

אתה, הסלולרי, והאמונה התפלה.

לב הבעיה אינו בכך שאנשים אלו
מפתחים פנטזיות פרימיטיביות אלא
שאינם עושים מאמצים כלשהם לתקנם
באמצעות כושר ההבחנה שבו הם
מתגאים כל כך; ושלנוכח סכנה אינם
נוקטים בדרך הרציונלית של בירור
העובדות...

(רוברט קונקווסט, הרהורים על מאה
רבת מכאוב)

לאחרונה אנו עדים להתפשטות של פחד מטלפונים סלולריים. הפגנות סוערות ושריפת אנשנות ברחובות משתלבות עם נסיונות חקיקה היסטוריים בידי פוליטיקאים תאבי פרסום, כאשר מן הצד השני עומדת עוצמתן הכספית של חברות הסלולר. זמן רב אני מסתובב בהרגשה של "העולם השתגע" ביחס לעניין זה, ונדמה לי שלא יזיק לנסות להבהיר מעט את המצב.

כבר כמה שנים אני מנסה להסביר לסטודנטים הלומדים פיסיקה והנדסה מדוע אין לפחד מקרינה של מכשירי סלולר (כמו גם מקרינת מיקרוגל, קרינה מחוטי חשמל וכדומה) ותמיד אני נשאל בסופו של דבר "האם אתה יכול להוכיח כי קרינת הסלולרי אינה מזיקה?" ובכן, התשובה היא לא. אינני יכול להוכיח שקרינה כזו אינה מזיקה. אינני יודע גם להוכיח כי אכילת שתי עגבניות ליום איננה גורמת לאלצהיימר, כי עודף אהבה לתינוקות לא גורם ללוקמיה או כי כתמי השמש אינם גורמים לקרחת. העולם מלא וגדוש בתופעות שאיננו מבינים אותן על בורין, וסביר להניח כי בעתיד יתגלו קשרים בין תופעות הנראות לנו זרות לחלוטין. אבל בכל זאת איש מאתנו לא חושש לאכול עגבניות ולא מתחבא בבית כשיש כתמי שמש. אנו נוהגים, בחיי היום יום שלנו, להישמר ממצבים שיש לנו סיבה לחשוש מהם, אם בגלל ניסיון אישי (להרגיז את הבוס) ואם בגלל אזהרות מצד חוקרים שבדקו את העניין (עישון). ובכן: זהו נושא המאמר שלפניכם. מה שאנסה להסביר הוא מדוע שימוש בטלפון סלולרי ואכילת עגבניות הם זהים: אין סיבה ידועה או סבירה להשמר מהם. בהמשך אציע כיוון נוסף: אפילו אם נניח כי ישנה סכנה בקרינה הסלולרית, הצעדים הננקטים כדי "להשמר" ממנה הם מוטעים בתכלית. בכתיבה לקהל שאינו מדעי נאלצתי לפשט מעט כמה נקודות, אך עם זאת דומני כי שמרתי על עיקרי הנקודות הרלוונטיות.

מנין החלה ההיסטוריה הציבורית? דומה שהכל החל מן ה"עובדה" הידועה לכל לפיה קרינה גורמת לסרטן. כל ילד בחברה שלנו שומע סיפורי בלהה על מחלות מסתוריות שקטלו את נפגעי הפצצה האטומית בהירושימה ובנגסקי ועל עליה מדהימה בתחלואת הסרטן כתוצאה מאסון צ'רנוביל, על ילדים מעוותים שנולדו אחר שנים רבות לקרבנות האומללים וכדומה. אמנם אנו מבינים כי קרינת הסלולרי שלנו אינה שקולה בעצמתה למה שפולטת פצצה גרעינית, אבל בכל זאת, דבר כל כך מסוכן, בלתי נראה, בלתי מורגש... כדאי להיזהר, לא?

אז זהו, שלא. יש מידה של אמת בסיפורי הפצצה הגרעינית והכורים (אם כי הגזמה רבה גם בהם), אלא שאין להשליך מסוג הקרינה שהם פולטים על הקרינה של המכשיר הסלולרי. כדי להסביר את ההבדל עלינו להציג, קודם כל, כמה עובדות בסיסיות הנוגעות לקרינה אלקטרומגנטית.

אם נרשה לעצמנו לחטוא בהפשטת יתר (תוך שמירת הפרטים הרלוונטיים), קרינה חשמלית היא שדה חשמלי המשתנה בזמן. מהו שדה חשמלי? ובכן, זהו מושג מסובך, לכן הבה ניצמד להמחשה פשוטה: אילו היית יכול לתלות אלקטרון (חלקיק זעיר הטעון במטען חשמלי) על חוט ולצפות בתנועתו, היית מגלה כי כאשר עובר באזור גל אלקטרומגנטי (לדוגמה, כאשר מכשיר הסלולר שלך מתחיל לשדר) האלקטרון

מתחיל לנוע מעלה מטה (או ימינה-שמאלה) בקצב מסוים, כמו ילד על נדנדה. **הקצב** בו מבצע האלקטרון את התנודה הזו מכונה **תדר**, והוא המאפיין החשוב של הקרינה.

נניח שאתה מנדנד ילד קטן על נדנדה, כמה זמן עובר בין דחיפה לדחיפה (כלומר כמה זמן עובר עד שהנדנדה חוזרת לשיא הגובה)? אם מדובר, נאמר, על שניה אחת אזי תדר הנדנוד הוא **הרץ** (Hz) אחד. אם מדובר על שלש שניות למחזור שלם התדר הוא שליש הרץ, ואם הנדנדה חוזרת כל חצי שניה לאותו מקום יהיה התדר שני הרץ. **התדר הוא מספר מחזורי התנודה השלמים בשניה אחת**. יש? נהדר. זה כל מה שיש לדעת כדי להמשיך.

נניח, כעת, שתלינו אלקטרון על חוט ליד אחד מחוטי החשמל של חברת חשמל. האלקטרון יתחיל להתנדנד על החוט, אבל הנדנוד יהיה מהיר למדי: הוא ישלים חמישים מחזורי תנודה כל שניה! הפיסיקאי או המהנדס יאמרו כי חוטי החשמל פולטים קרינה בתדר של חמישים הרץ.

את הקרינה הזו שפולטים חוטי החשמל איננו יכולים לראות, להבדיל מן הקרינה שפולטים פנסי המכונית או השמש. זאת מפני שכדי "לראות" את הקרינה לא מספיק שהיא תהיה קיימת: אנו צריכים גם איזה שהוא קולטן, או גלאי, בגופנו שיזהה את הקרינה וישלח סיגנל חשמלי למוח, כך שהאינפורמציה תגיע אלינו. קולטנים אלו נמצאים בתוך עינינו, אבל הם מגיבים רק לקרינה אלקטרומגנטית בתחום תדרים מסוים המכונה, כמובן, **אור נראה**. ביחס לקרינה מחוטי החשמל תדר האור הנראה הוא גבוה ביותר, בערך 10^{15} הרץ. אילו היינו תולים אלקטרון על חוט וחושפים אותו לאור נראה היה האלקטרון מבצע 10^{15} (אלף מיליוני מיליונים) תנודות לשניה.

נשמע הרבה? לא ממש. מכשיר הרנטגן של הרופא שלך מספק קרינה בתדר 10^{18} הרץ (כלומר פי אלף יותר מאור נראה) ואילו מפצצה גרעינית נפלטת קרינה (שמקובל לכנות אותה קרינת גמא) בתדר שיכול להגיע ל 10^{23} הרץ, פי מאה אלף מקרינת הרנטגן.

ומה כל זה מועיל לענייננו? מועיל מאד, מפני שכאן המקום להסביר מדוע קרינה גורמת נזק ביולוגי. בכל תא בגופנו מצויה מולקולה הנקראת DNA, שרשרת ארוכה מאד של צירופי אטומים, בה "רשומות" הוראות ההרכבה והתפעול של הגוף. בכל תא מתנהלת פעילות של "קריאת" הוראות התפעול הללו ופעולה לפיהן. אם, לדוגמה, מדובר בתא עור, יכול ה DNA בתנאים מסוימים לפקוד על התא להתחלק לשני תאים. כך אנו מצליחים להצמיח עור חדש המכסה על פצעים, למשל. מכאן מובן כי פגם במולקולת ה DNA עלול להיות הרה אסון: בין היתר, אם מנגנון הבקרה על פעילות התא "מתקלקל" הוא עלול לשגר פקודות התחלקות ללא מעצור, התא מתחלק ומתחלק ויוצר גוש תאים הגדל עד שהוא פוגע בגוף כולו. זהו **גידול סרטני**.

הנה לב העניין: קרינה עלולה לגרום להתמרה סרטנית **אם** היא מסוגלת לחדור לתוך הגוף, לפגוע במולקולות שבתוך התא ולגרום לשינוי הצופן הגנטי. זה עלול להיות המצב אם הקרינה מסוגלת "לתלוש" אלקטרון מאטום או ממולקולה (אטום כזה שחסר לו אלקטרון נקרא יון, והפעולה נקראת יינון). "תלישה" כזו יוצרת שינוי של מבנה המולקולה, שינוי שעלול, בסיכוי מסוים, לחבל בתקינותה של מולקולת ה DNA ולשנות את הצופן הגנטי. זהו המנגנון המוכר בו קרינה גורמת ל**מוטאציות** (שינוי הקוד הגנטי) בתאים חיים, מוטאציות שחלק מהן מסרטנות. קרינה העלולה לתלוש אלקטרון מאטום או ממולקולה נקראת **קרינה מייננת**.

בתחילת המאה העשרים גילה אינשטיין כי **יכולתה של קרינה ליינן אטום או מולקולה תלויה אך ורק בתדר ולא בעוצמת הקרינה**. שוב: לא משנה מהי עוצמת הקרינה, אם התדר לא מתאים לא יהיה יינון. אם פנס פולט אור לא מיינן, לא ייתלשו אלקטרונים מן האטום, וגם אם תביא עשרה או מאה פנסים כאלו זה לא ישנה את המצב: האלקטרון לא יגיב. רק קרינה **בתדר מסוים ומעלה** גורמת ליינון האטום (כלומר היא קרינה מייננת). קרינה בתדר נמוך מדי לא מייננת גם אם היא נפלטת בעוצמות ענקיות. התדר הבעייתי בו מתחילים לראות נזקים ביולוגיים כתוצאה מיינון כזה הוא בערך 10^{16} הרץ, קצת "מעל" האור הנראה. לתדר הזה קוראים "אולטרה סגול", והוא עלול לגרום לסרטן של תאי העור (לא באיברים פנימיים יותר כי קרינה בתדר הזה נבלעת בעור ואינה חודרת לעומק הגוף). תדרים גבוהים יותר

(כמו קרינת רנטגן או קרינת גמא הנפלטת בתהליכים גרעיניים) מסוכנים הרבה יותר וחודרים גם דרך הגוף.

ואיפה הסוללרי והמיקרוגל בעניין? אהה, הגענו. תדרי השידור של מכשירי סלולר ומיקרוגל הם באזור 10^{10} הרץ, **נמוכים פי מליון** מן התדרים המתאימים לקרינה מייננת. קרינתם של מכשירים אלו היא קרינה **לא מייננת**, הם לא מסוגלים לתלוש אלקטרון מאטום, הם לא מסוגלים לשנות את הצופן הגנטי, הם לא יכולים לגרום בדרך זו לסרטן. זהו. על קרינה מחוטי חשמל ואפילו מחוטי מתח גבוה אין בכלל מה לדבר בהקשר הזה. התדר כה נמוך שחבל על הזמן.

מה **כן** עלולה לעשות קרינה לא מייננת? היא אכן עלולה לחמם, כפי שנוכח לדעת כל מי שדיבר שעה ארוכה בטלפון או מי שהכניס את חתול המחמד שלו למיקרוגל. חימום כזה אכן עלול לגרום נזק (שאל את החתול...) פשוט מפני שהוא "מבשל" את הרקמה. לכן באמת לא כדאי להיכנס למיקרוגל פועל, כפי שלא כדאי להכניס את הראש לתוך קונוס השידור של מכשיר רדאר המשדר בעוצמות אדירות (כאן, בקטע של החימום, קובעת יותר העוצמה ופחות התדר). ניתן אכן להאמין כי דיבור ממושך בטלפון סלולרי מעלה את סמפרטורת הרקמות הסמוכות לאוזן באיזה שבר של מעלה. נו, האם אתה מאמין שזה מסוכן??

אני חוזר למה שכתבתי בפתיחה: אין לי הוכחות שליליות. אולי חימום בעשירית המעלה למשך שעה ביום גורם לסרטן, אולי גירוד של אוזן שמאל ביד ימין גורם לפרקינסון, אולי שלש התעטשויות ברצף מוליכות לנפילת הממשלה. אולי כן ואולי לא. אדם סביר והגיוני אמור לבנות את ספקטרום החששות שלו בצורה רציונלית, אבל מה שקרה בעניין הקרינה הלא מייננת הוא בפירוש לא רציונלי. הציבור, ששמע כי קרינה = פצצת אטום = סרטן, השליך את פחדיו על סוגי קרינה שאינם קשורים כלל לעניין. כמובן, לאחר שעלה החשש הצטרפו למשחק כל מוכי פובית הטכנולוגיה, חובבי הקונספירציות בגרוש ופוליטיקאים המחפשים הד ציבורי (לא שאני מתלונן, בשביל זה אנו משלמים להם, אבל בנושא הספציפי הזה הם גורמים נזק). כמובן שמהר מאד נוצר תת ציבור המתפרנס מן העניין, מסוכנים "מדלת לדלת" המציעים בדיקות שהקונה לא מבין את תוצאותיהם ועד צבא פקידים מתקיני תקנים. מורי ורבותי, הכל חרטא. אם היו ממציאים מלה נפרדת עבור קרינה מייננת ועבור קרינה לא מייננת לא היה איש בעולם חושש מסוללרי, ממיקרוגל או מרדיו.

ולסיום, הפרדוקס בהתגלמותו. הבה נניח לצורך העניין כי הקרינה הסוללרית אכן מסוכנת. איך גורמים להקטנת החשיפה אליה? מה שאנשים עושים בימים האחרונים הוא לשרוף אנטנות. זה רציונלי??

לא ולא, כמובן. את קרינת הסוללרי אתה "סופג" משני מקורות: מן האנטנות ומן המכשיר שאתה מדבר בו. ההבדל פשוט: מן האנטנות אתה **קולט**, המכשיר שבידך **משדר**. עצמת השידור היא הרבה יותר גבוהה מן העצמה הנקלטת: בלי צורך בהבנה לעומק, עצמת הקרינה נמדדת ביחידות של וואט. מכשיר הסוללרי שלך צריך לשדר חזק, כדי להיקלט באנטנה: עצמתו היא בערך וואט אחד, ובערך חצי מן הקרינה הזו חולפת דרך ראשך. לעומת זאת, אפילו אם תעמוד במרחק שני מטר מן האנטנה, תעבור דרך ראשך באופן טיפוסי **פחות מאלפית** מן הקרינה שהיא פולטת, ובמרחק עשרה מטרים מדובר כבר על אחד למאה אלף¹. מי שחושש מקרינת הסוללרי צריך להיות מעוניין בפריסה רחבה ככל האפשר של אנטנות, מפני שזו תאפשר למכשירים הסוללריים לשדר בעצמות יותר קטנות (האנטנות יהיו יותר קרובות) בעוד הקרינה מן האנטנות היא זניחה לגמרי בכל המקרים המציאותיים. במקום זה לוחצים על חברות הסוללר להרחיק את האנטנות, מה שיגרום למכשירים לשדר בעצמות יותר גבוהות ויגדיל את חשיפת המשתמשים!! אכן, העולם ירד מן הפסים.

¹ המספרים האלו הם רק על מנת לשבר את האוזן, ובנויים על הנחת פיזור אחיד של הקרינה. הפיזור אינו אחיד מסיבות שונות, ולכן יש כאן הגזמה קלה, אבל סדרי הגודל הם נכונים. הקרינה שתקבל מאנטנה קטנה לאין שיעור מקרינת המכשיר הסוללרי עצמו.