

דימות תהודה מגנטית

אלכס רפניק, מרכז מעבדות נוער, האוניברסיטה העברית, ירושלים, והמסלול האקדמי, מכללת אורט, ירושלים

תקציר

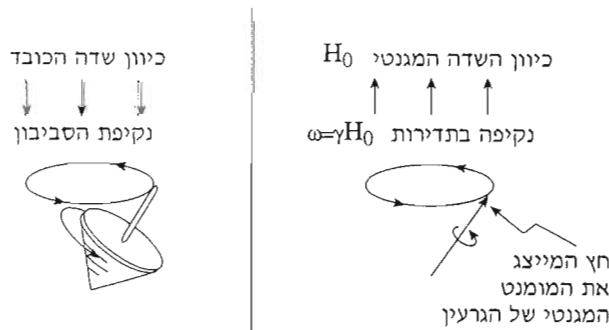
המאמר מתאר שיטת איבחון רפואית, "דימות תהודה מגנטית" (MRI), המאפשרת לקבל תמונות דימות מעולות של חתכי גוף ורקמות רכות. המאמר מתייחס לשיטת ההד הספיני, ומתאר מהם זמני תפוגה (רוחבי ואורכי), דימות באמצעות שדות מגנטיים משופעים (גרדיאנטיים), ונושאים חדשניים, כגון מדידת זרימה ודימות מטבוליטיים. לדעת הכותב ניתן, ברוח הגישה המתוארת במאמר, ללמד נושא זה בכיתות י"ב הלומדות בהדגשת פיסיקה, במסגרת פרק הבחירה "פיסיקה בשירות האיבחון הרפואי".

מילות מפתח

דימות, תהודה, תהודה מגנטית גרעינית, דימות תהודה מגנטית, הד ספיני, זמן תפוגה, איבחון רפואי.

דת"מ, מופעל עליו שדה מגנטי חזק, המסומן ב- H_0 . כתוצאה מכך מבצעים המומנטים המגנטיים הגרעיניים **תנועת נקיפה (פרצסיה)** סביב כיוון השדה המגנטי. באופן אנלוגי, סביבון הסובב סביב צירו מבצע אף הוא נקיפה. זוהי תנועת הסיבוב האטית של ציר הסיבוב של הסיבוב סביב עצמו, ביחס לאנך לרצפה, בנקודת המגע שלה עם חוד הסיבוב. תרשים 1 מציג את האנלוגיה שבין נקיפת סביבון הסובב סביב צירו בשדה כובד, לבין נקיפת הווקטור המייצג את המומנט המגנטי של גרעין האטום, השרוי בשדה מגנטי.

אחת משיטות האיבחון המבטיחות ביותר ברפואה כיום היא שיטת ה"דימות באמצעות תהודה מגנטית" (Magnetic Resonance Imaging), ובראשי תיבות, **דת"מ** (MRI). השיטה מתפתחת והולכת בקצב מהיר ויש הטוענים שזוהי ההתקדמות המשמעותית ביותר בתחום האיבחון הרפואי ב-20 השנים האחרונות. זאת למרות שבשנים אלה פותחו שיטות איבחון מעולות אחרות דוגמת טומוגרפיה ממוחשבת של קרני X (CT), דימות באמצעות גלים על-שמעיים (אולטרה סאונד), טומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים (PET), ואחרות.



תרשים 1: גרעין אטום המיומן (מימין) מבצע תנועת נקיפה מסביב לכיוון השדה המגנטי, בדומה לסיבובן (משמאל) המבצע תנועת נקיפה מסביב לכיוון שדה הכובד. היספין הגרעיני אנלוגי לסיבוב הסיבוב סביב צירו.

מטרת המאמר היא לנסות ולשכנע את הקורא כי ניתן ללמד דת"מ במסגרת פרק הבחירה "פיסיקה בשרות האיבחון הרפואי". דת"מ אינה מופיעה בספר הלימוד המשמש להוראת פרק בחירה זה⁽¹⁾. כותב המאמר מפנה את תשומת לב הקוראים לשני מאמריו המעולים של פרופ' זאב לוז שהופיעו בעיתון "מדע"⁽²⁾,⁽³⁾. החיסרון במאמרים אלו, בהקשר להוראת הנושא בבית הספר התיכון, הוא השימוש הרב במושגי מכניקת הקוואנטים, כגון פיצול רמות אנרגיה בשדה מגנטי. במאמר זה אציג את הנושא תוך שימוש מזערי במושגים החורגים מעבר לנלמד על-ידי תלמידי בית הספר התיכון, הלומדים בהדגשת הפיסיקה.

הד ספיני (Spin Echo)

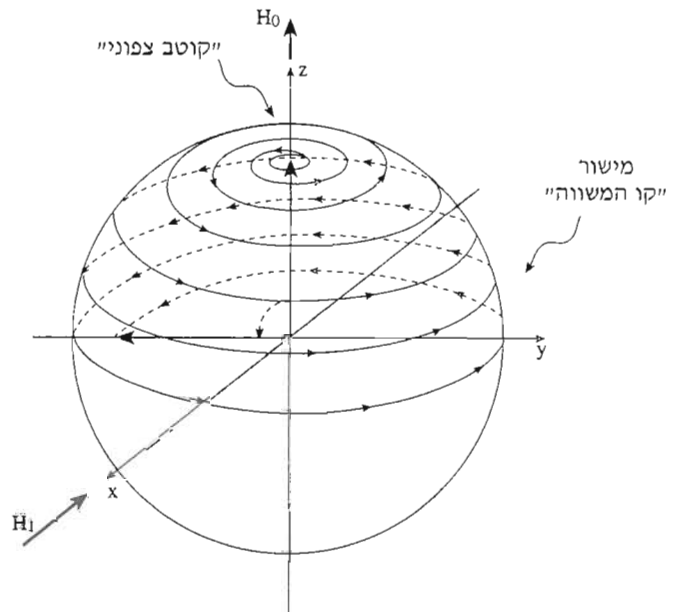
פעולתו של מכשיר הדימות מבוססת על היכולת לגרום לגרעיני אטומים מסויימים להיכנס למצב של **תהודה מגנטית גרעינית** ($NMR = Nuclear Magnetic Resonance$). לגרעינים אלה מומנט מגנטי, כלומר הם מתנהגים כמגנטים קטנטנים. כאלה הם, למשל, הגרעינים של אטומי המימן. כאשר מכניסים את ראשו של אדם, או את גופו, למכשיר

תדירות הנקיפה של המומנטים המגנטיים הגרעיניים קרויה "**תדירות לרמור**", שנסמנה באות ω . היא מתכונתית (פרופורציונית) לעוצמת השדה המגנטי H_0 . הקשר בין

תדירות לרמור לשדה המגנטי נתון על-ידי:

$$\omega = \gamma H_0$$

כאשר γ הוא קבוע, הנקרא "הקבוע הג'ירומגנטי". בשדה H_0 נתון, תתקבל תדירות לרמור מסויימת: זוהי "התדירות העצמית" של מערכת הגרעינים. אם נפעיל על מערכת זו שדה מגנטי נוסף, מאונך ל- H_0 , שעוצמתו משתנה באופן מחזורי בתדירות הקרובה לתדירות העצמית - מערכת הגרעינים תיכנס למצב של תהודה (רזוננס). למה הדבר דומה? לזמרת סופרן השוברת גביע ריק של יין בהשמעת צליל חזק מגרונה, שתדירותו כתדירות העצמית של הגביע (התדירות העצמית של גביע היין היא בתחום הסופרן, כפי שניתן לוודא על-ידי הקשה בכפית עליו).



תרשים 2: ווקטור המיגנט, המייצג את המומנט המגנטי הכולל, נע בתנועה סלילית (ספירלית) מכיוון "הקוטב הצפוני" (כיוון השדה המגנטי H_0) למישור "קו המשווה" - כתוצאה מהפעלת שדה מגנטי משתנה H_1 .

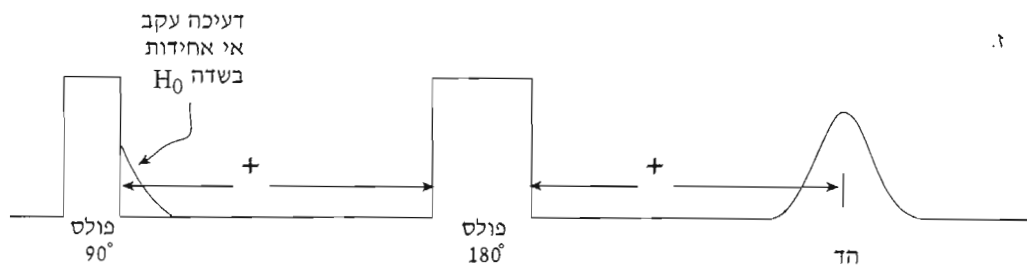
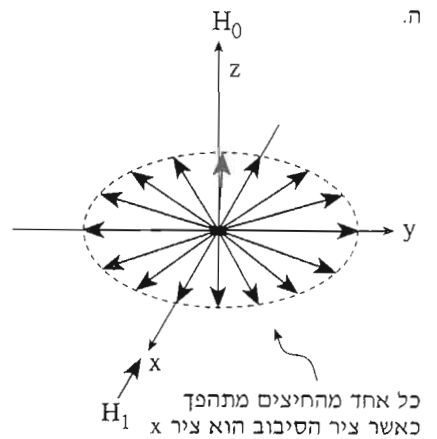
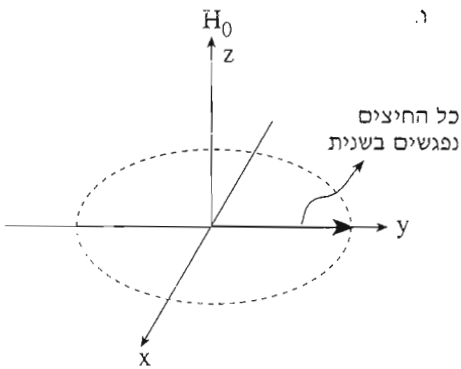
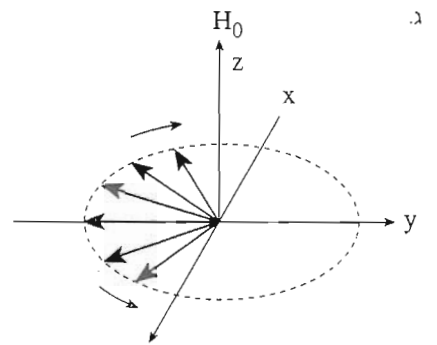
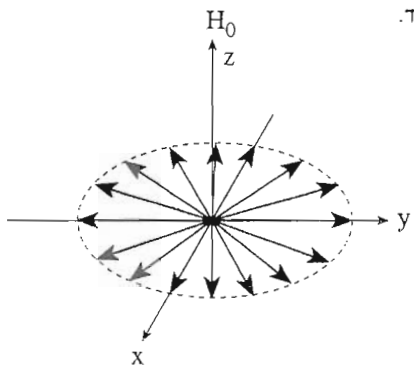
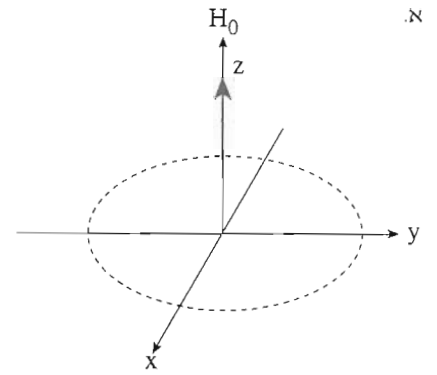
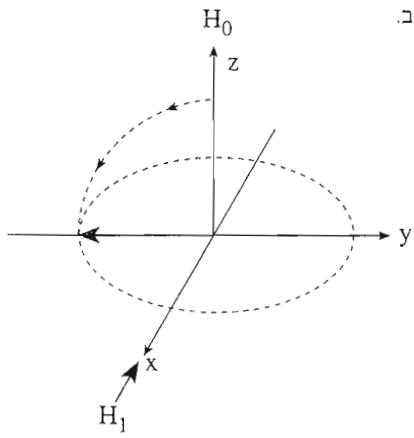
כאמור, נוהגים לסמן את כיוון המומנט המגנטי הגרעיני הזעיר בווקטור קטן. את המומנט המגנטי הכולל של מערכת כל הגרעינים מסמנים בווקטור גדול המסתובב סביב כיוון השדה המגנטי H_0 בתדירות לרמור. את השדה המגנטי המחזורי, הפועל במאונך ל- H_0 , מסמנים ב- H_1 . כשם שבגביע היין בולע, במצב תהודה, את אנרגיית גלי הקול שמשמיעה הזמרת, כך בולעת מערכת הגרעינים אנרגיה כתוצאה מפעולת השדה המגנטי המחזורי H_1 . בליעה זו מתוארת בתרשים 2 כתנועה הסלילית (ספיראלית) של המומנט

המגנטי הכולל מ"הקוטב הצפוני" למישור "קו המשווה". השדה המגנטי H_1 מופעל בפולס, במשך פרק זמן המאפשר את סטיית ווקטור המומנט המגנטי הכולל בכ- 90° ביחס למצבו המקורי. לכן, נאמר שהופעל "פולס 90° " על המומנט המגנטי הכולל.

כיצד יתנהג כעת המומנט המגנטי הכולל, לאחר ש"הושכב" למישור "קו המשווה" והשדה H_1 הופסק (תרשים 3 א' ו 3 ב')? לכאורה, צריך היה הווקטור להסתובב במישור "קו המשווה" בתדירות לרמור הנקבעת על-ידי H_0 . למעשה, עקב אי-אחידות (בלתי נמנעת) של H_0 , יהיה רצף מגוון של תדירויות לרמור, והמומנט המגנטי הכולל יתפרש כמניפה על פני מישור "קו המשווה" (תרשים 3 ג' ו ד'). אך ניתן לבטל פרישה זו בדרך הבאה: מפעילים על מערכת הגרעינים פולס נוסף של השדה H_1 , למשך פרק זמן המספיק להיפוך כל אחד מהווקטורים שבתרשים 3 ד', בזווית של 180° ביחס למיקומו הקודם (תרשים 3 ה'). מכאן ואילך מתרחש דבר-מה מעניין: אם חלף פרק זמן מסויים, t , בין הפעלת פולס ה- 90° להפעלת פולס ה- 180° , הרי שלאחר פרק זמן t זהה, כל ווקטורי המניפה ייפגשו בשנית (תרשים 3 ו').

למה הדבר דומה? נניח שרצים מתחרים בתחרות ריצה באיצטדיון, וכל אחד מהם שומר על מהירות אישית קבועה לאורך מסלול ריצתו. המזניק יורה את אות התחלת הריצה (פולס 90°) והרצים יוצאים לדרך. הואיל ומהירויותיהם שונות, תוך זמן קצר יתפרשו לאורך מסלול הריצה (באנלוגיה לפרישת ווקטור המיגנט הכולל במישור "קו המשווה" עקב תדירויות לרמור שונות, שמקורן באי אחידות השדה H_0). נניח שהוסכם לפני הריצה כי ברגע כלשהו, כשהמזניק יירה בשנית, (פולס 180°), כל אחד מהרצים יפנה לאחור וימשיך לרוץ באותה מהירות אך בכיוון הפוך. מובן שאם חלף פרק זמן t מהירי הראשון ועד הירי השני, הרי שכעבור פרק זמן t נוסף כל הרצים יפגשו בשנית.

אם נחזור למערכת הגרעינים, פגישתם המחודשת של המומנטים המגנטיים הפרושים במישור "קו המשווה" תגרום לכך שבליפופי הסליל המוליך שמסביב למערכת הגרעינים - שתפקידו הן להפיק את השדה המחזורי H_1 והן "לאסוף" מתחים חשמליים מושרים הנוצרים כתוצאה מהשפעת סיבוב ווקטור המיגנט הכולל עליו - יירשם אות חשמלי, מעין "הד" לפגישתם של המגנטים הגרעיניים (תרשים 3 ז'). לכן קרויה שיטה זו "הד ספיני" (spin echo).



תרשים 3: בהפעלה של פולס 90° , הווקטור המייצג את המומנט המגנטי הכולל הפונה ל"קוטב הצפוני" (א'), נע בזווית 90° אל "מישור קו המשווה" (ב'). כתוצאה מאי-אחידות השדה המגנטי H_0 הוא מתפרש על פני מישור זה (ג', ד'). בהפעלת פולס 180° בזמן t לאחר פולס ה- 90° כל ווקטורי המיגנט שבמישור "קוו המשווה" מתהפכים (ה'), ונפגשים בשנית (ו'), כעבור זמן t נוסף. התוצאה היא הד ספיני (ז'), המתרחש בזמן t לאחר תום פולס ה- 180° .

המילה "ספיין" מציינת את התנע הזוויתי הפנימי של הגרעין, שהוא מקור המומנט המגנטי שלו: הוא מתנהג כאילו הוא מבצע תנועת סחרור (ספיין) סביב עצמו.

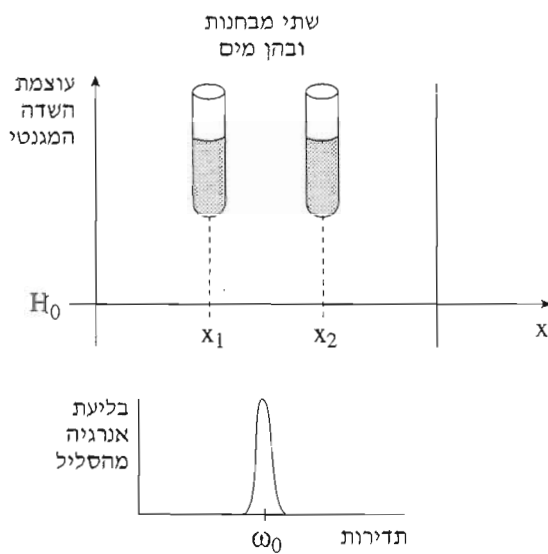
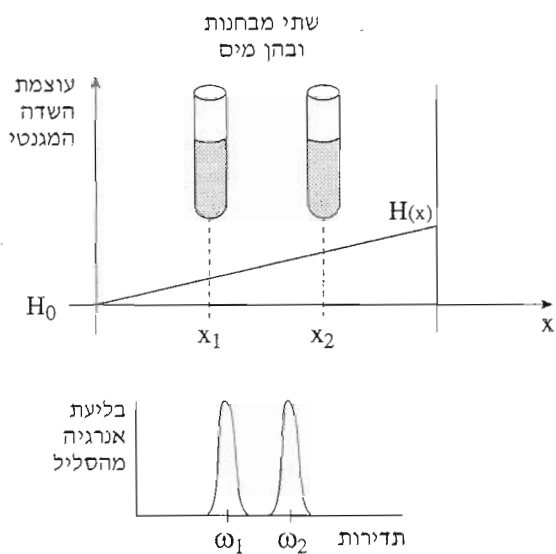
זמני תפוגה (Relaxation Times)

ההנחה הבסיסית במשל האינטרדיין שהובא לעיל, היא שמהירות כל אחד מהרצים קבועה במהלך ריצתו, ולכן יחס המהירויות בין כל שני רצים קבוע. אך מה יקרה אם במהלך הריצה מתעייפים הרצים, וכל אחד ניחן בקצב התעייפות המיוחד לו? במקרה זה יחס המהירויות בין כל שני רצים לא ישאר קבוע, והירי של המזניק לסימון היפוך כיוון הריצה, לא יגרום, כמקודם, להפגשת כל הרצים בשנית. הואיל והרצים מתעייפים במהלך הריצה, ככל שפרק הזמן בין התחלת הריצה והירי המסמן את היפוך כיוון הריצה גדול יותר - כך מספר הרצים שייפגשו כעבור פרק זמן דומה יהיה קטן יותר. והנמשל: ככל שפרק הזמן בין פולס 90° לפולס 180° ארוך יותר, כך גובה ההד הספיני יהיה קטן יותר. ירידת גובה ההד, כתלות במירווח הזמנים שבין שני הפולסים, מאופיינת על-ידי קבוע זמן, הקרוי "זמן תפוגה (רלקסציה) רוחבי", וסימונו T_2 . אם הוא גדול, פירוש הדבר שמירווח הזמן שבין שני הפולסים יכול להיות גדול, ובכל זאת יתקבל הד. הזמן נקרא "רוחבי" מפני שתנועת המומנטים המגנטיים הגרעיניים נעשית במישור "קו המשווה" של הכדור ססורטט בתרשים 2.

מקור זמן התפוגה T_2 הוא כוחות מגנטיים שבין הגרעינים לבין עצמם ושדות מגנטיים מקומיים: על כל גרעין יש השפעה, המשתנה בזמן, של שדות מגנטיים אלו. האנלוגיה לכך, במשל האינטרדיין, היא התעייפות הרצים. אך יש גם זמן תפוגה אחר: ככל שמתמשכת הריצה באינטרדיין, יותר ויותר רצים "נשברים" ופורשים מהמסלול. לכן, ככל שפרק הזמן בין הירי המסמן את פתיחת הריצה לירי המסמן את היפוך כיוון הריצה גדול יותר - כך יפגשו פחות רצים לאחר הירי השני. ובנמשלנו: ככל שפרק הזמן בין פולס 90° לפולס 180° גדול יותר כך יחזרו יותר מומנטים מגנטיים גרעיניים לכיוון "הקוטב הצפוני" (תרשים 2) ופחות מהם יישארו מופנים במישור "קו המשווה", ויתרמו ליצירת הד ספיני. הזמן המאפיין את חזרת הגרעינים ממישור "קו המשווה" ל"קוטב הצפוני" קרוי "זמן תפוגה אורכי" וסימונו T_1 . ככל ש- T_1 גדול יותר, כך קטנה יותר נטיית הגרעינים לחזור לכיוון השדה המגנטי H_0 . משתמשים בזמני התפוגה T_1 ו- T_2 כדי לקבל את תמונות הדימות, כפי שיפורט להלן.

דימות באמצעות תהודה מגנטית

שיטת ה-ד"ת"מ הומצאה ב-1973 על-ידי האמריקני פול לאוטרבור (Lauterbur), ונסבירה להלן: אם נכניס מבחנה ובה מים אל תוך שדה מגנטי H_0 , גרעינים של אטומי המימן שבמים יסתחררו סביב H_0 בתדירות לרמור שנסמנה ω_0 .



תרשים 4: א' תדירות לרמור של גרעיני המימן בשתי המבחנות בשדה המגנטי H_0 היא ω_0 . ב': מוסיפים על H_0 שדה מגנטי נוסף $H(x)$, התלוי ב- x הואיל והשדה הכולל אינו קבוע, תדירות לרמור של גרעיני המימן במבחנה שב- x_1 היא ω_1 , ושל הגרעינים במבחנה שב- x_2 היא ω_2 .

ממשעות הדבר היא שבאמצעות מדידת תדירויות התהודה המגנטית הגרעינית של הגרעינים של אטומי המימן בשתי המבחנות ניתן לקבל "תרשים", במובן זה, שנדע את מיקומן לאורך הציר x (תרשים 4 ב'). אם נפעיל שני שדות מגנטיים, שעוצמתם תלויה בשני צירים מאונכים $(y-x)$, נוכל למקם, בתנאים מסויימים, את המבחנות ב"תרשים" במישור. תמונות הדימות של גוף האדם נעשות בדרך הבאה (תרשים 5): מכניסים את האדם (ראשו, גופו או כל איבר אחר) לחלל גילי שמסביבו סלילים נושאי זרם העשויים מחומר מוליך-על. קירור סלילים אלו לטמפרטורה נמוכה מאוד (כ- 270°C מתחת לאפס), מאפשרת הזרמת זרם גבוה מאוד, וכך משיגים שדה H_0 חזק. (כיום מדובר ב- $4T$, ואף יותר). כיוון השדה H_0 שבתרשים 5 הוא לאורך גוף האדם. כמו כן מופעלים שדות $H(x)$ ו- $H(y)$ המשתנים לאורך שני צירים רוחביים מאונכים $(y-x)$ בחלל שאליו מוכנס האדם.

וההיפך: אם נכניס מבחנה מלאה במים לשדה מגנטי שעוצמתו אינה ידועה ונמדוד את תדירות התהודה ω_0 , הרי שנוכל לחשב את H_0 . אם נכניס לאזור השדה המגנטי שתי מבחנות מים (תרשים 4 א') תדירות התהודה, ω_0 , של הגרעינים בשתי המבחנות תהיה שווה. אך מה יקרה אם בנוסף ל- H_0 נפעיל שדה מגנטי $H(x)$, שעוצמתו תלויה במיקום x , שבין סלילי האלקטרומגנט (תרשים 4 ב')? נקבל שתי תדירויות תהודה שונות, ω_1 ו- ω_2 , בהתאם לעוצמתו הכוללת של השדה המגנטי במקום בו מצויה כל אחת מהן. אם נכניס את שתי המבחנות לתחום השדה המגנטי, מבלי לדעת היכן הן נמצאות, נוכל לחשב את מיקומן מידיעת תדירויות התהודה ω_1 ו- ω_2 . זאת בתנאי שנדע את H_0 ואת ערכו של $H(x)$ כפונקציה של x , המיקום בין סלילי האלקטרומגנט.



תרשים 5: תצלום מתקן דת"מ של "אלסינט"
 תצלום זה מתפרסם באדיבותה של חברת "אלסינט".



תרשים 6: תמונות דתי"מ של חתכים דרך מוח אדם.

תנועה מסויימת של הנבדק תוך כדי הבדיקה. לאחרונה פותחה שיטה הנקראת "הז ספיני מהיר" (FASE = Fast Spin Echo), שבה נאסף המידע תוך כ-30 שניות ומתקבלת תמונה בעלת כושר הפרדה מעולה.

מדידות זרימה

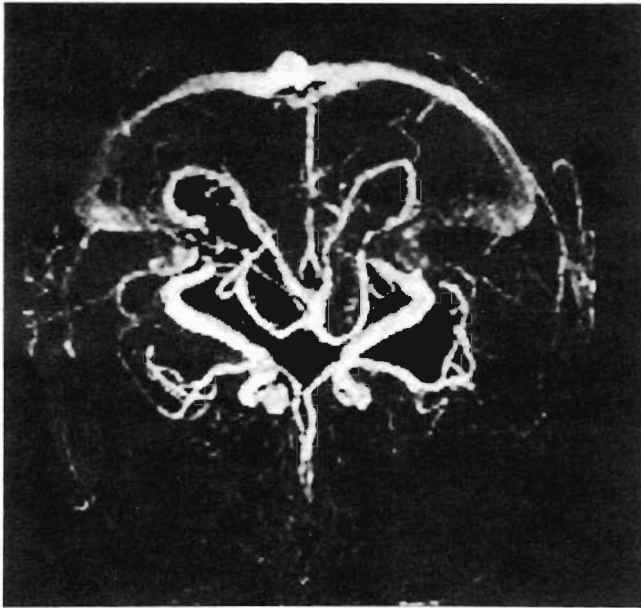
אחת ההתפתחויות החשובות ביותר של טכניקת ה-דתי"מ בשנים האחרונות היא **מדידת זרימה בכלי הדם**. מדידה כזאת, הקרויה **אנגיוגרפיה**, נעשית בדרך כלל על-ידי הזרקת חומר ניגודי (קונטרסטי) לגוף, הבולע היטב קרינת רנטגן, והקרנת האיבר החולה בקרני רנטגן על לוח צילום.

סלילים מגנטיים אחרים מפעילים את H_1 : שדה מגנטי מחזורי, המשתנה בזמן ומאונך בכיוונו ל- H_0 . משכי ההפעלה של H_1 קובעים אם מופעל "פולס 90° " או "פולס 180° ". H_1 מופעל על "פרוסה" דקה מאוד של גוף האדם. ניתוח אוסף התדירויות המתקבלות כ"הדים" מסביב לפרוסה זו, ועיבודן הממוחשב, מאפשר קבלת תמונת דימות של אותה פרוסה. ניתן אף לקבל תמונת דימות תלת-ממדית אם חוזרים על אותה פעולה על פרוסות גוף רבות, הסמוכות זו לזו, ומצרפים את המידע שהתקבל מכל אחת מהן.

כאשר דפקי השדה H_1 מופעלים בשיטת ההד הספיני, ניתן לקבל תמונות ניגודיות (קונטרסטיות) מעולות, תוך ניתוח זמני התפוגה, T_1 ו- T_2 , המאפיינים סוגים שונים של רקמות. הניגודיות שבתמונות מאפשרת להבחין בין רקמות רכות שונות - בין קליפת המוח והאזורים הסמוכים לה, לדוגמה. זאת מפני שרקמות שונות אלו נבדלות בזמני התפוגה שלהן. גם גידולים סרטניים הם בעלי זמני תפוגה שונים מאשר רקמות נורמליות, וכך ניתן, בשיטה זו, להבחין בגידולים אלו ולזהות אותם.

בהרכבתן הממוחשבת של תמונות הדימות משתמשים, בנוסף ל- T_1 ו- T_2 , במידע המתקבל משלושה גורמים נוספים הנבדלים ברקמות שונות: הצפיפות השונה של גרעיני האטומים, השפעת הסביבה הכימית על גרעינים זהים (למשל, גרעיני מימן המצויים במקומות שונים במולקולה "חשים" שדות מגנטיים שונים), וזרימת הנוזלים שבגוף.

תמונות ה-דתי"מ שמקבלים כיום בבתי חולים מפתיעות באיכותן (תרשים 6). התמונות, הן הדו-ממדיות והן התלת-ממדיות, הן כה טובות עד שהן מאפשרות למנתח לתכנן בדרך המיטבית את שיטת הניתוח והנתיב שבו, לדוגמה, יבחר להגיע לגידול הסרטני, כדי לסלקו. מדענים אמריקנים פיתחו זרוע רובוטית המכוונת את מכשירי הניתוח על-פי הקואורדינטות המתקבלות מתצלומי דתי"מ תלת-ממדיים. מדענים באוניברסיטת קליפורניה, בדיוויס, מפתחים רובוט לביצוע חיתוך ממשי על-פי נתוני ה-דתי"מ (שם המכשיר: רובודוק...). ניתן לאבחן בשיטת ה-דתי"מ מחלות מוח, דוגמת אלצהיימר, טרשת נפוצה והידרופלוס. עד לא מזמן, כדי לקבל תמונות דתי"מ באיכות טובה הפעילו הרופאים על הנבדק שדות מגנטיים משך פרק זמן שבין 5 ל-10 דקות - שבו אספו את שלל המידע המגנטי המתגלם בספקטרום תדירויות לרמור ובזמני התפוגה. פרק הזמן הארוך יחסית הוריד את חדות התרשים, הואיל ואי אפשר היה למנוע



תרשים 7: תמונת דת"מ של זרימת דם בכלי הדם הגדולים שבראש.

אותן חשוב לבדוק חומרים אחרים (וליתר דיוק, איזוטופים מסויימים של חומרים אחרים, שאף גרעיניהם מתנהגים כמגנטים קטנטנים): זרחן (P^{31}) פחמן (C^{13}), נתרן (Na^{23}), ברזל (Fe^{57}) ורבים אחרים. ניתן כיום לקבל תמונות דימות המתקבלות מגרעינים אלו, אף כי כושר ההפרדה שלהן נמוך בהרבה מזה של תמונות הדימות המתקבלות מגרעיני מימן. תמונות דימות שנעשו בדרך זו מבטיחות מאוד מפני ששיטת ה-דת"מ יכולה לשמש מעין "מצלמה ביוכימית", המציגה תמונה מירבית של חומרים ותהליכים באיבר הנבדק, בתלות בזמן. אם ניטול, לדוגמה, חומר בעל חשיבות מכרעת במטבוליזם כ-ATP, ובו זרחן-31, ניתן, בעיקרון, לבצע תמונות דימות של פיזורו בחתכי גוף שונים. לסיכום, דימות באמצעות תהודה מגנטית הופך, בהדרגה, לאחת מן השיטות החשובות בענף האיבחון הרפואי. כלי חשוב נוסף ניתן בידי הרופאים, במאבקם היומיומי על בריאותו של החולה.

רשימת ספרות

1. רונן, מ., "הפיסיקה בשירות האיבחון הרפואי", המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, 1989.
2. לוז ז., "תהודה מגנטית גרעינית", "מדע", י"ד/3, 189-183, 1969.
3. לוז, ז., "דימות אדם בעזרת תהודה מגנטית גרעינית", "מדע", כ"ח/2, 69-62, 1984.
4. פלטיאל, צ., "דימות תהודה מגנטית גרעינית", פי האטום ג'-4, עמ' 16-4, 1987.

שלמי תודה

אנו מודים לפרופ' גמרי מנהל מחלקת MRI בהדסה עין כרם על התצלומים שבתרשימים 6 ו-7.

תהודה

במקום בו זרימת הדם לקויה יש הצטברות גדולה יחסית של חומר זה, ומתקבל בתצלום כתם שניתן לזיהוי. בשיטת דת"מ, המבוססת על זמן התפוגה T_1 , מפעילים פולס של 90° של שדה מגנטי משתנה, H_1 , על פרוסה דקיקה של רקמה, ובה כלי דם. אחר כך, בודקים את מיגנוט גרעיני המימן שבדם הזורם, במישור מקביל, מרוחק מעט, שלא ספג את הפולס. מתוך ידיעת זמן התפוגה T_1 והמרחק שבין שני המישורים, ניתן לחשב באיזו מהירות זרם ביניהם הדם. שיטה זו טובה במיוחד לכלי דם גדולים. בשיטה אנגיוגרפית נוספת, מודדים את גובה ההד הספיני שנוצר לאחר הפעלת דפקי 90° ו- 180° , כשבין הפולסים הללו מפעילים שני פולסים נוספים, הפוכים זה לזה אך שווים בעוצמתם (מבחינת השפעתם על המיגנוט הכולל של המערכת הזורמת - הגרעינים של אטומי המימן המצויים במולקולות המים שבדם). אילו לא היה הדם זורם, שני הפולסים ההפוכים היו מקזזים זה את זה ולא היתה מתגלית כל השפעה שלהם על גובה ההד הספיני המתקבל לאחר פולס ה- 180° . הואיל והדם זורם, מערכת הגרעינים (הזורמת) מצויה בשדות מגנטיים השונים בעוצמתם זה מזה בעת שמופעלים עליה שני הפולסים ההפוכים. מסיבה זו שני הפולסים ההפוכים אינם מקזזים לגמרי זה את זה, פחות מגנטיים גרעיניים נפגשים לאחר פולס ה- 180° , וההד הספיני יהיה נמוך יותר. מתוך גובה ההד הספיני ניתן לחשב את מהירות זרימת הדם (תרשים 7). בדרך דומה ניתן לערוך מדידות של זרימת דם בנימים, על-ידי הזרקת חומר ניגודי בעל השפעה על זמני התפוגה T_1 או T_2 , ומעקב אחר קצב השתנות זמני התפוגה באזורים סמוכים. כמו כן ניתן לבצע מדידות של מהירות הפיעפוע של נוזלים ברקמות ולקבל ניגודיות של תחומים שבהם מהירות הפיעפוע שונה ביחס לסביבתם. ייתכנו מצבים שבהם יכולים מים, למשל, להימצא בשני מצבים: במצב בו מולקולות המים "קשורות" לרקמה, ובמצב שבו הן "חופשיות". הדבר מתבטא בשתי תדירויות לרמור שונות של גרעיני המימן. ניתן לבצע עירור ברני (סלקטיבי) של גרעיני המימן שבמולקולות המים הקשורות בלבד, על-ידי הפעלת שדה מגנטי משתנה בתדירות אחת, ובדיקה של מהירות הפיעפוע של מולקולות אלו למצב שבו הן אינן "קשורות".

דימות מטבוליטים

עיקר הבדיקות בעזרת דימות שבוצעו עד כה נעשו על הגרעינים של אטומי מימן המצויים במים, או בתרכובות אחרות, דוגמת ליפידים. אולם יש מחלות רבות שכדי לאבחן