

הפיזיקה של MRI וכיצד אנו משתמשים בה כדי לגלות את מסתרי המוח

Kathryn Mary Broadhouse*

מכון תומפסון לתודעה ומדעי המוח חוף סנשיין, האוניברסיטה של חוף סנשיין, חוף סנשיין, קווינסלנד, אוסטרליה

יכולתנו לפרש ולעבד מידע, וגם לווסת רגשות, נקבעת על-ידי המבנה וההרכב הכימי של המוח שלנו. שינוי במבנה או בהרכב הביוכימי של המוח שלנו יכול להשפיע על בריאותנו הנפשית; על האופן שבו אנו מתמודדים עם מצבים של לחץ יומיומי; על היצירתיות שלנו ועל איכות החיים הכללית שלנו. מדענים שמתעניינים בחקר המוח ובהפרעות נפשיות (מדענים אלה נקראים מדעני מוח) מנסים להבין כיצד הארכיטקטורה וההרכב הביוכימי של המוח שונים במצב של בריאות תקינה לעומת מצב של מחלה. כדי לעשות זאת אנו משתמשים בשיטה שנקראת דימות תהודה מגנטית (MRI) במטרה לקבל תמונה של המוח החי, לבחון את התפקודים שלו ואת המבנה שלו. המאמר הזה מסביר על הפיזיקה של MRI ועל האופן שבו אנו משתמשים בה כדי להפיק תמונות של המוח שלנו לשם חקירת האופן שבו המוח פועל.

המוח: ביתה של הנפש

כמרכזה של מערכת העצבים, המוח מפרש את המידע שמגיע מסביבתנו באופן שיהיה הגיוני עבורנו. המוח מפרש מידע וגם משחרר כימיקלים ששולחים אותות חשמליים (הודעות)

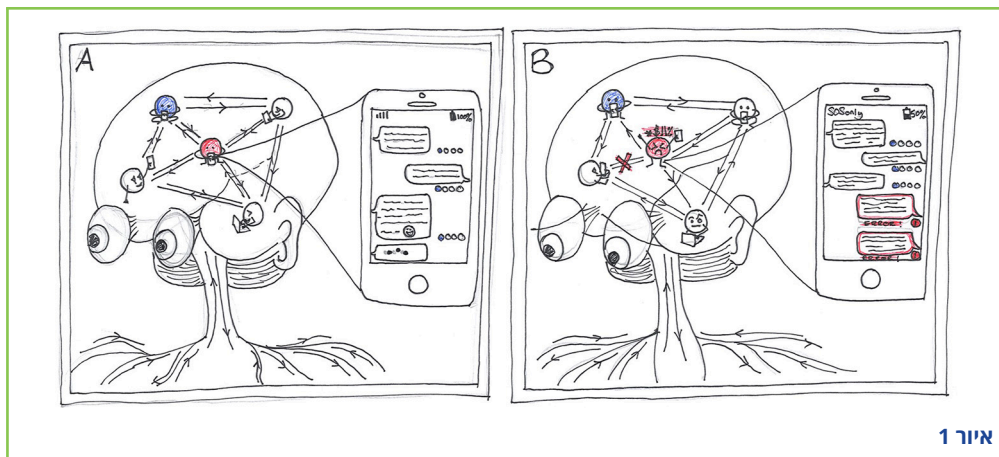
סוקרים צעירים

**MATTHEW
FLINDERS
ANGLICAN
COLLEGE**
גיל: 14-15



איור 1

הרשת המוחית. זרימה של מידע, הרגשות שלנו והמחשבות שלנו יכולים להידמות לרשת חברתית שבה, במקום שהודעות יישלחו בין חברים ברשת החברתית, מידע נשלח לאזורים שונים במוח דרך תאי עצב (ניורונים). (B) בלקויות של בריאות נפשית כמו למשל דיכאון וחרדה, לעיתים קרובות אנו רואים הפרעות ברשת המוחית. ההפרעות האלה יכולות להשפיע על האופן שבו הרשת המוחית שולחת הודעות, מקבלת אותן או מפרשת אותן.



איור 1

שגורמים לנוף להגיב. אולם המוחות שלנו לא רק מווסתים את הגוף שלנו ואת התנועות שלנו אלא מהווים גם את ביתה של הנפש שלנו. המוח הוא המיקום הפיזי שמקושר לפעילותה של הנפש.

המוחות שלנו שולטים באופן רציף בזרימת המידע: הזיכרונות, המחשבות, הרגשות והדמיון שלנו. זרימת המידע הזו (איור 1A) יכולה להידמות לרשת חברתית שבה במקום שהודעות יישלחו בין חברים ברשת חברתית, המידע נשלח לאזורים שונים במוח דרך תאי עצב (ניורונים). הרשת המוחית נשענת על המבנה המוחי וההרכב הכימי של המוח כדי לתפקד באופן תקין. למעשה, מוח מוצלח או יעיל מאפשר לנו להיות בריאים מבחינה קוגניטיבית (יכולתנו לבצע פעילויות מנטליות), רגשית וחברתית.

בריאות נפשית

הרשת המוחית, האופן שבו היא שולחת מידע והמבנה הבסיסי שלה קובעים את הבריאות הנפשית שלנו. בלקויות בבריאות נפשית כמו למשל דיכאון וחרדה, לעיתים קרובות אנו רואים הפרעה ברשת המוחית (איור 1B). השינוי הזה במבנה הבסיסי ובהרכב הכימי של המוחות שלנו יכול להשפיע על האופן שבו אנו מתמודדים עם הלחצים הרגילים של חיי היומיום, על היצרנות שלנו ועל איכות החיים הכללית שלנו. לכן, חוקרי מוח שרוצים להבין לקויות בבריאות נפשית ואת האופן שבו כולנו יכולים להישאר בריאים נפשית שואפים לבחון את הרשת המוחית. אם נוכל להבין כיצד המבנה המוחי וההרכב הכימי מובילים לתפקוד בריא, נוכל להתחיל להבין לקויות נפשיות. אולם כדי להיות מסוגלים לחקור את המוח ואת הרשתות שלו, אנו צריכים להיות מסוגלים להסתכל לתוך מוחותיהם של אנשים. כדי לעשות זאת אנו משתמשים ב**דימות תהודה מגנטית (MRI)**.

דימות תהודה מגנטית: MRI

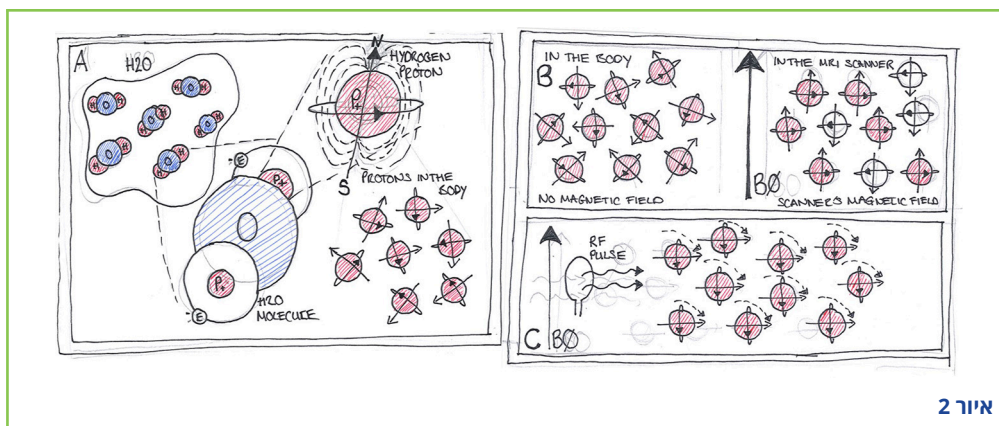
דימות תהודה מגנטית (MRI) מאפשר לנו לראות לתוך הגוף האנושי בפירוט רב, באמצעות שימוש במגנטים וגלי רדיו. סורק ה-MRI הראשון שהשתמש בו לדימות של הגוף האנושי נבנה בניו-יורק בשנת 1977. מאז הטכנולוגיה התקדמה מאוד וכיום MRI נמצא בשימוש תדיר על-ידי

דימות תהודה מגנטית (Magnetic resonance imaging, MRI)

שיטה שמאפשרת לראות מוחות של אנשים באמצעות מגנטים וגלי רדיו.

איור 2

פרוטוני מימן והאופן שבו הם מתנהגים בשדה מגנטי. (A) מים מורכבים משני אטומי מימן ומאטום אחד של חמצן. גרעין המימן (שמוצג באדום בתור +P) מכיל מטען חיובי אחד - פרוטון שמסתובב סביב צירו, אשר מתנהג כמו מגנט זעיר. (B) בסורק MRI הפרוטונים מסתדרים עם השדה המגנטי B₀, חלקם בכיוון "מעלה" (up, באדום) וחלקם בכיוון "מטה" (down, בלבן). השדה המגנטי הכולל שמופק מכל פרוטוני המימן מבטל כמעט לחלוטין את השדות המגנטיים המקומיים של כל אחד מהפרוטונים, ומשאיר רק את השדה המגנטי שמגיע מכל הפרוטונים העודפים שבכיוון "מעלה", וזהו השדה המגנטי הקטן שאנו יכולים למדוד באמצעות MRI. (C) כאשר נשלח גל או פולס של אות רדיו עם אותה התדירות כמו תדר הנקיפה של הפרוטון, פרוטוני ה"מעלה" מתהפכים הרחק משדה ה-B₀ בעודם סופגים את אנרגיית אות הרדיו.



איור 2

הפאים שמסתכלים בעזרתו לתוך הגוף האנושי. הסיבה לכך היא ש-MRI לא מערב קרינה (כמו סריקת רנטגן או סריקת CT) וישנם עוד ועוד סורקי MRI שמותקנים ברחבי העולם.

ה"מגנט" בדימות תהודה מגנטית

סורק MRI הוא למעשה מגנט עצום. עוצמתו של המגנט נמדדת ביחידה שמכונה טסלה (T - Tesla). מרבית סורקי ה-MRI שמשמשים בהם בבתי חולים ובמחקר רפואי פועלים בעוצמה של 3 T או 1.5 T. כדי לשים זאת בפרספקטיבה, עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ היא 0.00006 T. כלומר, סורק MRI שעוצמתו 3 T חזק בערך פי 60,000 מהשדה המגנטי של כדור הארץ!

MRI משתמש בשדות מגנטיים ובגלי רדיו כדי למדוד כמה מים נמצאים ברקמות שונות בגוף, מְמַפֵּה את מיקום המים ואז משתמש במידע הזה כדי להפיק תמונה מפורטת. התמונות כל כך מפורטות מאחר שהגוף שלנו מורכב מסביבות 65% מים, ולכן אנו יכולים למדוד אותות חזקים. מולקולת המים (H₂O) מורכבת משני אטומי מימן ומאטום אחד של חמצן. אטומי המימן (H) הם החלק שהופך את המים להיות מעניינים עבור MRI, ומה שאנו משתמשים בו כדי למדוד אות מהגוף כשאנו מבצעים סריקת MRI.

אם נסתכל על מימן ביתר פירוט, אנו רואים שיש לו גרעין מרכזי שמכיל מטען חיובי אחד שנקרא פרוטון (איור 2A). כפי שכדור הארץ מסתובב סביב צירו עם קטבים מגנטיים צפוני ודרומי, כל פרוטון מימן מסתובב הוא כמו מגנט זעיר שמסתובב סביב לציר של עצמו. תנועת הסיבוב ידועה כנקיפה (או פרצסיה). בכל רגע בזמן, כל מיליארדי פרוטוני המימן בגוף שלנו ממוקמים בעמדות אקראיות ומסתובבים סביב הציר של עצמם.

אולם האקראיות הזו משתנה כאשר אנו ממקמים גוף אנושי בתוך שדה מגנטי חזק מאוד, כמו בסורק MRI. ממש כמו שמחט של מצפן מסתדרת עם הכיוון המגנטי של כדור הארץ, כאשר פרוטוני המימן האלה שמסתובבים באקראיות ממוקמים בסורק MRI, הצירים שלהם מיישרים אותם עם השדה המגנטי החזק יותר של הסורק. אנו קוראים לשדה המגנטי של הסורקים בשם שדה B₀. ממש כמו מחט של מצפן בשדה המגנטי של כדור הארץ, המצפן עצמו לא זז פיזית אלא שהמחט מסתובבת סביב עצמה. באופן דומה, פרוטוני המימן לא זזים פיזית בגוף שלכם כשאתם נכנסים לסורק MRI, אלא שהצירים שלהם מסתדרים עם כיוון שדה

B₀

שמו של השדה המגנטי של סורק ה-MRI.

חלקם יסתדרו בכיוון "מעלה" (במקביל) וחלקם יסתדרו בכיוון "מטה" (אנטי-מקביל), בעודם ממשיכים להסתובב סביב הצירים של עצמם (איור 2B). בהתאם לחוקים המופלאים של פיזיקת הקוונטים, שלא ניכנס אליהם כאן, ישנם מעט יותר פרוטוני "מעלה" מאשר פרוטוני "מטה". אם תחשבו על השדה המגנטי הכולל שמיותר מכל פרוטוני המימן, המגנטים הזעירים האלה מבטלים זה את זה כמעט לגמרי, ומשאירים רק את השדה המגנטי שנובע מהחלק הקטן של פרוטוני "מעלה" עודפים, וזהו השדה המגנטי הקטן שאנו יכולים למדוד באמצעות MRI.

שדה לא משפיע רק על הכיוון של הפרוטון, אלא גם משפיע על המהירות שבה הפרוטונים האלה מסתובבים (מה שנקרא **תדירות נקיפה**). תדירות הנקיפה תלויה בחוזק של השדה המגנטי. ככל שהשדה המגנטי חזק יותר, כך הפרוטונים מסתובבים מהר יותר. שני הרעיונות האלה של יישור מחדש של הציר ושל תדירות נקיפה חשובים כשאנו משתמשים ב-MRI כדי למדוד אותות ממולקולות המימן האלה.

כיצד אנו מאתרים את השדה המגנטי?

אז כיצד אנו מפרידים בין השדה המגנטי זעיר שנגרם על-ידי עודף אטומי ה"מעלה" בגוף שלנו מהשדה המגנטי החזק B0 של הסורק עצמו? אנו משתמשים במשהו שנקרא **פולס RF** כדי ליצור הפרעה או להסיט את כל הפרוטונים, באותו הזמן, מחוץ ליישור עם השדה המגנטי של הסורק (איור 2C). התדירות של פולס ה-RF צריכה להיות זהה לתדירות הסיבוב של פרוטוני המימן, כך שהם יוכלו להחליף אנרגיה ולהימצא **בתהודה** זה עם זה. תהודה מאפשרת לפרוטונים לספוג מספיק אנרגיה מפולס ה-RF כדי לסובב את צירם הרחק מהשדה המגנטי B0, כך שסורק ה-MRI יוכל למדוד אותם. אם תחשבו שוב על האופן שבו מצפן בשדה המגנטי של כדור הארץ מצביע לכיוון הקוטב הצפוני, אנו יכולים לגרום למחט להסתובב כך שהיא תצביע לכיוון מזרח אם אנו ממקמים מגנט קטן קרוב למצפן. זה דומה לאופן שבו פרוטונים מתנהגים כשאנו מפעילים את פולס ה-RF.

אם הגוף מלא כולו בפרוטוני מימן בכיוון "מעלה" שכולם מסתובבים באותו תדר נקיפה בשדה B0, כיצד אנו מכוונים רק אל האטומים במוח במטרה לחקור בריאות נפשית? אנו משתמשים בעובדה שתדירות הנקיפה של פרוטונים תלויה בעוצמת השדה המגנטי. אנו מפעילים שדה חשמלי נוסף, B1, שמשתנה לאורך הגוף. בדוגמה שמוצגת באיור 3A, פרוטוני מימן בראש יסתובבו מהר יותר מאשר האטומים בחזה, בבטן וברגליים. לאחר מכן, אנו מכוונים את פולס ה-RF לתדירות הנקיפה של אטומי המימן שבראש. במצב כזה, פולס ה-RF יהיה בתהודה רק עם הפרוטונים במוח. לכן, רק הפרוטונים במוח יספגו אנרגיה מפולס ה-RF ויסתובבו הרחק מהשדה. B0 אנו יכולים כמובן לכוון את פולס ה-RF שלנו להיות בתהודה עם פרוטונים אחרים בגוף, כמו בכפות הרגליים, אם נהיה מעוניינים לקבל תמונה של כפות הרגליים!

כיצד אנו מקבלים תמונה מהפרוטונים המסתובבים האלה?

אז, כיצד אנו מקבלים תמונה מפרוטוני המימן המסתובבים והמוסטים האלה במוח? כאשר פולס ה-RF מכובה, הפרוטונים מסתובבים חזרה ומתיישרים מחדש לאורך השדה המגנטי העיקרי B0. אם נחשוב שוב על המצפן שלנו, כאשר אנו מזיזים את המגנט הקטן שלנו הרחק, המחט תסתובב מכיוון מזרח לכיוון צפון ותתיישר מחדש עם השדה המגנטי של כדור הארץ.

תדירות נקיפה (Proccessional frequency)

הקצב שבו פרוטונים מסתובבים בשדה מגנטי.

פולס RF: אות קצר בתדר רדיו (RF - radio frequency)

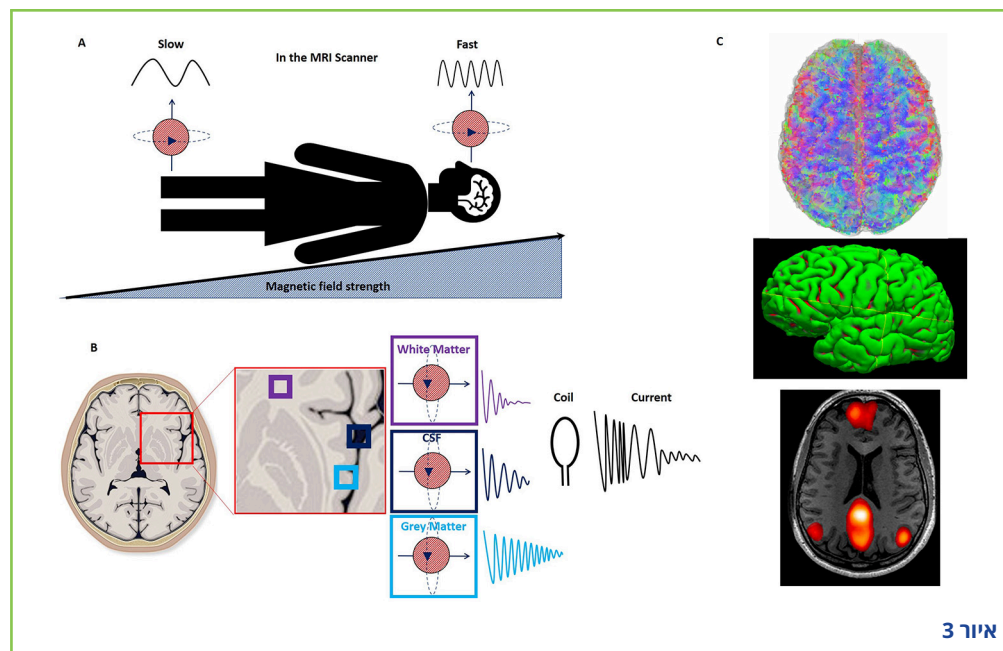
שמשתמשים בו כדי להסיט את פרוטוני התהודה מיישורם עם השדה המגנטי B0.

בתהודה (On resonance)

הימצאות באותו התדר.

איור 3

מיקוד הסריקה שלנו. (A) השדה B1 מופעל ומתגבר לאורך הגוף, מכפות הרגליים לכיוון הראש. במצב זה, פרוטוני מימן בראש יסתובבו מהר יותר מאשר הפרוטונים הרגליים. (B) רקמות שונות כמו חומר לבן, חומר אפור ונוזל המוח והשדרה בגוף יפלטו כמויות שונות של אנרגיה. כדי למדוד את האנרגיה שנפלטת מפרוטונים במוח כאשר פולס ה-RF מכובה, אנו ממקמים סליל סביב לראש. (C) השיטה הזו יכולה לספק תמונות שונות רבות של המוח, מה שמספק לנו מידע על (מימין למעלה): האופן שבו המוח מחובר מבנית דרך החומר הלבן – המידע על הכבישים המהירים במוח; (מימין באמצע): נפח אזורי החומר האפור במוח, שם המידע מעובד; (מימין למטה): כיצד המוח מחובר מבחינה תפקודית – כיצד אזורים שונים במוח מתקשרים ופועלים יחד.



איור 3

כאשר הפרוטונים מתהפכים חזרה ומתיישרים עם B0, הם פולטים אנרגיה. רקמות שונות בגוף פולטות כמויות שונות של אנרגיה. כדי למדוד את האנרגיה הנפלטת אנו צריכים ציוד מיוחד (שנקרא סליל) אשר ממוקם סביב אזור הגוף שאותו אנו סורקים (איור 3B). הסליל משמש כאנטנה ומאתר את האנרגיה שהשתחררה בצורה של זרם חשמלי. הזרם החשמלי מותמר, באמצעות מחשב, ותוך שימוש בחישוב מתמטי שנקרא **התמרת פורייה**. מאחר שהפרוטונים של סוגי הרקמות השונים במוח כמו למשל בחומר האפור, בחומר הלבן ובדם פולטים כמויות שונות של אנרגיה, התוצאה של האנרגיה המותמרת היא תמונה מפורטת מאוד של הרקמה שבתוך המוח.

התמרת פורייה (Fourier transformation)

חישוב מתמטי שמשמש ב- MRI כדי לייצג זרם חשמלי שעובר בסליל כתמונה.

מסקנות

כעת תיארו לנו כיצד אנו משתמשים ב-MRI כדי לייצר אותות ממולקולות מים בגוף ולמדוד אותם. אולם נוסף על סיפוק של תמונות מתוך הגוף שלנו, MRI יכול לשמש ככלי לענות על שאלות שונות שקשורות להרכב של המוח ולאופן שבו הוא מתפקד. באמצעות תמונות MRI אנו יכולים לחקור לא רק את המבנה של המוח ואת הרכבו הכימי אלא גם כיצד הרשת המוחית שלנו מחוברת וכיצד אזורים שונים במוח מתקשרים זה עם זה (איור 3C). באופן הזה, חוקרי מוח יכולים לחקור כיצד הרשת המוחית משתנה ממצב של בריאות נפשית תקינה למצב של לקות בבריאות נפשית. באמצעות הבנת האופן שבו מחלה נפשית משנה את המוח נוכל להתחיל לפתח טיפולים עבור הלקויות האלה.

פורסם אונליין: 22 באוקטובר 2020

נערך על ידי: Daniel F. Hermens, Sunshine Coast Mind and Neuroscience Thompson Institute, University of the Sunshine Coast, Australia

ציטוט: Broadhouse KM (2020) הפיזיקה של MRI וכיצד אנו משתמשים בה כדי לגלות את מסתרי המוח. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2019.00023-he

תורגם והותאם: Broadhouse KM (2019) The Physics of MRI and How We Use It to Reveal the Mysteries of the Mind. Front. Young Minds 7:23. doi: 10.3389/frym.2019.00023

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2019 © 2020 Broadhouse. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

MATTHEW FLINDERS ANGLICAN COLLEGE, גיל: 14-15

הסוקרים הצעירים של Matthew Flinders Anglican College הם מדענים ממולחים שנהנים לדבר על אתגרים. הם חבורה משתפת פעולה של מוחות צעירים, עם עניין משותף במדע, במוזיקה ובספורט. הסוקרים הצעירים האלה נהנים באופן עמוק להיות חלק מ-Frontiers for Young Minds ונרגשים להיות מעורבים באופן שבו המדע מתוקשר ומעוצב.



הכותבת

KATHRYN MARY BROADHOUSE

החלטתי שאני רוצה לחקור מדע ובפרט פיזיקה בתיכון מאחר שאהבתי ללמוד כיצד דברים פועלים וכיצד היקום פועל. כשהחלטתי על הקריירה שלי היה לי חשוב מאוד לעשות מה שאני אוהבת לעשות, אולם גם להרגיש שעבודתי בעלת משמעות ושהיא מסייעת לחברה. לכן החלטתי להתמחות בדימות רפואי מאחר שהתחום הזה משלב הרבה מהעקרונות היסודיים של פיזיקה במטרה לחקור ולהבין הפרעות ומחלות.

*kathryn.broadhouse@usc.edu.au

Hebrew version
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

