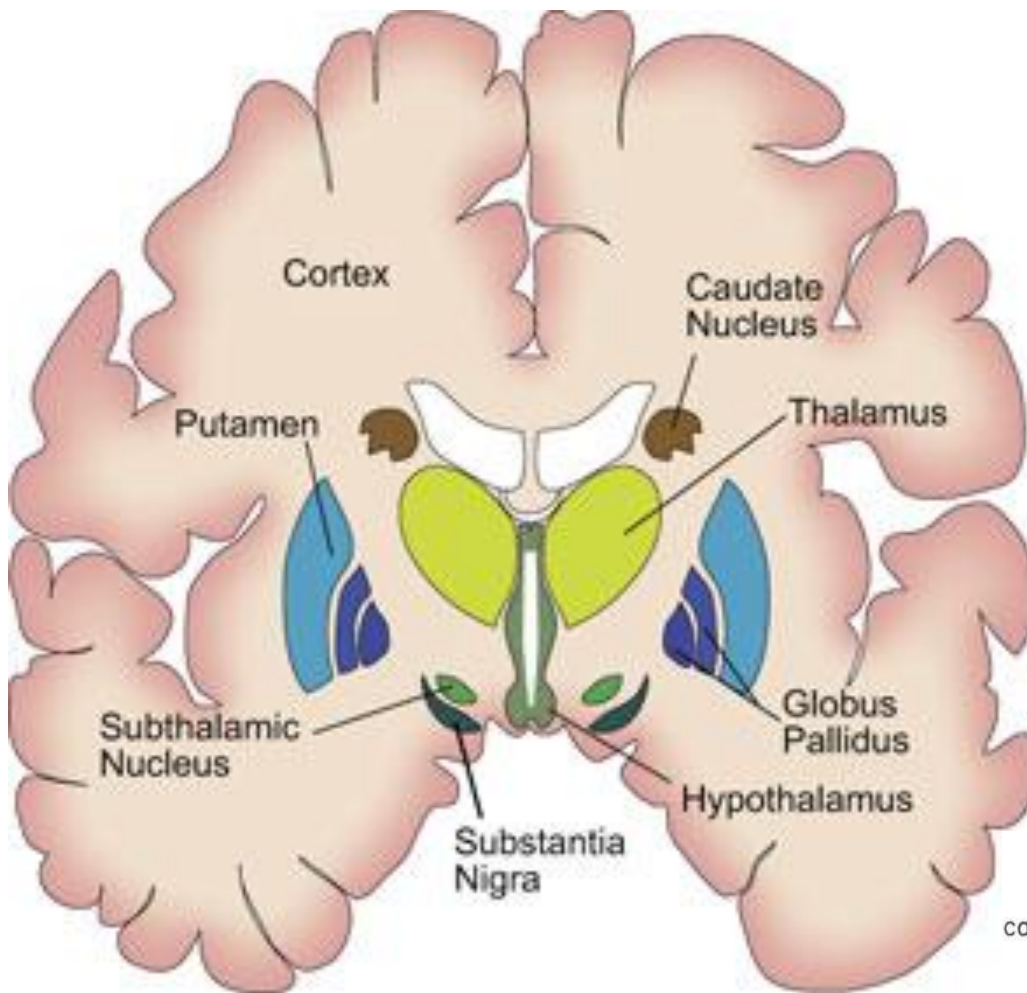
The Basal Ganglia

הגרעינים הבזליים מורכבים משלושה חלקים עיקריים: הקאודט, הפוטמן, והגלובוס פלידוס. הקאודט והפוטמן נקראים ביחד הסטריאטום (Striatum) והם אזורי הקלט של הגרעינים הבזליים. הגלובוס פלידוס הוא אזור הפלט.

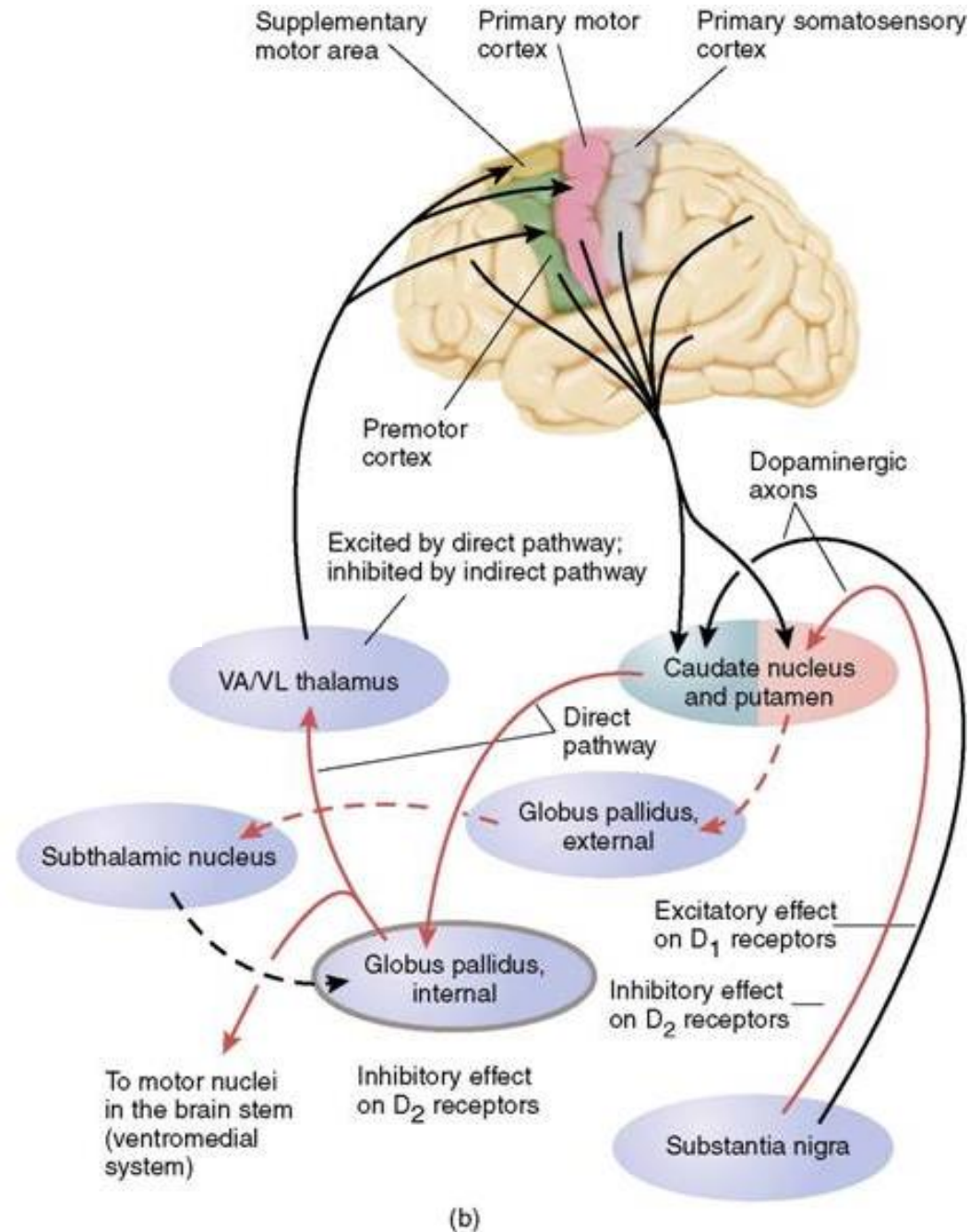
Caudate nucleus } Striatum
Putamen }
Globus pallidus



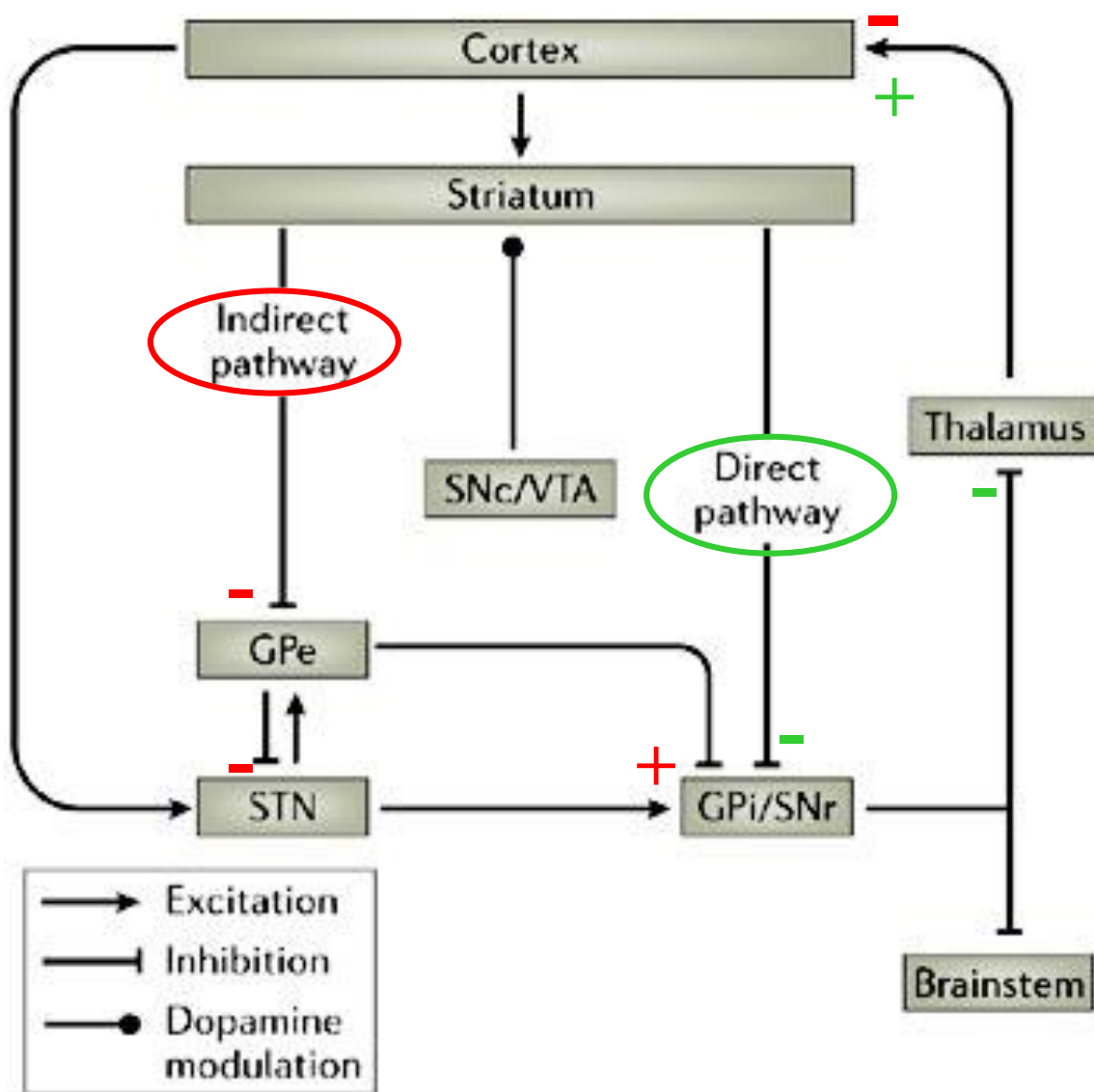
גרעיני הבסיס Basal Ganglia



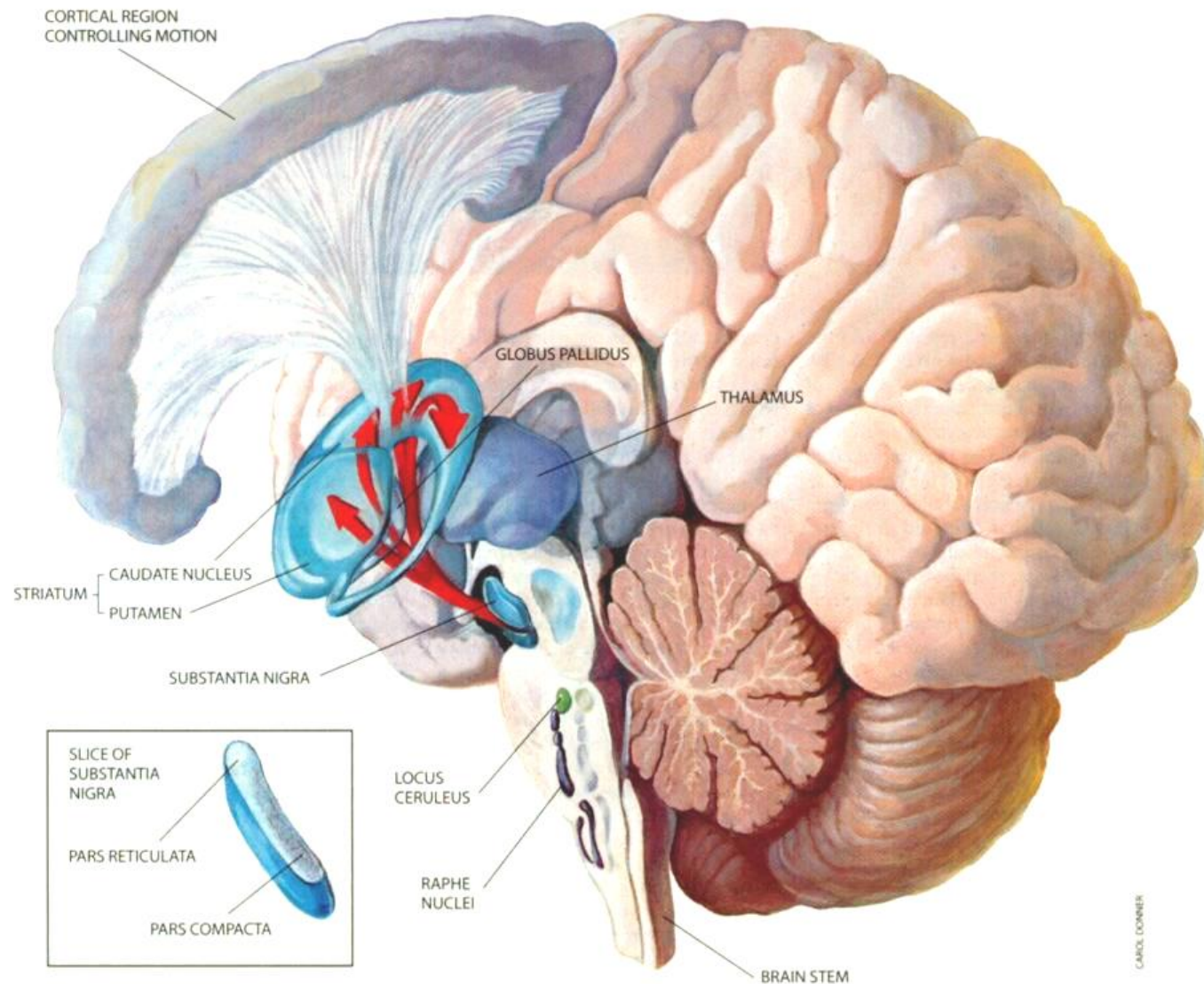
הקלט לגרעינים הבזליים מגיע מאזורים שונים בקורטקס, הן אזורים סנסוריים, בעיקר הקורטקס הסומטוסנסורי, הפרייטלי והטמפורלי, וכל האזורים של הקורטקס המוטורי והפרה פרונטלי. כלומר הגרעינים הבזליים מקבלים גם אינפורמציה לגבי התנועה המתוכננת והמתבקשת (מהקורטקס המוטורי) וגם אינפורמציה סנסורית שיכולה להיות בסיס לתנועות שקשורות בהרגלים (תנועות שמופעלות על סמך גרויים סנסוריים באופן כמעט אוטומטי ובלתי מודע). כמו כן מגיע קלט דופמינרגי מה-substantia nigra שהוא הכרחי עבור ההוצאה לפועל של תנועות וחיזוק של התנועות המתאימות. הפלט של הגרעינים הבזליים הוא בחזרה אל הקורטקס המוטורי – הראשוני, ה-SMA והפרהמוטורי, אם כי לא באופן ישיר אלא דרך התלמוס הונטרלי.



Information flow in the basal ganglia

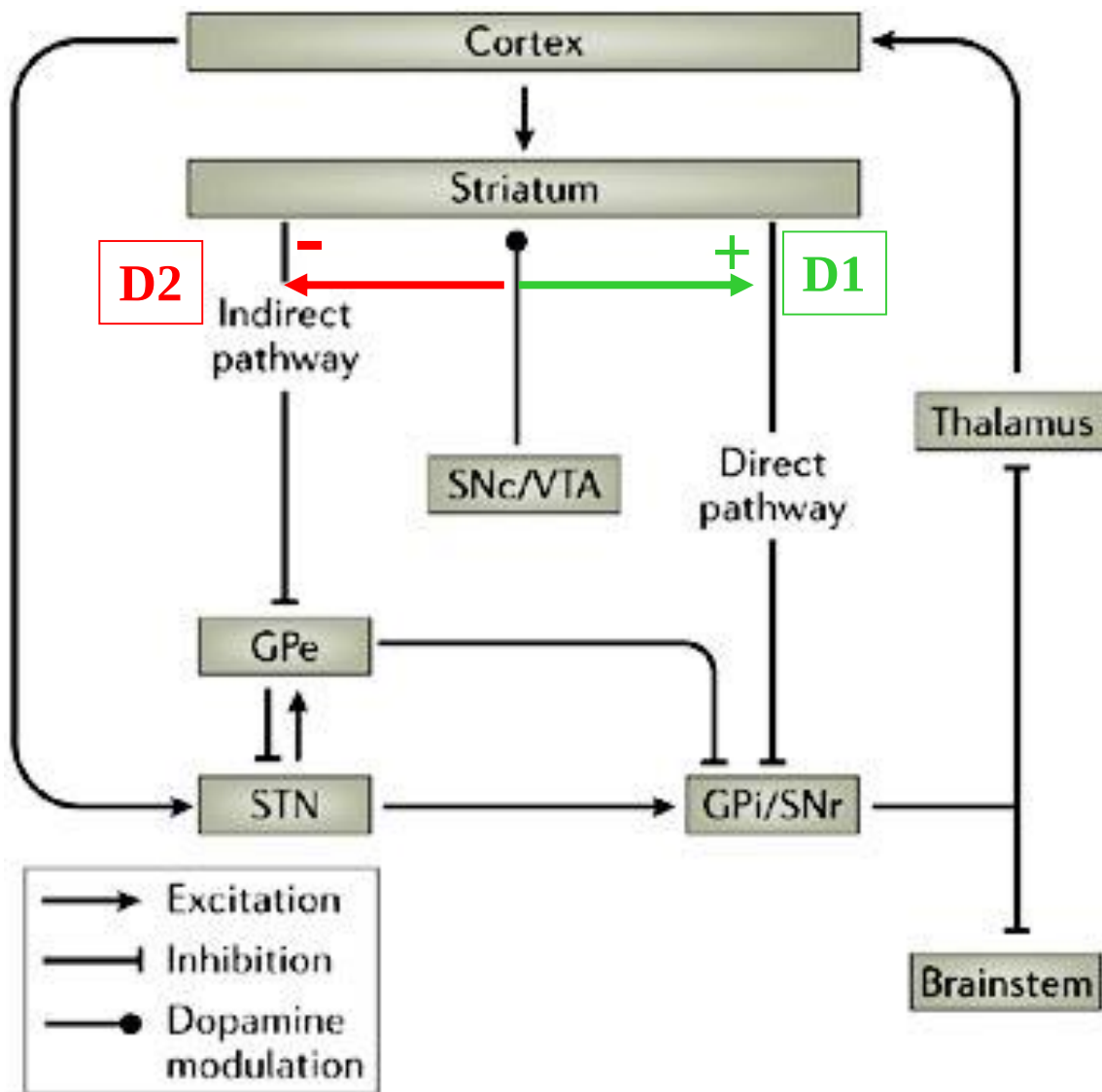


בתוך הגרעינים הבזליים הקלט עובר בשני נתיבים – הנתיב הישיר כולל סינפסה אינהיבטורית גאבארגית (של נוירוני GABA) מהסטריאטום ל-GPi ומשם סינפסה אינהיבטורית נוספת לתלמוס. כיון שקשרים אלה מהווים אינהיביציה של אינהיביציה המעגל כולו הוא אקסיטטורי ומעורר לגבי התלמוס והקורטקס. המעגל השני, הבלתי ישיר, כולל סינפסה אינהיבטורית מהסטריאטום ל-GPe וממנו סינפסה אינהיבטורית ל-subthalamic nucleus. משם יש סינפסה אקסיטטורית ל-GPi שעושה אינהיביציה לתלמוס. כלומר האפקט נטו של נתיב זה הוא אינהיביציה של התלמוס והקורטקס. המאזן בין המסלול הישיר והבלתי ישיר הוא שמאפשר לגרעינים הבזליים לחשב ולעזור בסלקציה של התגובה הנכונה.



הקלט מה-substantia nigra מסתמך על הפרשת דופמין בסטריאטום, דרך רצפטורים שונים של דופמין.

חשיבות הקלט הדופמינרגי לתפקוד הגרעינים הבזליים



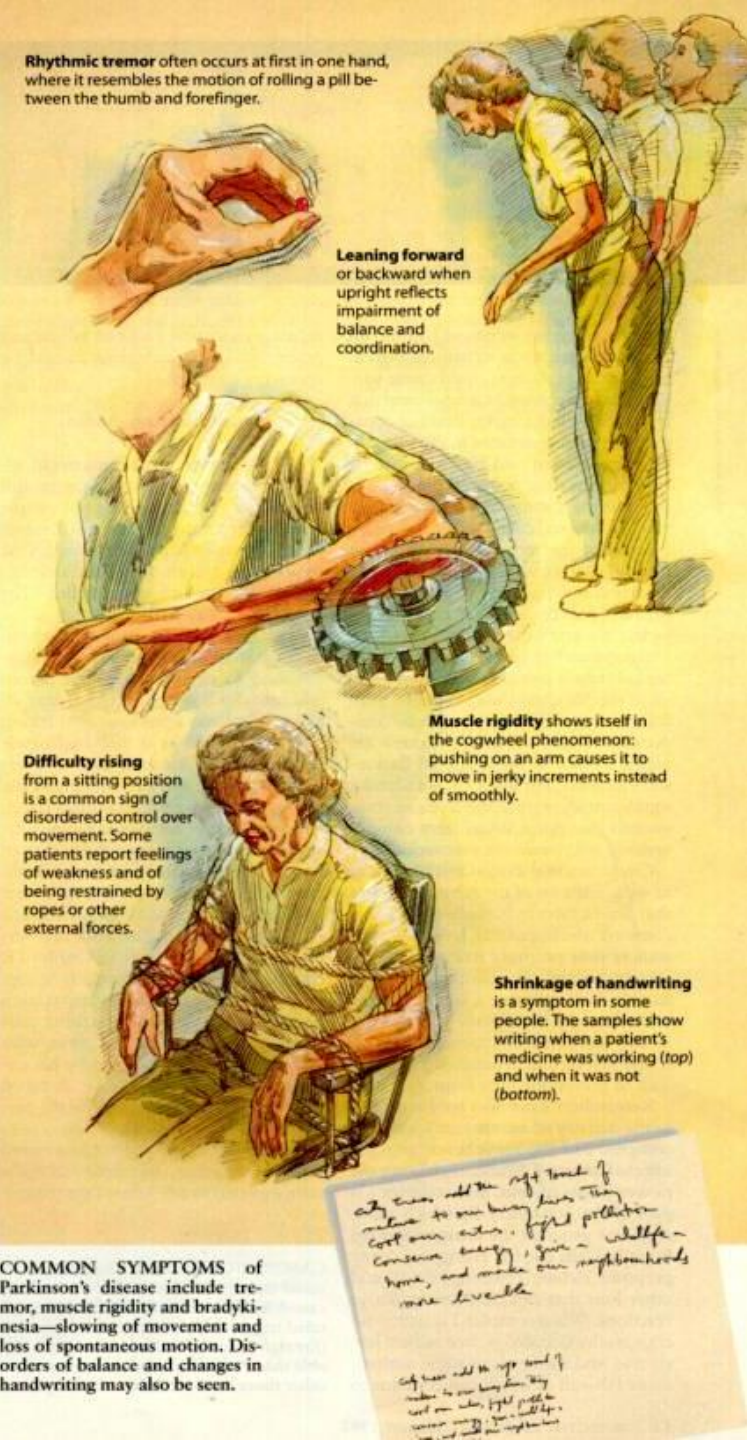
הקלט הדופמינרגי הוא מעורר לגבי המסלול הישיר (דרך רצפטורים מסוג D1) ומעכב לגבי המסלול העקיף (דרך רצפטורים מסוג D2). אי לכך הקלט הדופמינרגי הוא באופן כללי מעורר.

מכאן ברור שאבדן הקלט הדופמינרגי גורם להפרת האיזון בין ערור ועכוב בגרעינים הבזליים ובסה"כ הקורטקס מקבל פחות קלט אקסיטטורי מהתלמוס כך שתנועות לא יכולות לצאת לפועל.

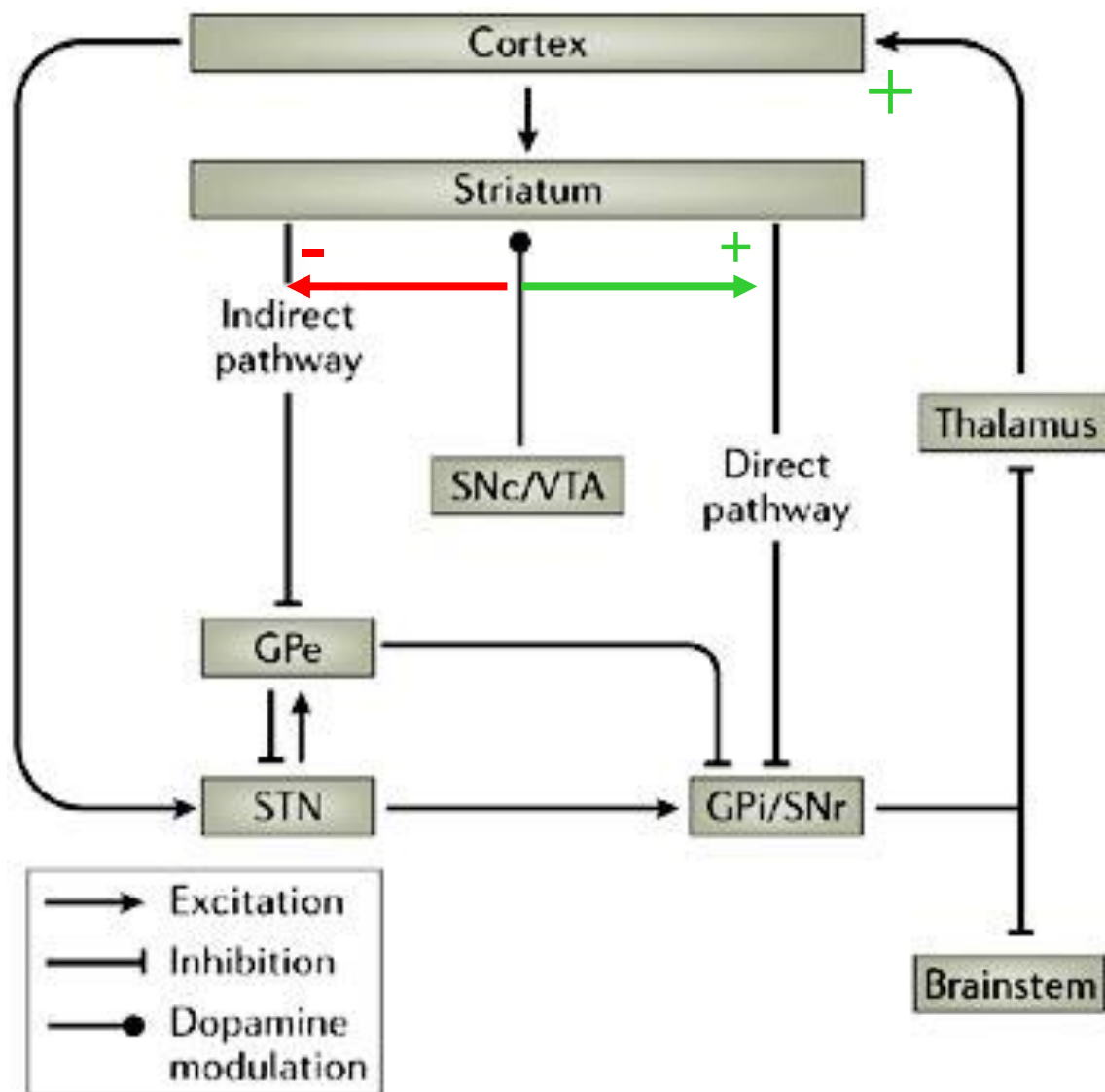
Parkinson's disease



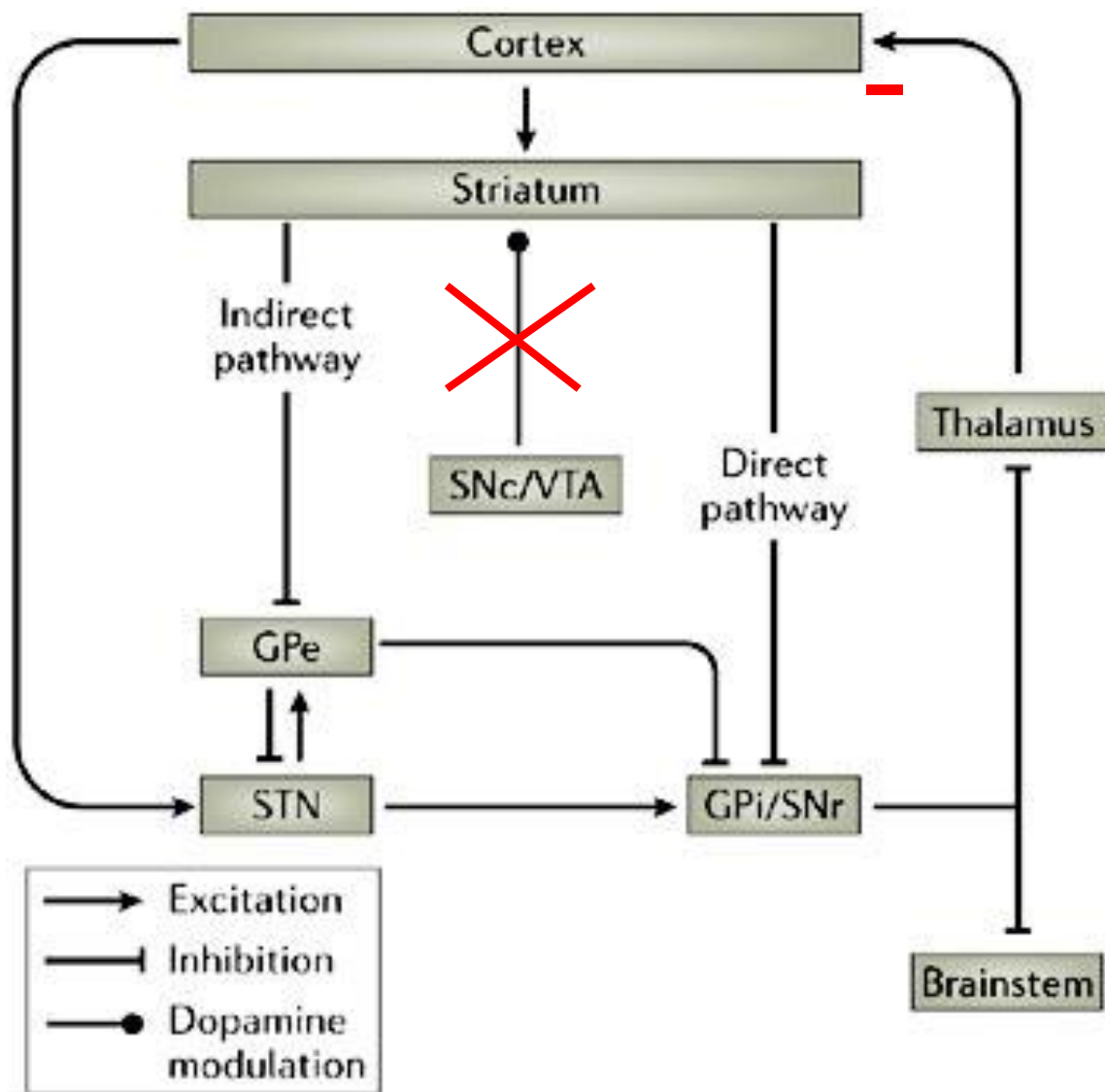
מכאן ברור מדוע במחלת פרקינסון יש קושי גדול להתחיל ולהוציא את התנועות אל הפועל, וקושי להפסיק תנועות בהתאם לגרויים סביבתיים, למשל להפסיק ללכת כשמגיעים לדלת או לעשות תקוני יציבה כשנתקלים באבן וכד'.



מצב נורמלי

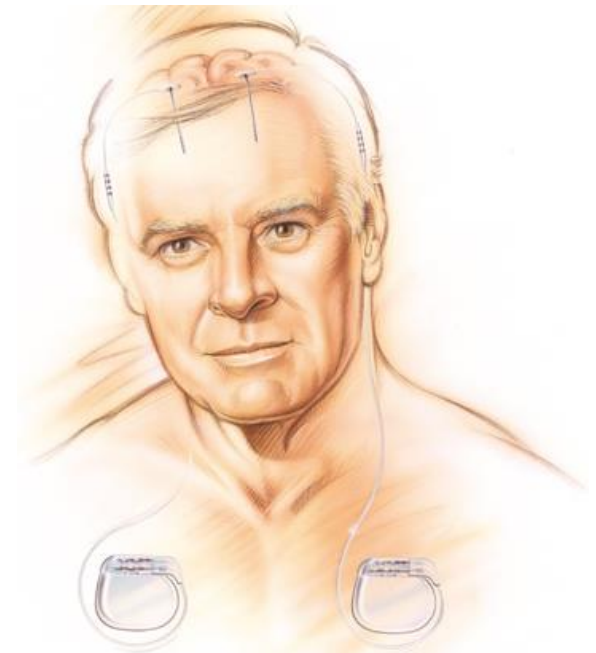
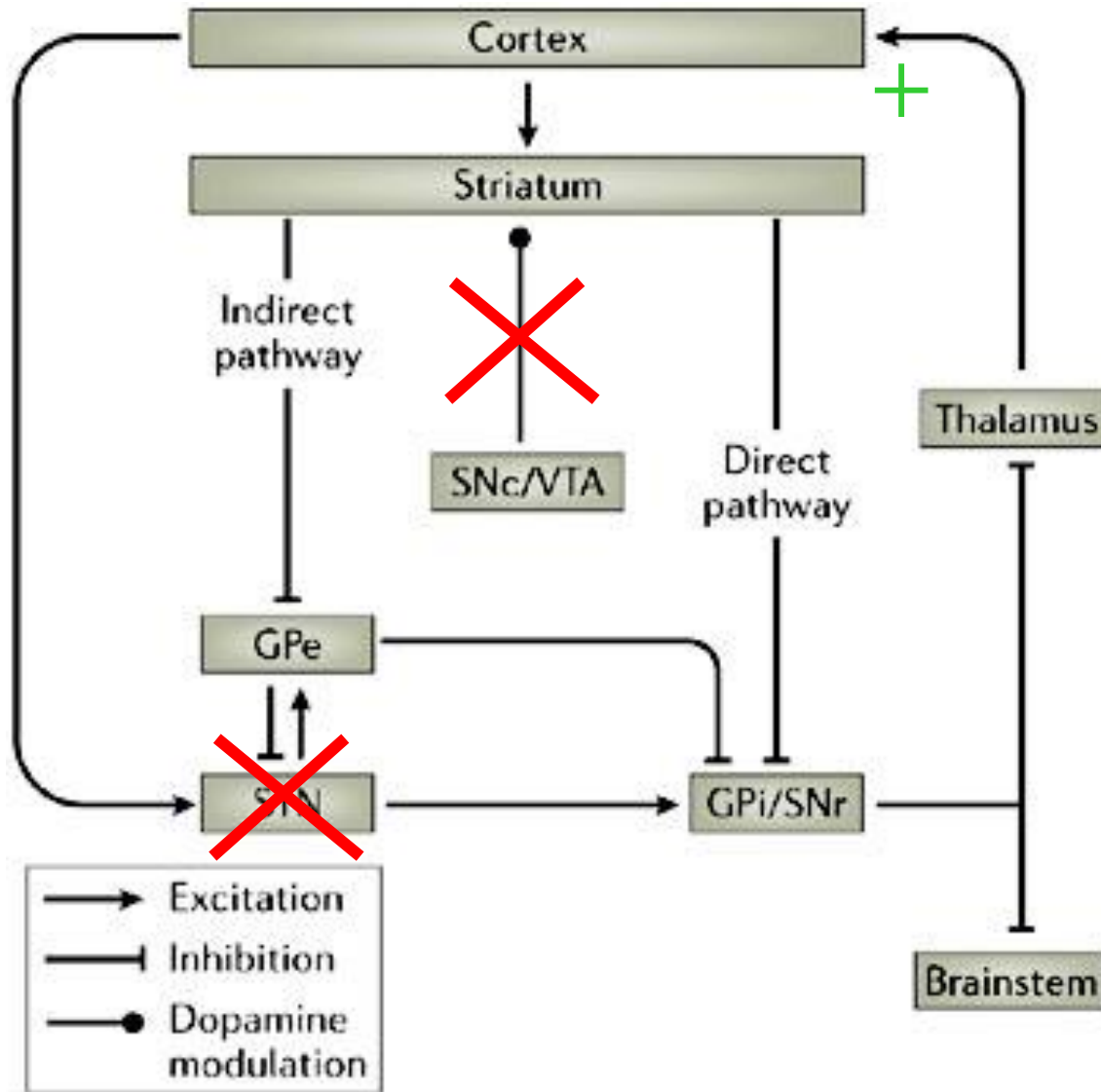


מחלת פרקינסון



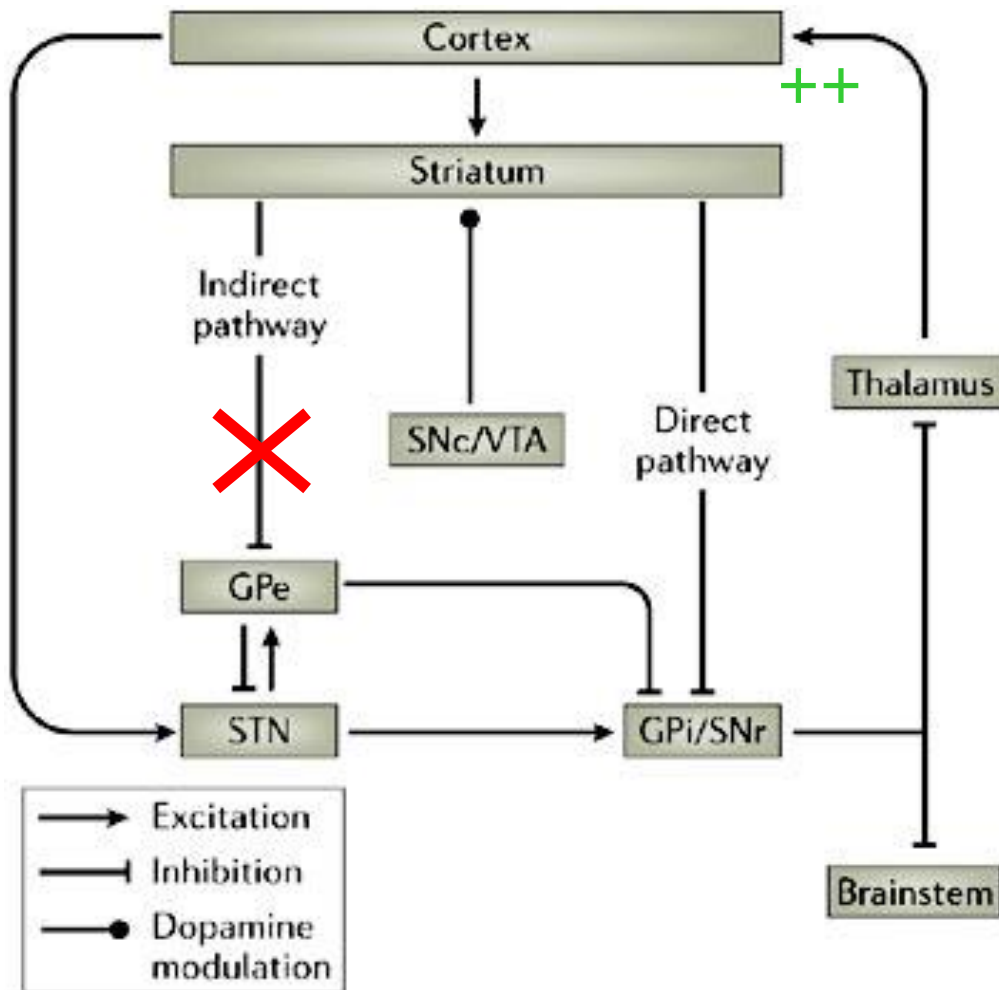
הרס/גרוי משתק של ה Subthalamic nucleus

הבנת המסלולים בגרעינים
הבזליים אפשרה ריפוי חדשני
על ידי השתלת אלקטרודת גרוי
שמבטלת את פעילות הגרעין
הסבתלמי ובכך מונעת את
האינהיביציה של המסלול
העקיף ולכן מובילה לאיפשור
של תנועות.



DBS Movie

Huntington's disease



Normal Basal Ganglia

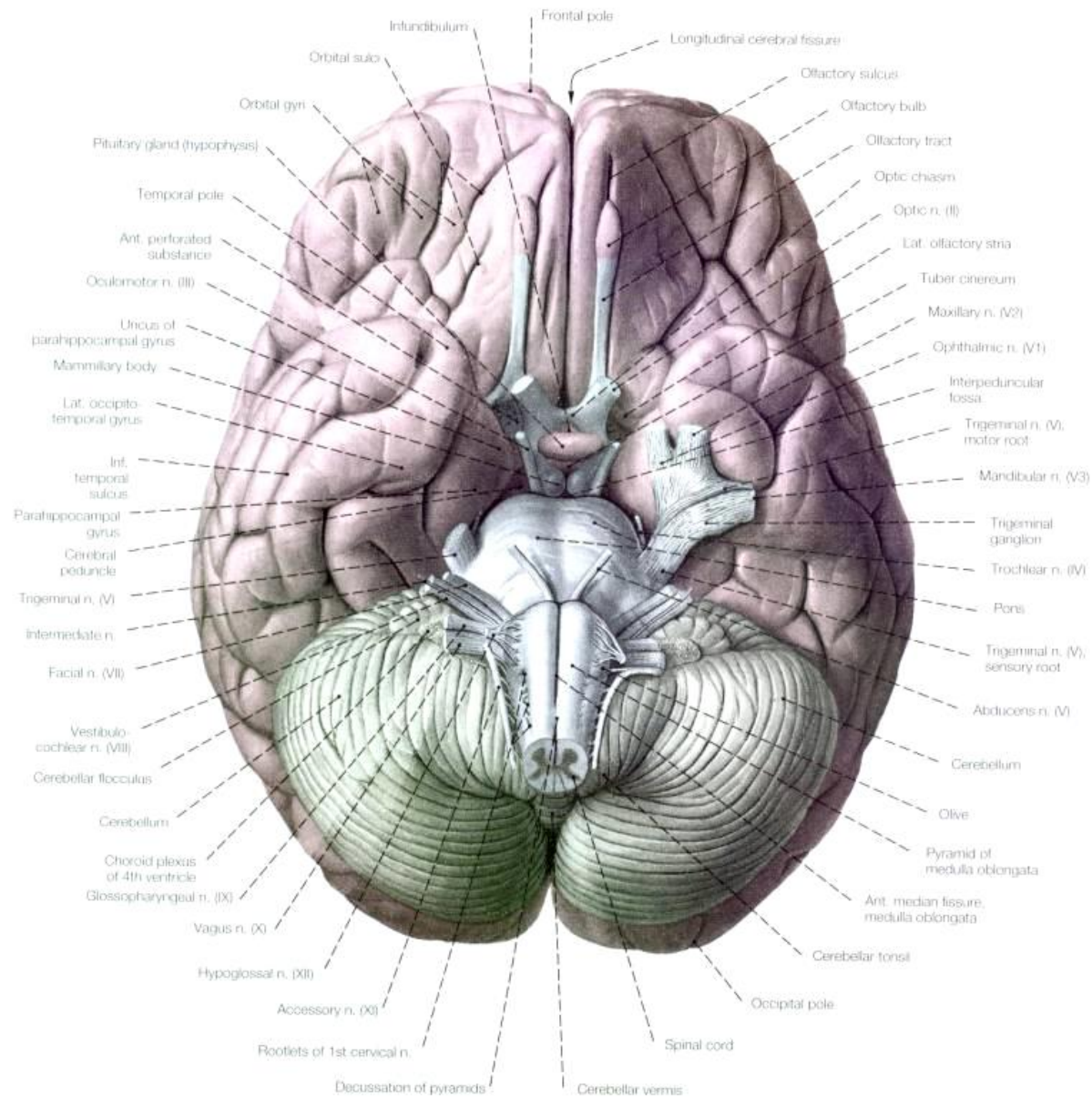


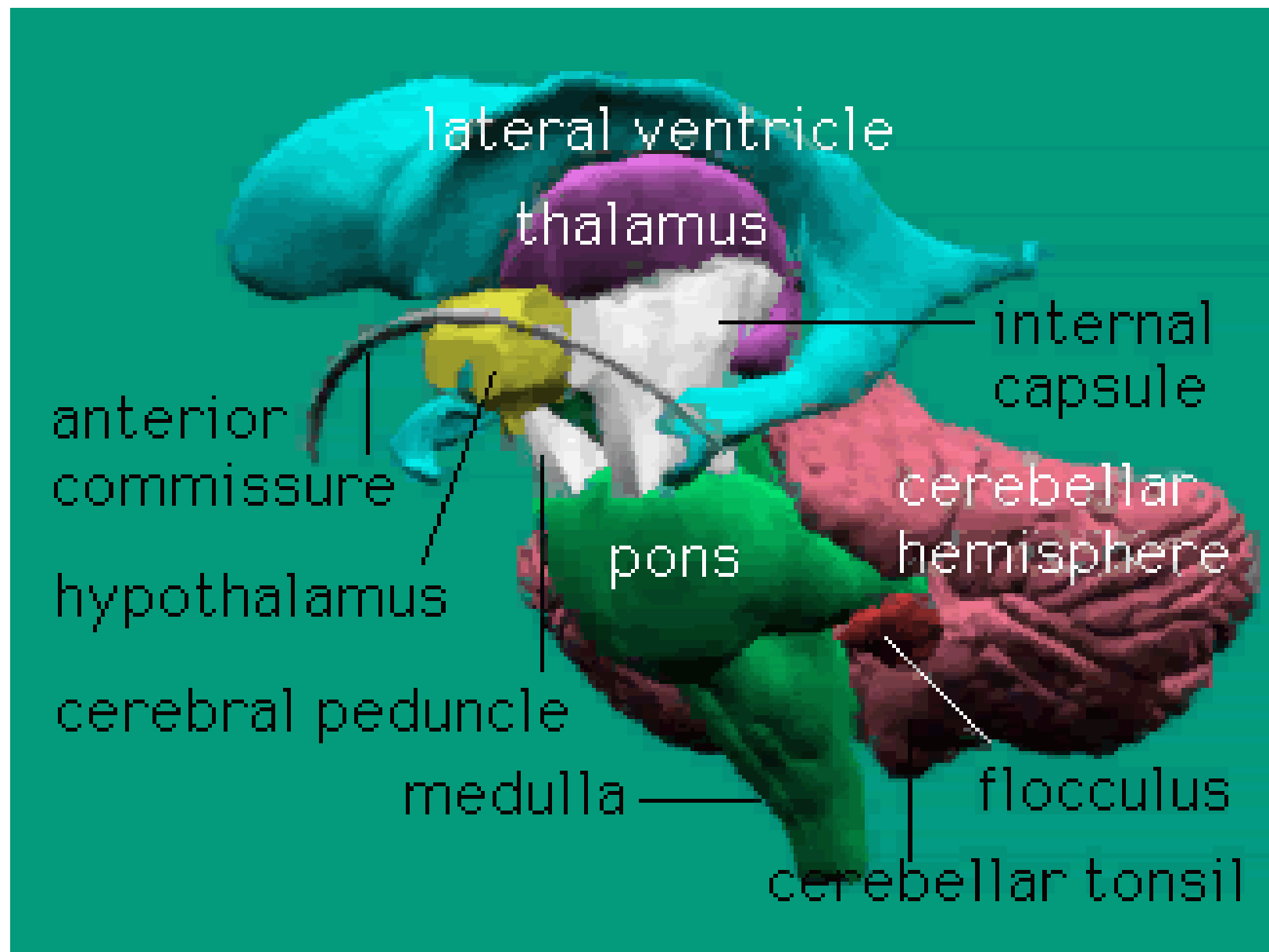
HD Basal Ganglia

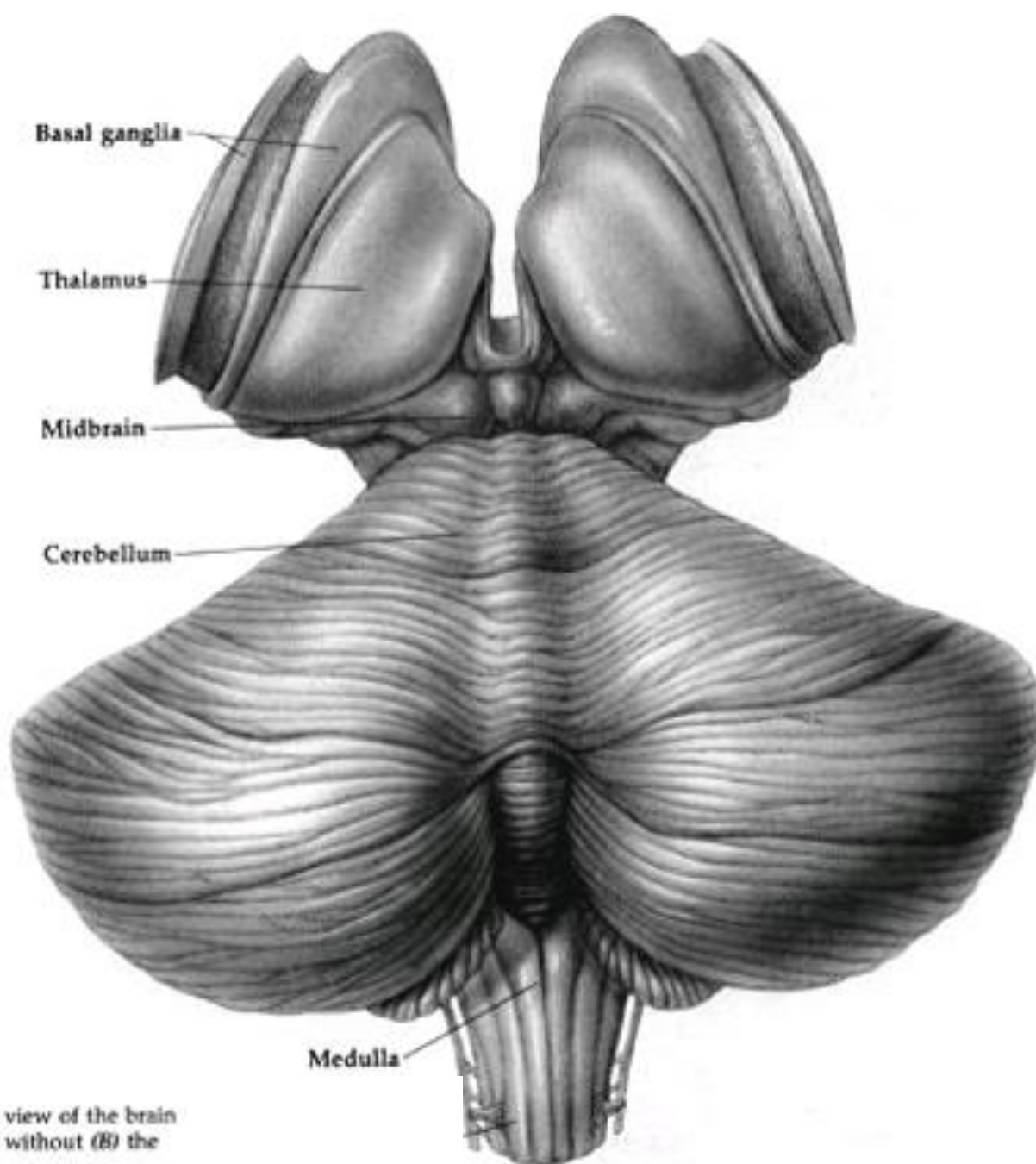


במחלת הנטינגטון יש נזירודגנרציה ותמותה של נזירונים בסטריאטום, בעיקר נזירונים גאבארגיים אינהיביטורים שנשלחים ל-GPe במסלול העקיף. זה גורם לפחות אינהיביציה על ה-GPi ולכן ליתר אקסיטציה בתלמוס ובקורטקס. המחלה מתבטאת בביצוע תנועות בלתי רצוניות, בעיקר בפנים ובידיים.

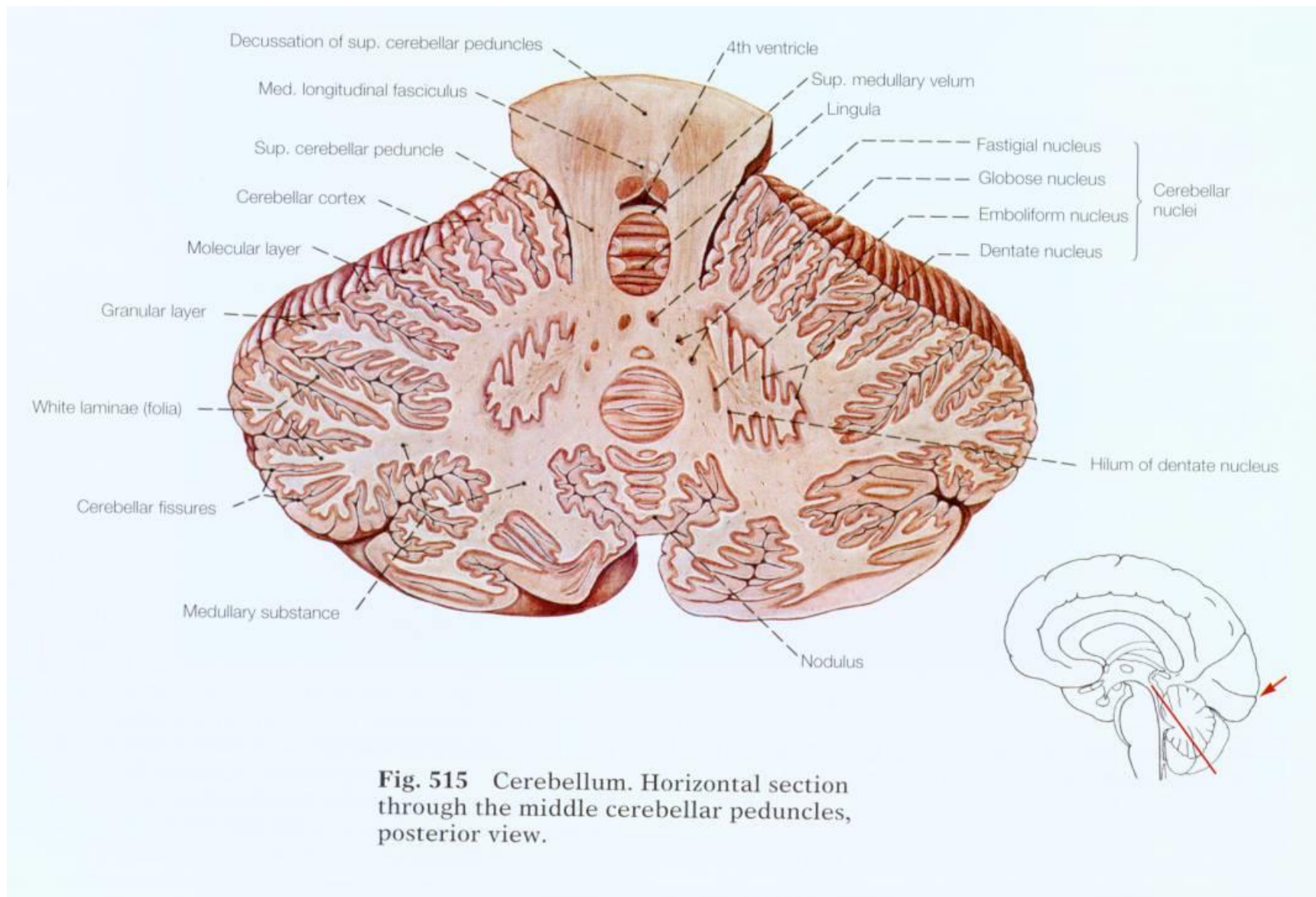
הצרבלום (Cerebellum)





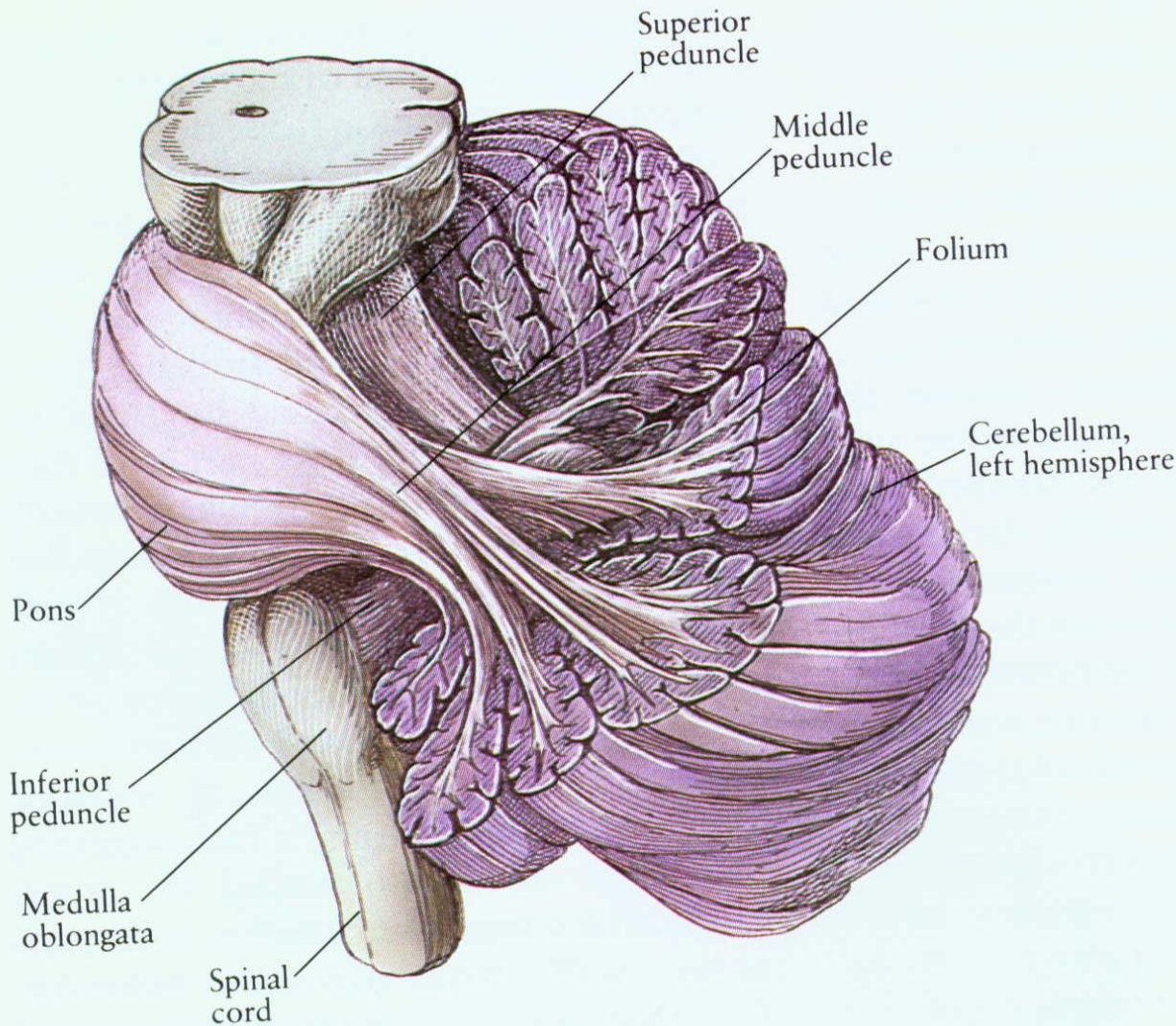


הצרבלום נמצא בחלק
האחורי התחתון של
המוח. כמו המח כולו
(cerebrum), גם
הצרבלום מורכב
מקליפה (cortex)
חיצונית, שכוללת בעיקר
גופי תאים (חמר אפור),
ואקסונים (חומר לבן)
בחלקים היותר פנימיים.



הקורטקס של הצרבלום גם הוא מאוד מפותל, כדי לאפשר שטח גדול יותר ומספר תאים עצום (ב 50 מיליארד - חלק ניכר מתאי המח). בתוך החומר הלבן קבורים מספר ציברי תאים שנקראים הגרעינים העמוקים (deep nuclei) של הצרבלום.

רוב הקלט של הצרבלום מגיע מהקורטקס (דרך תחנות ממסר בפונס (Pons) שבגזע המוח). האקסונים מהפונס נשלחים אחורנית ועושים סינפסות על נוירונים בקורטקס של הצרבלום. המידע עובר עיבוד בקורטקס ומשם נשלח לגרעינים העמוקים של הצרבלום.



תאים בגרעינים אלה שולחים אקסונים שברובם מגיעים חזרה אל הקורטקס. אי לכך, נוצר מעין מעגל גם שבו הצרבלום עושה מודולציה לתהליכים שמתרחשים באזורים שונים של הקורטקס. בנוסף, חלק מהתקשורת של הצרבלום היא גם עם גרעינים בגזע המוח ששולטים על תנועות מוטוריות.

ניתן לחלק את הצרבלום
למספר חלקים:

1. הוסטיבולוצרבלום –

מבחינה אנטומית נמצא בחלק
התחתון המדיאלי של
הצרבלום

(Flocculonodular Lobe).

אזור זה מקבל אינפורמציה

מהחוש הוסטיבולרי (של

שיווי המשקל), והפלט שלו

חוזר ומגיע לגרעינים

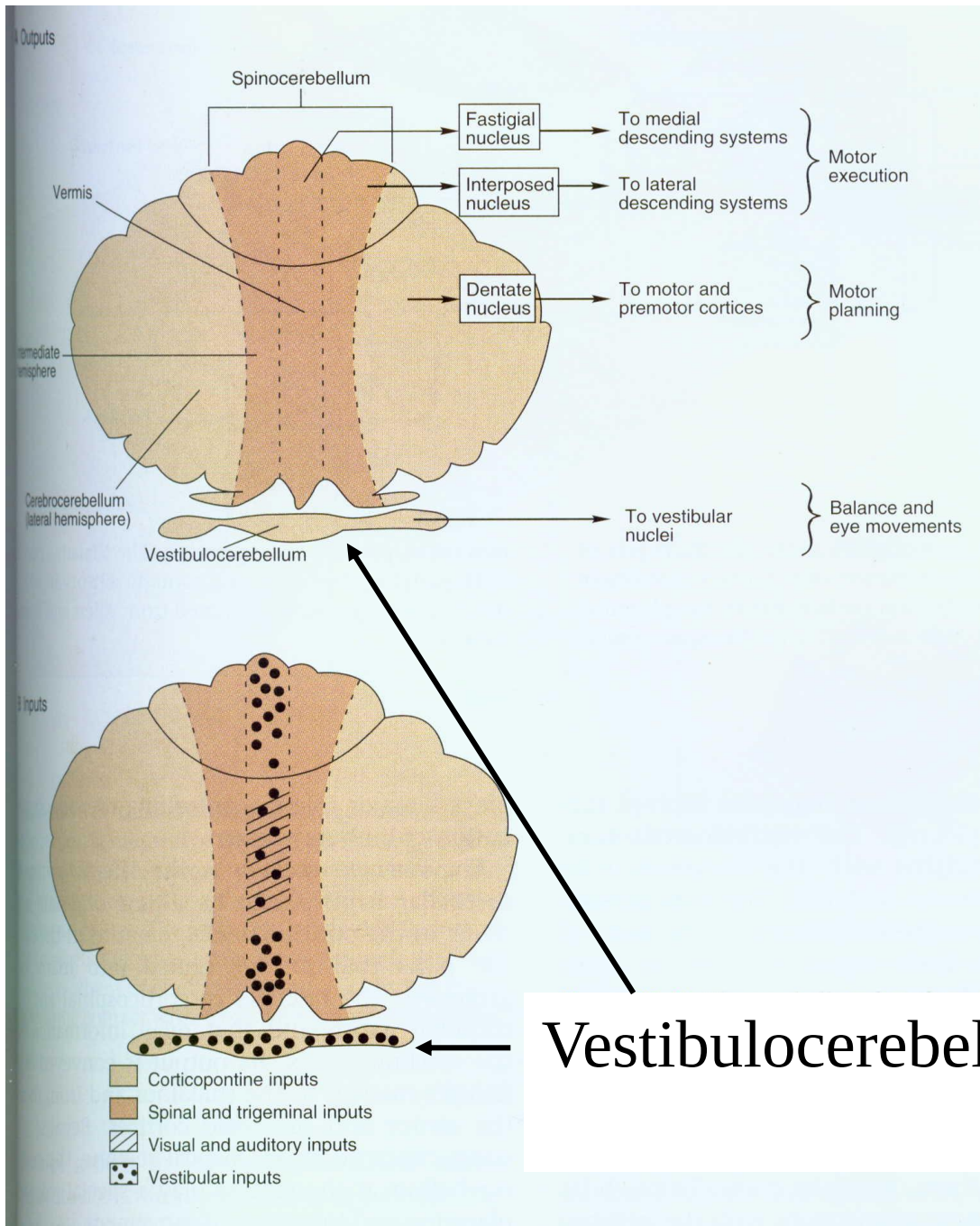
הוסטיבולריים בגזע המוח.

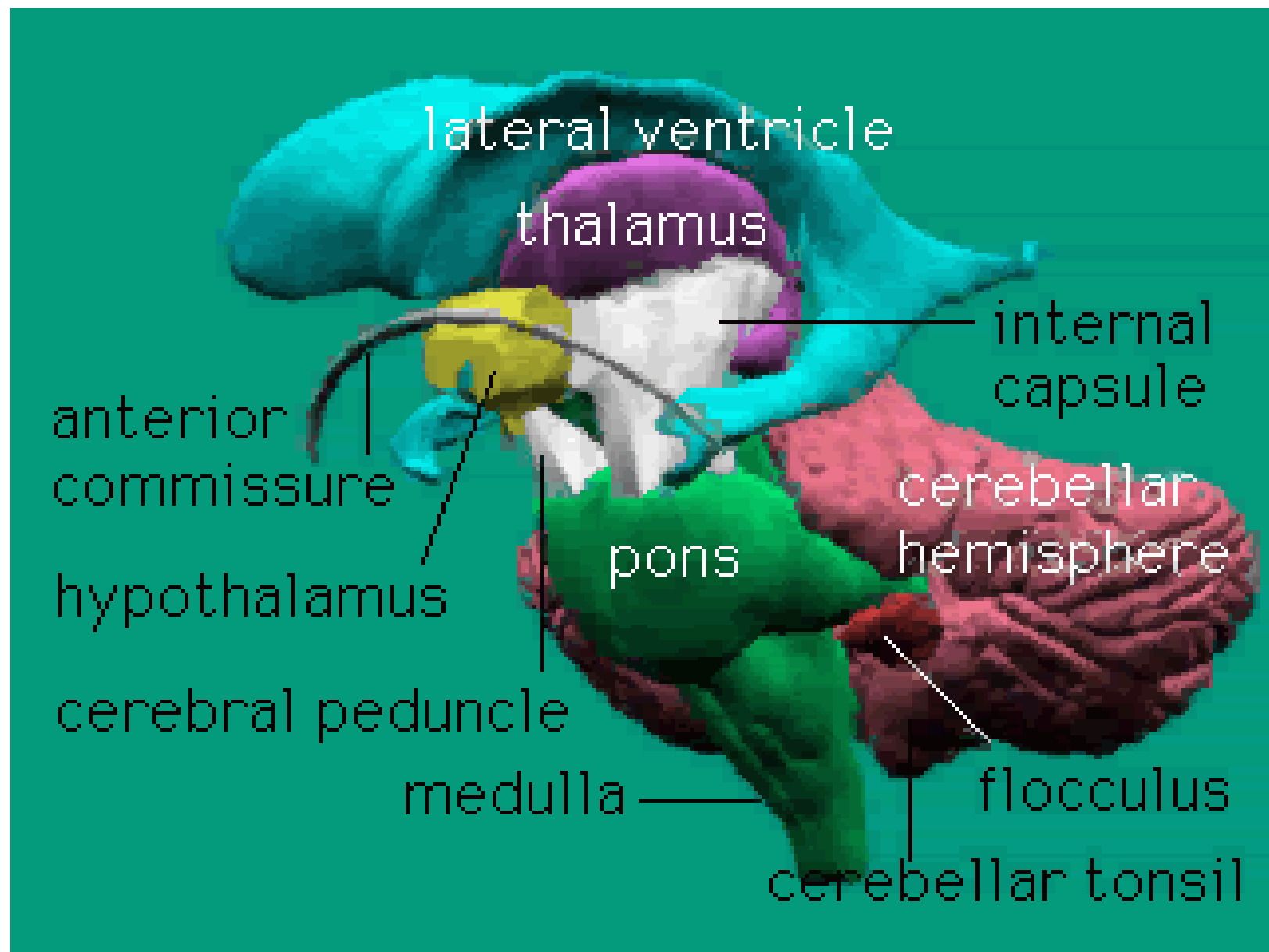
מערכת זו היא חלק

ממערכת שמוסתת

ומארגנת את שיווי המשקל

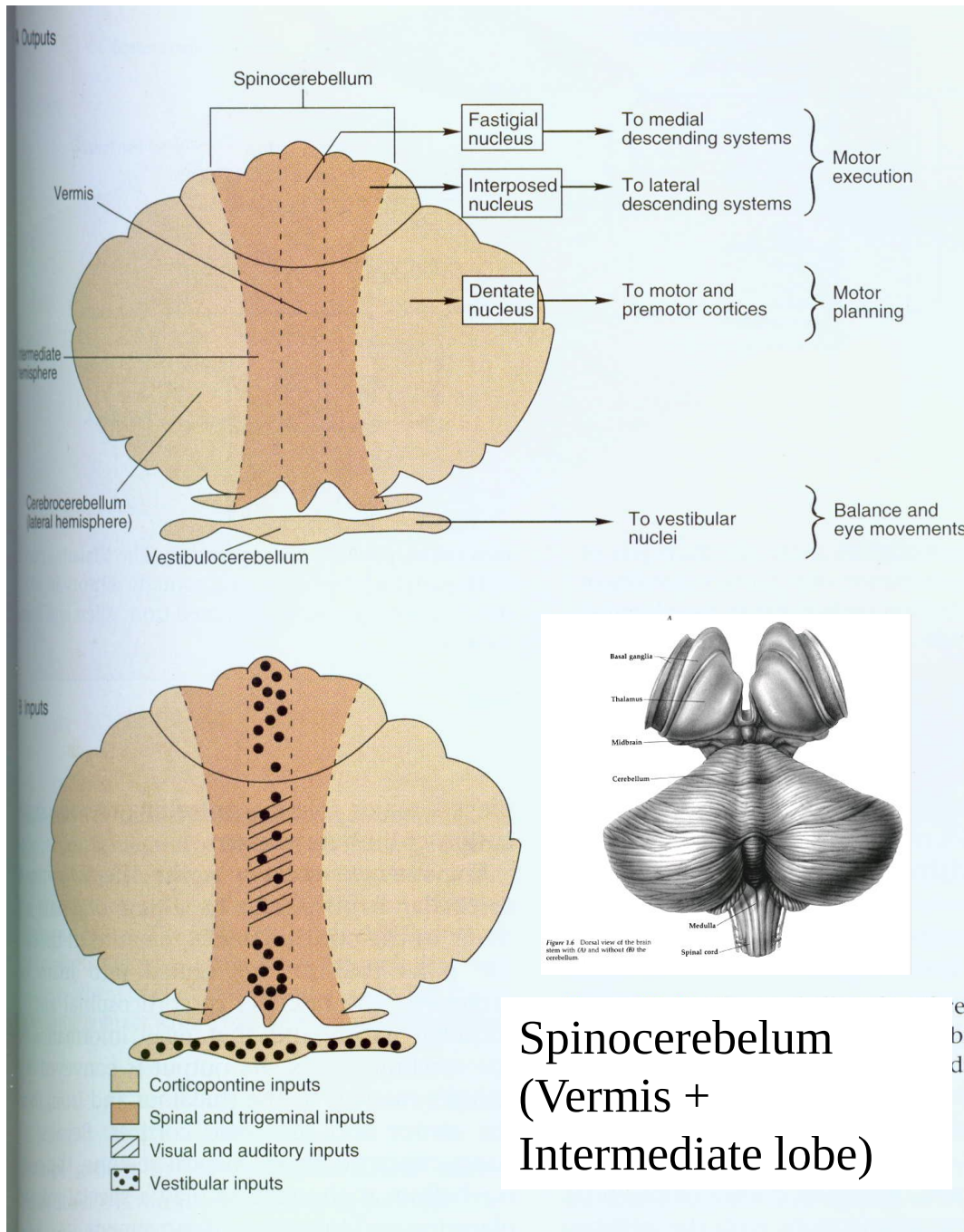
והיציבה.





– Spinocerebellum .2

מבחינה אנטומית כולל את הוורמים (Vermis), שעובר לאורך החלק המדיאלי של הקורטקס של הצרבלום ואזור ביניים לטרלי לוורמים. אזור זה מקבל קלט מחוט השדרה ומחושים אחרים, כולל קלט ראייתי ושמיעתי, וכן מהקורטקס המוטורי ושולח אינפורמציה דרך גרעין עמוק של הצרבלום בחזרה אל גזע המוח והקורטקס. אזורים אלה משווים בין פקודות שיצאו מהקורטקס המוטורי לביצוע פעולה מסוימת לבין הפידבק שמגיע מחוט השדרה לגבי הפעולה המבוצעת באותו רגע. בעזרת השוואה זו, אזור יכול לבצע תיקונים – "החלקת התנועות", הפיכתן למדויקות יותר.



3. הצרברוצרבולום

מבחינה אנטומית נמצא בחלק האזור הלטרלי של הצרבולום – החלק הגדול ביותר של הצרבולום שעבר התפתחות מואצת בעיקר אצל בני אדם. אזור זה אחראי בעיקר על תכנון ותזמון תנועה עתידית, התכווצות השרירים הקשורים בתנועה, זריקת עצם לדוגמא. הצרבולום עוזר לקורטקס לחשב את כל הפרמטרים ולתזמן אותם בצורה מאוד מדויקת. מקבל אינפורמציה מהאזור הפרה-פרונטלי והשניוניים ועושה עיבודים מתמטיים על הפרמטרים, ומחזיר את האינפורמציה בחזרה אל הקורטקס. אחראי גם לאספקטים קוגניטיביים של התנועה – פתרון בעיות תנועתיות מורכבות (בניסוי הזזת הקיסמים בחורים – הובחנו ב-fMRI שינויים בצרבולום וגילו באזור הלטרלי, שכאשר הפעולה מורכבת ואסטרטגית יותר, אזור זה מופעל יותר. היום מתחילים לייחס לו תפקידים מורכבים יותר ויותר – שפה ועוד.

