



הנויטרינו החמקמק – אורח מכוכב אחר*

חיים הררי, נשיא מכון ויצמן למדע, רחובות

תקציר: הנויטרינו הוא "חלקיק בלתי מתקבל על הדעת". הוא יכול לחלוף מבעד לכדור הארץ מבלי לחוש במציאותו כלל. אף שקיומו הוצע עוד לפני שנתגלו הנויטרונים, מעט מאד ידוע עליו, אבל ברור שיש לו חשיבות ראשונה במעלה בהתפתחות הכוכבים והיווצרות היסודות הכימיים, ואולי אף בעתיד היקום כולו.

שנזרק כלפי מעלה שב ונופל ארצה, או אולי הוא ימשיך להתפשט לעד, בקצב קטן והולך, כמו טיל שנזרק במהירות גדולה מספיק בכדי לצאת מתחום השפעתו של כדור הארץ? איננו יודעים את התשובה על כך, אבל נוכל לדעת אותה, אם נדע כמה חומר יש ביקום, כמה הוא "שוקל". אם יש מספיק חומר ביקום, אז המשיכה חזקה מספיק בכדי לבלום את ההתפשטות כליל, ובסופו של דבר היקום ישוב ויקרוס, ואולי אף יסתיים במעין אנטי-התפוצצות, שבה כל החומר ייבלע בחזרה בתוך אותה נקודת בראשית שממנה התחיל. יקום שכזה נקרא **יקום סגור**, כי גודלו הוא סופי. אבל אם אין ביקום מספיק חומר, אזי המשיכה לא תספיק לעצירת ההתפשטות. יקום כזה קרוי **יקום פתוח**, שכן הוא גדל בלי סוף. רוב הפיסיקאים מאמינים שהיקום לא יתפשט לעד וגם לא יקרוס, אלא שההתפשטות תקטן בהדרגה, עד שתיעצר כליל. ואם המצב הוא אכן כזה - אפשר לחשב ולדעת כמה חומר יש ביקום. מצד שני, אנחנו רואים את כל הכוכבים והגלקסיות וכל מה שניתן לראות בטלסקופים וברדיו-טלסקופים ושאר האמצעים המשוכללים שהאדם הצליח להמציא, ומעריכים בעזרתם את כמות החומר הנראה. ואז מתברר דבר מדהים - כל הכוכבים והגלקסיות ושאר החומר הנראה לעין מהווים אחוזים בודדים בלבד מהכמות הכללית המחושבת של החומר שאמור להיות ביקום, בהנחה שהוא מצוי במצב הגבולי בין יקום פתוח לסגור. למעלה מתשעים אחוזים מהחומר ביקום בלתי נראה לעין. הוא בגדר מסתורין ואיש אינו יודע מהו. קיימות רק השערות שונות ומשונות ביחס לטיבו. רוב החומר ביקום הוא אפל ואיננו יודעים מהו.

זהו סיפורו של חלקיק. אולי החלקיק המוזר ביותר, המשונה ביותר, חסר התועלת ביותר במובן מסוים, והחשוב ביותר במובן אחר - שקיים ביקום - ה**נויטרינו**. הנויטרינו הוא החלקיק החמקמק ביותר שקיים. אי אפשר לראותו, אי אפשר לחוש בו, וכמעט שאי אפשר לגלות אותו. חקר הנויטרינו מלמד אותנו על השמש ועל הכוכבים, על תולדות היקום ובריאתו במפץ הגדול, על מבנה החומר ועל הכוחות היסודיים של הטבע. ואת כל אלה אנחנו מצליחים ללמוד תוך כדי ניסיונות לגלות חלקיק חמקמק ביותר - ניסיונות שאינם מצליחים. זהו, אולי, תחום המדע שבו כמות המידע שמשיגים על-ידי כך **שלא רואים** משהו, היא הגדולה ביותר. סיפורו של הנויטרינו קושר בין עולמם של היצורים הקטנטנים ביותר, אותם תת-חלקיקים שבתוך הגרעין שבתוך האטום שמרכיב את החומר לבין המבנים הגדולים ביותר ביקום, בריאת היקום והתפשטותו.

בראשית - עד כמה שידוע לנו - היה **המפץ הגדול**, הפיצוץ הנקודתי, שכתוצאה ממנו מתפשט היקום עד עצם היום הזה, וכל החומר בו בורח מאותה נקודת התחלה החוצה, לכל עבר. אבל כל החומר ביקום - הכוכבים, הערפיליות, הגלקסיות וכל השאר - כמויות אדירות של חומר - מושכים אלה את אלה בכוח הכובד הפועל ביניהם. הכבידה מעכבת ובולמת אט-אט את ההתפשטות הבלתי פוסקת הזו, ממש כשם שכדור שנזרק כלפי מעלה נבלם בהדרגה על-ידי כוח הכובד של כדור הארץ.

נשאלת השאלה, האם בזמן כלשהו בעתיד התפשטות היקום תיעצר לחלוטין, והוא יתחיל להתכווץ, ממש כשם שכדור

* המאמר הינו עיבוד של הרצאת הזיכרון לפרופ. אהרון קציר ז"ל, שניתנה על-ידי פרופ' חיים הררי באוניברסיטת ת"א ביום 19.3.1996. המאמר מופיע ב"גלילאו", גליון 30, ספט/אוקט 1998. תודתנו נתונה לפרופסור הררי ולמערכת "גלילאו" על הרשות לפרסם מאמר זה כאן.

הבישול הגרעיני הגדול

דבר זה התחיל להתברר לנו רק בעשור האחרון. לעומת זאת, הגענו להבנה טובה למדי של המפץ הגדול ושל התפשטות היקום. אנו יודעים, פחות או יותר, איך נוצרו הגלקסיות, איך נוצרו הכוכבים ואיך נוצרו היסודות הכימיים. בהתחלה היה כל החומר ביקום מימן - היסוד הפשוט ביותר. שאר היסודות המוכרים לנו "התבשלו" בלב הכוכבים. תולדות חייו של כוכב, כל כוכב שהוא, מתחילות בהיותו מורכב בעיקר מהיסוד הקל והפשוט ביותר - המימן. בשל הטמפרטורות הגבוהות השוררות בתוכו, המימן "מתבשל" בסדרה של תהליכים גרעיניים, שבהם גרעיני המימן מתרכבים אלו עם אלו ויוצרים גרעינים של יסודות מורכבים וכבדים יותר ויותר - תחילה הליום, אחר-כך פחמן, חמצן וכן הלאה. כוכב כזה הופך להיות מעין "בבושקה", הבובה הרוסית, שבתוכה עוד בובה ועוד בובה. בכוכב יש כדור בתוך כדור בתוך כדור, כאשר הכדור הפנימי ביותר עשוי מהחומר הכבד ביותר, למשל ברזל, ומסביבו יש קליפות הבנויות מיסודות קלים יותר ויותר - מגזיזים, חמצן, פחמן, הליום ולבסוף הקליפה החיצונית שעשויה ממימן.

במקרים מסוימים, כל המסה האדירה הזאת, ובעיקר זו שבכדור הפנימי והכבד ביותר, גדולה עד כדי כך, שכוח הכבידה האדיר שנוצר במרכזה גורם לחומר בלב הכוכב לקרוס. תהליך זה משחרר כמות כה אדירה של אנרגיה, עד שמתחוללת התפוצצות אדירה, שמעיפה את כל החומר לכל עבר בעוצמה בלתי נתפשת ממש. תהליך כזה נקרא התפוצצות של **סופרנובה**, והוא קורה מדי פעם ביקום.

ויהי אור

לפני 170,000 שנה, כאשר על פני כדור הארץ האדם חי עדיין במערות, התפוצצה סופרנובה בגלקסיה שכנה לגלקסיה שלנו (שביל החלב) - גלקסיה המכונה "הענן המגלני הגדול". החומר בלב הכוכב דחוס מאוד. לכן כשהחלקיקים במרכז מקבלים פתאום אנרגיה רבה מהפיצוץ, הם מתחילים "לרוץ" ולהיתקל בחלקיקים אחרים; כל חלקיק פוגע בחלקיק אחר ודוחף אותו. אך בשל הצפיפות הרבה, מעבר האנרגיה של ההתפוצצות מהמרכז החוצה מתעכב. אבל בין כל החלקיקים שנוצרים בהתפוצצות, יש גם חלקיק מסוג מסתורי וחמקמק, שיכול לעבור דרך כל דבר בלי הפרעה. הוא עובר דרך הגוף שלי ודרך השולחן, דרך הקירות ודרך כל כדור הארץ, דרך השמש ואפילו דרך כל הכוכב המתפוצץ. דבר לא יכול לעצור אותו;

הכל כאילו שקוף עבורו. הוא חודר דרך חומר, ממש כשם שקרן אור חודרת דרך חלון זכוכית שקוף, רק שבמקום לעבור דרך חלון זכוכית בעובי כמה מילימטרים, הוא יכול לעבור דרך מיליוני ומיליארדי קילומטרים של חומר צפוף. החלקיק הזה הוא הנויטרינו.

בהתפוצצות של סופרנובה נוצרות כמויות אדירות של חלקיקי נויטרינו, שמתפזרים לכל עבר בלי הפרעה ובמהירות הגדולה ביותר, מהירות האור, או קרוב למהירות זו. ולכן הדבר הראשון שקרה באותה סופרנובה לפני 170,000 שנה הוא, שחלקיקי הנויטרינו נפלטו מן הכוכב. שאר החלקיקים שנוצרו בהתפוצצות הזאת, ולא יכלו לעבור בקלות כה רבה דרך החומר, התנהגו כמו קהל שנדחק לדלת במקרה אסון; הם דחפו את החלקיקים שלפניהם ויצרו גל הדף, שהתפשט בלב הכוכב. הראשונים שבהם הצליחו להגיע אל פניו של הכוכב רק כעבור כמה שעות. רק אז יכול היה צופה שהתבונן בכוכב מבחוץ לראות שקרתה התפוצצות, שהרי עד אותו רגע כל ההתפוצצות התרחשה בלב הכוכב, מבלי שמשוהו ייפלט החוצה. רק לאחר כשלוש שעות, כשהגיעה כל המהומה הזאת לשפתו של הכוכב, הוא "נדלק" בבת אחת, הפך למעין כדור אש והתחיל לפלוט חלקיקי אור, פוטונים, בכל הכיוונים בכמויות כה גדולות, שאנו - על פני כדור הארץ (כעבור 170,000 שנה) יכולנו לראותם בעין, אפילו בלי טלסקופ, ובקלות רבה בטלסקופ חובבים פשוט. כשלוש שעות לאחר שחלקיקי הנויטרינו יצאו לדרך, החלו הפוטונים לדלוק אחריהם במהירות האור. כל זאת אירע במרחק של מיליארד מיליארדי (10¹⁸) קילומטרים מכדור הארץ, ומתוך כל השטף האדיר של החלקיקים שעפו במידה שווה לכל הכיוונים, רק חלק זעיר היה מכוון, במקרה, לעבר כדור הארץ. קל לעשות את החשבון; כל מה שצריך לדעת לשם כך הם קוטרו של כדור הארץ ומרחקו מן הכוכב. מהחישוב מסתבר שרק אחד מכל 10²⁹ חלקיקים שנפלטו פגע בכדור הארץ. תוכלו לדמיין זאת בעיני רוחכם כמין מרוץ מטורף, שבו דבוקה של חלקיקים חמקמקים, בלתי נראים לעין, חלקיקי הנויטרינו, רצה כבר קרוב ל- 170,000 שנה, וכל אותו הזמן, בפיגור של שלוש שעות, דולקים אחריהם הפוטונים. אם הם נעים בדיוק באותה מהירות, הפער ביניהם נשמר כל הזמן. ולעומת חלקיקי הנויטרינו שנעים בדבוקה אחת יחידה, יש רצף של פוטונים, כי הכוכב המשיך "לבעור ולבעור" ולפלוט אור. כך היה בימי מתושלח וכך בזמן המבול ובתקופת דוד המלך.

בינתיים התקדמה ההיסטוריה האנושית והגיעה לשנת 1895. כלומר, 99.95% מהדרך ומהזמן כבר עברו. רק אז, בסוף המאה ה-19, התחילה האנושות לגלות את צפונותיו של האטום.

מי גנב את האנרגיה החסרה?

ב-1895 גילה הצרפתי הנרי בקרל (Becquerel) את התופעה שנקראה התפרקות רדיואקטיבית ביתא.

לפני כן היה ידוע רק, שכל החומר מורכב מאטומים, שהם מעין כדורים זעירים, שכנראה אינם ניתנים לחלוקה. בקרל גילה שלעיתים אטום מסוגל לפלוט מתוכו חלקיק בעל מטען חשמלי, שתחילה קראו לו חלקיק ביתא. לאחר גילוי האלקטרון ב-1897 התברר כי חלקיק ביתא אינו אלא אלקטרון, ועל-ידי פליטת אלקטרון, האטום הופך לאטום אחר.

חלפו עוד 20 שנה עד שנחשפו קרביו של האטום והתגלה שהוא מורכב מגרעין קטן, ומסביבו מתרוצצים אלקטרונים במסלולים מוגדרים. והנה התברר דבר מוזר באמת: האלקטרון שנפלט בהתפרקות ביתא, יוצא מן המקום היחיד באטום שאין בו אלקטרונים כלל - מן הגרעין! אכן מוזר מאוד, אבל זה בדיוק מה שגילה ארנסט רתרפורד (Rutherford) ב-1911. לאחר הגילוי הועלתה בין השאר גם השאלה מהי המהירות שבה נפלט האלקטרון הזה. זהו חישוב פשוט ביותר: נתון אטום במנוחה, שמתפרק פתאום לשתי חתיכות - האלקטרון ושארית האטום. באמצעות חוק שימור האנרגיה וחוק שימור התנע מתקבלות שתי משוואות עם שני נעלמים - המהירות הסופית של האלקטרון וזו של האטום - שיש להן פתרון אחד ויחיד. כלומר, גם אם יבוצעו אלף מדידות של התפרקות ביתא, אמורה להיות לאלקטרון תמיד אותה מהירות (ואנרגיה). אולם במדידות שנעשו במהלך שנות ה-20 התברר שלא דוברים ולא יער. אלף פעמים חזרו על הניסוי, ובכל פעם הייתה לאלקטרון אנרגיה שונה. ולא זו בלבד, אלא שתמיד האנרגיה שלו הייתה קטנה מהצפוי על פי החישוב התיאורטי, לעיתים בכמה אחוזים, ולעיתים היוותה רק עשירית מהצפוי.

דבר זה היה כה מרעיש, כה בלתי צפוי, עד שאפילו פיסיקאי דגול כנילס בוהר (Bohr) התפתה להציע השערה "פרועה", שחוק שימור האנרגיה והתנע פשוט לא מתקיימים בתהליך זה. לאיש לא היה הסבר יותר טוב, עד שבא אחד מגדולי המדענים של התקופה, וולפגנג פאולי (Pauli) והציע פתרון פשוט ואלגנטי. בהתפרקות ביתא, אמר פאולי, נפלט מגרעין האטום לא רק אלקטרון, אלא גם חלקיק נוסף, חמקמק ובלתי

נראה, חסר מסה, שאף כוח לא פועל עליו, ולכן הוא עובר בקלות דרך כל חומר. החלקיק הזה (שכעבור זמן הציע אנריקו פרמי לכנותו נויטרينو, דהיינו - נויטרון קטן) "גונב" חלק מהאנרגיה. ומכיוון שהאטום מתפרק לשלושה חלקיקים, יש לנו שתי משוואות עם שלושה נעלמים. למערכת הזאת אין פתרון יחיד, אלא אינסוף פתרונות אפשריים. כך הצליח פאולי להסביר גם כיצד אנרגיית האלקטרון קטנה מהצפוי וגם מדוע היא שונה מניסוי לניסוי. ההסבר הזה נשמע מין "הוקוס פוקוס" לא רציני. האם בכל פעם שניסיון לא יתאים לתיאוריה נמצא חלקיק שאי אפשר לגלות בשום מכשיר? זה לא נשמע כמו מדע. הרי המבחן האמיתי של תיאוריה מדעית הוא בניסוי שמאשר או מפריד אותה. איך יכול אדם, ועוד אחד מגדולי המדענים בהיסטוריה, אחד הספקנים והביקורתיים שבכולם, לבוא ולהציג תיאוריה מדעית שאי אפשר לבדוק כלל? ובכל זאת רוב המדענים האמינו לסיפור הזה, פשוט מפני שלא נמצא שום הסבר טוב יותר לתעלומה. הם קיבלו אותו כהשערה מתקבלת על הדעת, אם כי איש לא העלה על דעתו בשנות ה-30 וה-40 שום דרך מעשית לגילוי הנויטרינו. היום, אגב, ידוע שרק אחד מכל 10 מיליארדי (10^{10}) חלקיקי נויטרינו שעוברים דרך כל כדור הארץ, מקוטב לקוטב, ייתקל באחד מהאטומים של כדור הארץ. זאת אומרת, כאשר 10 מיליארדים של חלקיקים עוברים דרך כל המסה העצומה של כדור הארץ, רק אחד ייתקל באטום כלשהו, אי שם בדרך בין אוסטרליה לתל-אביב, או בהרי ההימלאיה, וגם זה עדיין לא מבטיח שנגלה אותו במכשירי המדידה.

ואם לא די בכך, הרי הנויטרינו הוא חלקיק קל מאוד, אולי בכלל אין לו מסה. (דבר זה לא ברור עד היום; ידוע רק שהנויטרינו קל פי 70,000, לפחות, מן האלקטרון - החלקיק הקל ביותר שאינו חסר מסה. איך אפשר ללכוד דבר כזה?! בינתיים מתקדמת הפיסיקה שלב נוסף, ומתברר לנו מה קורה בתוך גרעין האטום. ב-1932 מגלה ג'יימס צ'דוויק (Chadwick) את הנויטרון. כלומר, מתברר שגרעין האטום מורכב מחלקיקים קטנים יותר, הפרוטונים והנויטרונים, ש"דבוקים" זה לזה בכוח רב - הכוח הגרעיני החזק. ואז מתגלה גם, שהאלקטרון הנפלט בהתפרקות רדיואקטיבית ביתא נפלט לא סתם מן האטום, כפי שידעו תחילה, ולא סתם מגרעין האטום, כפי שהבינו אחר כך, אלא מאחד הנויטרונים שבגרעין האטום.

אם כן, על פי התסריט המעודכן, אחד הנויטרונים בגרעין פולט אלקטרון ונויטרינו, וכיוון שהנויטרון והנויטרינו

נייטרליים מבחינה חשמלית (כפי שמעידים שמותיהם), והאלקטרון הוא בעל מטען שלילי, החלקיק שנתר הוא בעל מטען חיובי - הפרוטון. וכאן, בפעם הראשונה בהיסטוריה התבררה חשיבותו של החלקיק ה"תמהוני" הזה. פתאום הובן, שהדרך היחידה שבה נייטרון יכול להפוך לפרוטון היא על-ידי פליטה של אלקטרון ונייטרין.

לדבר הזה חשיבות עצומה, כי כך נוצר כל החומר הרגיל¹ ביקום. בתהליך ה"בישול" של גרעיני המימן והפיתתם לגרעיני הליום ובכל שאר התהליכים הגרעיניים שמתקיימים בלב הכוכבים, הופכים פרוטונים לנייטרונים ולהפך. דבר זה יכול לקרות אך ורק על-ידי בליעה או פליטה של נייטרין. פתאום מתברר לנו, שהחלקיק החמקמק והאזוטרי הזה קשור בתהליך שבונה חלק ניכר מהחומר שביקום, ואחראי ליצירת כוכבים ולהתפוצצות כוכבים. זהו מין "חומר דלק", אמנם בלתי נראה וחמקמק, אך בעל תפקיד מאוד חשוב בבישול החומר ביקום.

ריינס, לוכד הנייטרין

באותו זמן בערך, התחוללה מלחמת העולם השנייה. מדענים אמריקאים מצליחים במאמץ מדעי וטכנולוגי כביר לפתח נשק גרעיני; לאחר המלחמה פותחו הכורים הגרעיניים. בכור גרעיני, כמו גם בפצצה גרעינית, נפלטים הרבה נייטרונים, וכל נייטרון שנפלט מתפרק במוקדם או במאוחר, תוך פליטת נייטרין. פיתוח הנשק הגרעיני והכורים הגרעיניים יצר כבדרך אגב בית-חרושת מאסיבי ביותר לנייטרונים ובעקבותיהם גם לחלקיקי נייטרין. פתאום התקבל מקור לכמויות אדירות של חלקיקי נייטרין, כמו אלה שנוצרים בפיצוץ בליבו של כוכב, אך באופן מבוקר, מעשה ידי אדם.

הראשון שהצליח ללכוד חלקיקי נייטרין היה פיסיקאי בשם פרד ריינס (Reines), שאף קיבל על כך את פרס נובל לפיסיקה לשנת 1995; הוא, אגב, קרוב של הרב ריינס, שעל שמו נקרא רחוב בתל-אביב. ריינס הבין שפצצת גרעין היא מקור לשטף כה אדיר של חלקיקי נייטרין, עד שאם ישים מכשיר גילוי מתאים בקרבתה, יש סיכוי טוב שאחד מתוך מיליארדי מיליארדים של חלקיקי נייטרין שיעברו דרך המכשיר יגיב עם איזושהו אטום, וכך יתאפשר, סוף-סוף, לתפוס אחד ולהוכיח באמצעותו את קיומו של הנייטרין. הוא תכנן ניסוי שמבוסס על פיזור גלאים בקרבת מקום הפיצוץ של פצצת גרעין. היה לו רק כשל קטן בתכנון: כששמים גלאים בקרבה

1. החומר שממנו בנויים כל הכוכבים וכוכבי הלכת, ובכלל זה כל מגוון החומרים המוכרים לנו בכדור הארץ.

כזאת למקום הפיצוץ, גם הגלאים מתרסקים ומתאדים... לעומת זאת, לערוך ניסוי דומה בקרבתו של כור גרעיני - זה כבר רעיון בר-ביצוע. אומנם, יש שם הרבה פחות חלקיקי נייטרין מאשר בפצצה גרעינית, אך כמות חלקיקי הנייטרין הנפלטים עדיין אדירה. וכשריינס הצליח להשיג כסף ויכולת טכנית לבנות גלאי בגודל של חדר קטן (דבר שבזמנו נחשב לפרוייקט עצום), הוא מיקם גלאי כזה בקרבת כור גרעיני פעיל. החישובים הראו שתוך שנתיים-שלוש הגלאי עשוי ללכוד כמה חלקיקי נייטרין מתוך השטף האדיר שנפלט מהכור ועובר דרכו.

ואכן, ב-1956, 25 שנים אחרי שפאולי העלה את השערת הנייטרין החמקמק, גילו ריינס ושותפו קלייד קוואן (Cowan) לראשונה את עקבותיו של הנייטרין. הם גילו מספר קטן של חלקיקי נייטרין, שכל אחד מהם פגע בגרעין של אטום כלשהו, הגיב עם אחד הנייטרונים שלו, וגרם לפליטת אלקטרון מתוכו. למעשה, מה שהשניים ראו היה לא הנייטרין, אלא האלקטרון, והחוכמה הייתה לא סתם לגלות את האלקטרון, אלא לוודא שמקורו בנייטרין ולא באלף ואחד גורמים אפשריים אחרים. זאת הייתה המומחיות שלהם, אותה שיכללו לכדי אמנות. וכל אותו זמן - כזכור - חלקיקי הנייטרין, ואחריהם הפוטונים, מן הסופרנובה, הולכים וקרבים לכדור הארץ, מבלי שאיש ידע כלל על קיומם.

חמשת אלפים טון מים במכרה

באותו זמן, בערך, התארגנו ביפן ובארה"ב שתי קבוצות של מדענים, שלא התעניינו במיוחד בחלקיקי נייטרין או באסטרופיסיקה. הם בנו שני מתקנים, שכל אחד מהם הכיל 5,000 טון מים וגלאים שונים, שמאפשרים להם להבחין בכל פעם שאלקטרון כלשהו נפלט החוצה מאחד האטומים. מטרתם לא הייתה זיהוי של נייטרין. הם רצו לדעת האם הפרוטון מתפרק. הפרוטון נחשב לחלקיק היציב ביותר, אך לא ברור האם הוא יציב לחלוטין, או שהוא מתפרק - כפי שמנבאים חלק מהתאורטיקנים - לעתים נדירות. שני המתקנים הללו נועדו לבדוק זאת. שניהם מוקמו במכרות תת-קרקעיים עמוקים, כך שכל הקרינה הקוסמית שמגיעה לכדור הארץ מהחלל החיצון תיבלע באדמה מעל אזור הניסוי בלי להגיע לגלאים ולהפריע למדידות. דבר זה מבטיח, שכל חלקיק שגיע לגלאי "נולד" בהכרח בתוך המכרה. וכך יושבות שתי קבוצות מחקר בחושך מוחלט, עמוק מתחת לאדמה, ובכל פעם שבמקום כלשהו בתוך חמשת אלפי טונות המים

נפלט אלקטרון מאחד האטומים, הוא מחולל גל אור זעור באחד הגלאים שמתריע על כך. כאשר מתגלה אלקטרון כזה, ייתכן שהוא נולד מהתפרקות של פרוטון. הניסוי פעל במשך מספר שנים, אולם שום דבר לא נתגלה. כמובן, המדענים עצמם אינם יושבים במכרה בזמן הניסוי; התוצאות נרשמות בזיכרון של מחשב הניסוי, והמדענים באים מדי פעם רק לבדוק את תקינות הציוד, וכך נמשך הניסוי שנים רבות. ב-23 בפברואר 1987, ב-07:35 בבוקר לפי שעון גריניץ', הגיעו סוף-סוף חלקיקי הנויטרינו שיצאו לדרך לפני 170,000 שנה לכדור הארץ, וכיוון שהם נעו במהירות האור, או קרוב מאד לכך, הם הגיעו למעשה בזמן ולארצה"ב. מספרם היה אדיר וחלקם עברו דרך כדור הארץ כולו. כזכור, רק אחד מכל 10^{29} חלקיקים שיצאו לדרך הגיע לכדור הארץ. אבל כמות החלקיקים שיצאו לדרך הייתה גדולה כל כך, שלמרות זאת הגיעו לכדור הארץ הרבה מאוד חלקיקי נויטרינו, ומתוכם הגיעו רבים למכרה היפני ורבים אחרים הגיעו למכרה האמריקאי. וכמובן, רובם עברו דרך המכרות על 5,000 טון המים שבתוכם מבלי שיקרה דבר, כי הנויטרינו הוא, כאמור, חמקמק. בכל זאת, 11 חלקיקי נויטרינו פגעו במשהו במכרה היפני ובו בזמן פגעו 8 חלקיקי נויטרינו אחרים במשהו במכרה האמריקאי, כל זאת תוך 2-3 שניות. הכל טוב ויפה, אלא שאף אחד לא ידע על כך, כי בחוף המזרחי של ארה"ב הייתה השעה 02:35 לפנות בוקר, ואיש לא נמצא במקום. ביפן כבר היה יום שני אחר-הצהרים, אבל מי כבר נמצא במכרה? רק המחשבים שפיקחו על הניסוי ורשמו תוצאות.

כוכב נולד

כעבור 3 שעות, עדיין שעת לילה באמריקה, הגיעו הפוטונים לכדור הארץ. כלומר, נולד בשמיים כוכב חדש. האור מההתפוצצות האדירה שהתחוללה לפני 170,000 שנה הגיע לבסוף לארץ. במצפה הכוכבים הגדול שבצ'ילה, שממוקם על ראש ההר, ישב באותה שעת לילה בחור צעיר בשם יאן שלטון (Shelton) והסתכל מבעד לטלסקופ. פתאום הוא הבחין בכוכב חדש בשמים, כוכב שלא היה שם כמה שעות קודם לכן - סופרנובה! ולמה זה קרה דווקא בצ'ילה? מפני שגלקסיית הענן המגלני, ובה הסופרנובה, נראית רק בחצי הדרומי של כדור הארץ. לחלקיקי נויטרינו אין זה משנה כלל, שהרי הם עוברים דרך כל כדור הארץ כאילו היה שקוף, אבל הפוטונים אינם יכולים לעשות זאת. דרך אגב, שני אסטרונומים חובבים

נוספים, אחד באוסטרליה ואחד בניו-זילנד, גילו גם הם את הסופרנובה, אפילו בלי שנעזרו בטלסקופ! בעולם האסטרונומיה הייתה התרגשות גדולה מן הגילוי, והידעיה על גילוי הסופרנובה הופצה במהירות לכל רחבי העולם. אף אחד לא ידע עדיין, ששלוש שעות קודם לכן הגיעו חלקיקי נויטרינו למכרות ביפן ובארה"ב.

כעבור כמה שעות הגיעה השמועה גם לפיזיקאים מומחים לנויטרינו שהבינו, שאם התגלתה סופרנובה, היו צריכים להגיע קצת קודם לכן גם חלקיקי נויטרינו. הם מיהרו לחשב כמה חלקיקי נויטרינו היו צריכים לצאת, וכמה מתוכם להגיע לכדור הארץ, וכמה מהם למכרות ביפן ובארה"ב, ומתוך אלה - כמה צריכים לפגוע במשהו, חישוב לא מסובך במיוחד, ומצאו שעשרה חלקיקי נויטרינו, בערך, היו צריכים לחולל תגובה במכרה ביפן, ומספר דומה - בארה"ב. עד מהרה הגיעו פניות מכל רחבי העולם לצוותים ביפן ובארה"ב לבדוק אם נרשמו אצלם אירועים מיוחדים כמה שעות קודם לכן. היפנים גילו בהתרגשות אדירה שאכן, אחרי שנים שלא קרה דבר, אף פרוטון לא התפרק, נרשמו לפתע, תוך שנייה אחת, 11 אירועים, וברור שהם יכלו להגיע רק מאותה סופרנובה. כעבור כמה שעות גילו זאת גם האמריקאים. למעשה, היה להם מזל אדיר, מפני שיום קודם רבע מהגלאי שלהם יצא מכלל שימוש בשל נתק חשמלי. אילו קרה הקלקול באמצע השבוע, הם היו משביתים את המכשיר ל-24 שעות, מתקנים אותו ומפעילים אותו מחדש, שהרי מה יעלה או יוריד יום אחד, כשמחכים כבר 50 שנה להתפרקות הפרוטון? מאחר שהתקלה קרתה ביום ראשון, יום המנוחה, הם גילו אותה רק ביום שני בבוקר וכיבו את המכשיר רק לאחר שחלקיקי הנויטרינו הגיעו והשאירו את רישומם על המכשירים. דרך אגב, העובדה שרבע גלאי לא פעל הייתה גם הסיבה לכך שנמדדו שם רק 8 חלקיקי נויטרינו, ולא 10 או 11 חלקיקים.

אם חלקיקי הנויטרינו אכן מקורם בסופרנובה, הם היו צריכים להגיע ליפן ולארה"ב בדיוק באותה שנייה. היפנים והאמריקאים התבקשו לבדוק זאת. ומה התברר? היפנים, שמייצרים את מרבית השעונים בעולם, לא הציבו שעון מדויק במערכת הניסוי! הם לא טרחו לשים שעון מדויק, מפני שאם הבעיה שלך היא למדוד האם הפרוטון מתפרק פעם במיליון שנים או לא, מה איכפת לך אם הוא יתפרק ב-07:30 או ב-07:31? לכן כל מה שהמדענים הצליחו לוודא הוא, שחלקיקי הנויטרינו הגיעו ליפן ולארה"ב באותה דקה, ולמרות שאין ספק שהדבר קרה באותה שנייה ממש, אין לכך ראייה וודאית וישירה.

מתוצאות הניסויים בשני המכרות עלו מייד כמה מסקנות: קודם לכן לא היה ידוע האם הנויטרינו הוא חלקיק יציב או נוטה להתפרק. מאחר שהוא עבר 170,000 שנות-אור מבלי להתפרק, ברור שהוא לא כל-כך נוטה להתפרק... אפשר להסיק גם שמסתו קטנה מאוד, מעצם העובדה שכל חלקיקי הנויטרינו הגיעו לגלאים (לכל גלאי בנפרד) תוך שנייה או שתיים, וכן מהעובדה שפער הזמן בין חלקיקי הנויטרינו לפוטונים נותר בערך שלוש שעות גם לאחר מסע של 170,000 שנה. אם לנויטרינו יש מסה השווה לאפס, הוא חייב לנוע במהירות האור, כמו כל חלקיק אחר שמסתו אפס. במקרה זה פער הזמן בין חלקיקי האור לחלקיקי הנויטרינו שהיה שלוש שעות בזמן התפוצצות הסופרנובה לפני 170,000 שנה, יישאר שלוש שעות גם בהגיעם לכדור הארץ, כי מהירותם זהה. אם לנויטרינו מהירות שאינה בדיוק מהירות האור, אלא היא קרובה לה מאוד-מאוד, ייתכן שיש לו מסה זעירה, שאינה בדיוק אפס, אלא קרובה מאוד מאוד לאפס.

אבל כל זה חשוב פחות מן העובדה שבמקום כלשהו במעמקי האדמה הצליחו מדענים "להתבונן" בקרביו של כוכב מתפוצץ באמצעות היצור החודר-כל הזה, הנויטרינו. מדובר לא בהסתכלות על פניו של הכוכב, אלא במה שקורה **בלב** הכוכב: והמוזר הוא שבשביל לדעת מה קורה בליבו של הכוכב, צריך להעמיק שני קילומטרים מתחת לאדמה... שימו לב כמה שיחק המזל באירוע הזה. לו הייתה הסופרנובה מרוחקת פי שלושה, כבר לא היינו רואים חלקיקי נויטרינו כלל, כי מספר חלקיקי הנויטרינו שמגיעים אלינו קטן לפי ריבוע המרחק, ואז היה נמדד אולי נייטרינו אחד ביפן ואחד בארה"ב, ובשום אופן לא היינו בטוחים שקרה כאן משהו אמיתי. שלא לדבר על כך שאירוע שחל לפני 170,000 שנה "מצא לנכון" להגיע לכדור הארץ בדיוק ב"חלון" הזמן שבו ישבו מדענים במכרה ומדדו משהו אחר לחלוטין בציוד דומה להפליא. איזה צירוף מקרים!

המשפחה המורחבת של האלקטרון

במקביל קרו בפיסיקה עוד כמה דברים הקשורים לענייננו: בשנות ה-30 התברר שלאלקטרון הוותיק, שממנו נולדה כל האלקטרוניקה הסובבת אותנו, יש אח - אח מוזר ומיסתורי שנקרא **מיואון**. המיואון כבד פי 200 מן האלקטרון. פרט לכך כל תכונותיהם זהות לחלוטין, ולאיש אין מושג האם יש לו חשיבות מעשית כלשהי, ולשם מה צריך אותו בכלל.... תעלומה! אבל בשנות ה-60 התגלה, שכשם שלאלקטרון יש נויטרינו שמלווה אותו בכל התפרקות רדיואקטיבית, גם

למיואון יש נויטרינו משלו. כלומר, יש שני סוגים של נויטרינו, שלא ברור מה ההבדל ביניהם; ידוע רק שהאחד "צמוד" לאלקטרוני ומשנהו למיואונים. וכשם שבכורים גרעיניים אפשר לקבל אלומות חלקיקי נויטרינו של אלקטרון, כך ניתן לייצר אלומות של נויטרינו מהסוג השני במאיצי החלקיקים הענקיים, שבהם מאיצים חלקיקים כדי לחקור את מבנה הגרעין ומבנה החלקיקים שבתוכו. ואם כל זה לא מספיק מסובך, התברר ב-1975 שיש במשפחה הזו - משפחת הלפטונים - גם אח שלישי, ששמו טאו, כבד עוד יותר - בערך פי 17 מן המיואון, שמלבד זאת זהה בכל תכונותיו למיואון ולאלקטרון, ואיש אינו יודע על מה ולמה. זו אחת מהחידות שנתרו כאתגר לעתיד. ואגב, המדען שגילה את חלקיק הטאו, מרטין פרל (Perl), מסטנפורד, שותף אף הוא לפרס נובל בפיסיקה לשנת 1995. התברר שגם לטאו יש נויטרינו משלו, וכבר יש לנו שלושה סוגים של נויטרינו. במה הם שונים זה מזה, פרט לכך שכל אחד מהם צמוד לחלקיק אחר - איננו יודעים. אולי יש להם מסה שונה, אבל עד כה לא הצליחו למדוד את המסה של אף נויטרינו. מאחר שהם גם שונים וגם דומים זה לזה, הועלתה האפשרות שכל סוג של נויטרינו יכול להפוך למשנהו.

בעיית הנויטרינו של השמש

מכאן נפנה לשאלה מרתקת אחרת, שמקשרת לענייננו: מה קורה בתוך השמש? בשנות ה-30 הבין הפיסיקאי הדגול האנס בתה (Bethe), שמקור האנרגיה העצומה של השמש הוא בתהליכים גרעיניים, שמתחוללים בטמפרטורה של 10 מיליון מעלות צלזיוס. אבל כשאנו מסתכלים על השמש אנחנו רואים רק את פניה, כדור אש בטמפרטורה של 5,000 מעלות "בלבד". איך בכלל אפשר לדעת מה קורה בלב השמש? מה יכול לחדור לתוך ליבו של כדור שרדיוסו 700,000 ק"מ, כפליים המרחק בין הארץ לירח? יש רק אחד שיכול לעשות את זה - הנויטרינו, כמובן.

הנויטרינו משחק תפקיד חשוב בתהליכים הגרעיניים בלב השמש ושאר הכוכבים; כמויות עצומות של חלקיקי נויטרינו נוצרות ונפלטות. חלקם מגיעים לארץ. אילו רק יוכלנו לראותם, יוכלנו לבצע בעזרתם תצפיות אסטרונומיות מסוג חדש - אסטרונומיה של נויטרינו. שהרי מהי אסטרונומיה? אנו עורכים תצפיות בכוכבים ובגלקסיות כדי להבין מה קורה שם. אבל מה פירוש מסתכלים? תופסים משהו שמגיע משם; למשל, מסתכלים מבעד לטלסקופ ותופסים פוטונים שנפלטים

מפני הכוכבים. מסתכלים בטלסקופי-רדיו ותופסים גלי רדיו שמגיעים משם. אילו יכולנו לתפוס גם חלקיקי נויטרינו, יכולנו להבין באמצעותם מה קורה בלב השמש והכוכבים ובכוכבים מתפוצצים.

ואמנם, כיום כבר אפשר לגלותם. קשה - אבל אפשר. לשם כך צריך לרדת למכרה תת-קרקעי, להציב גלאי גדול ולחכות. החוקר ריי דיוויס (Davis) עורך מאז 1967 (!) ניסוי במכרה תת קרקעי עם 600 טון של נוזל ניקוי כימי שעיקרו כלור, והוא מחכה שנויטרינו מן השמש יבוא, יפגע באטום כלור ויהפוך אותו לאטום של הגז האציל ארגון. לפי כל התיאוריות על מה שקורה בתוך השמש, צריכים להיווצר בערך 10 אטומי ארגון מדי שבוע.

חישבו על הסיטואציה: במכרה תת-קרקעי נמצא אמבט ענק, המלא ב-600 טון נוזל ניקוי, ומדי שבוע צריכים להימצא בתוך הבריכה הענקית הזאת 10 אטומים, שהפכו מכלור לארגון. ומסתבר שיש טכניקה שמאפשרת לגלות אפילו אטום בודד כזה. ומה שהתברר זה, שבכל שבוע נמדדו בממוצע רק 3 אטומים, במקום 10. נשאלת השאלה - האם המדידות שגויות, או אולי התהליכים שמתחוללים בשמש חלשים יותר ממה ששיערונו? ואולי קורה לחלקיקי הנויטרינו משהו בדרך? כדי לענות על כך תוכנן ניסוי משוכלל יותר, הנמצא במעבדה תת קרקעית מתחת להר באיטליה - ניסוי בינלאומי משותף למדענים גרמנים, איטלקים, צרפתים, אמריקנים וישראלים, ובכללם קבוצה ממכון ויצמן. בניסוי זה מחליפה המתכת גליום את מקומו של נוזל הניקוי, והניסוי הזה מתוחכם ומדויק הרבה יותר מקודמו. אך גם כאן התברר בשנים האחרונות, שכמות חלקיקי הנויטרינו המגיעים היא רק כמחצית מהכמות המצופה על פי התיאוריה. כיום נראה, אם כי אין לכך עדיין הוכחה חותכת, שלא התהליכים בתוך השמש שונים ממה שהנחנו, אלא שחלק מחלקיקי הנויטרינו שנוצרו בשמש הופכים בדרך לחלקיקי נויטרינו מסוג אחר. כלומר, יש פה משחק דו-פרצופי (או תלת-פרצופי) בין שלושת סוגי הנויטרינו, שאינו מובן עד תום. ואולי הניסוי הזה הוא שייתן קצה חוט לפתרון התעלומה - לשם מה יש לאלקטרון שני "אחים" נוספים! מדוע הטבע "חוזר על עצמו" שלוש פעמים?!

פתרון החידה או תעלומה חדשה?

התחלנו בבריאת היקום והתפשטותו, ונשאלת השאלה מה זה שייך לעניין הנויטרינו, לכוכב מתפוצץ, או למה שקורה בתוך השמש? הקשר הוא בכך שהיקום כולו טובל במין

אוקיינוס בלתי נראה של חלקיקי נויטרינו. בכל סמ"ק של חלל, בכל מקום בקוסמוס, בחדר בו אתם קוראים חוברת גיליאו זו, אצלכם בבטן, באוזניים, בחלל בין הכוכבים, בכל מקום - יש בערך 110 חלקיקי נויטרינו מכל אחד משלושת הסוגים.

נשאלת השאלה - אולי חלקיקי הנויטרינו הם-הם החומר האפל של היקום? אולי אותם תשעים ומשהו אחוזים ממשקל היקום שאינם נראים לעין מורכבים מהחלקיקים החמקמקים הללו? התשובה על כך תלויה במסתו של הנויטרינו, והחשבון פשוט מאוד: אם היקום אינו "סגור" ואינו "פתוח", אלא הוא בגבול בין שני המצבים, כמות החומר ביקום ידועה. אם הנויטרינו קל מהאלקטרון פי 25,000, בערך, אזי הוא החומר האפל של היקום. למה? מפני שכשמכפילים את המסה הזאת ב-110 חלקיקים לסמ"ק כפול נפח היקום - מקבלים את סך כל החומר החסר, שיש ביקום על פי החישובים.

אבל אם לנויטרינו יש מסה, התרומה העיקרית לחומר האפל היא של החלקיק הכבד מביניהם. ניוחש לא פרוע הוא, שזהו הנויטרינו של הלפטון הכבד ביותר - הטאו. ולכן השאלה "האם הנויטרינו של טאו - אותו יצור שאיש לא הזמין ואיש לא מבין למה הוא קיים - קל פי 25,000 יותר מהאלקטרון?" חשובה מאין כמותה להבנה של מבנה היקום והתפתחותו. אבל איך אפשר בכלל למדוד זאת? הדבר נשמע כמעט בלתי אפשרי. עד כה כל מה שידוע לנו במישרין על מסת הנויטרינו של טאו הוא, שמסה זו היא לכל היותר גדולה פי 40 ממסת האלקטרון. ייתכן שהיא אפס, ייתכן שהיא קטנה כאמור פי 25,000, ייתכן שהיא קטנה פי אלף וייתכן שהיא שווה למסת האלקטרון או אף גדולה ממנה. אם המסה באמת פי 25,000 יותר קטנה ממסת האלקטרון, עלינו לשפר את רגישות המדידות פי מיליון! אחת הדרכים לבדוק זאת היא לחפש נויטרינו מסוג אחר שהפך תוך כדי תנועה לנויטרינו של טאו. אם נגלה דבר כזה, יש סיכוי למדוד את מסתו.

זה מוביל לניסוי לגילוי החומר האפל שביקום - ניסוי שיש לי בו מעורבות עמוקה. הניסוי נערך במאיץ הענק בז'נבה, באמצעות אלומת חלקיקי נויטרינו מהסוג השני. ומה שמנסים למצוא זה האם נויטרינו כזה נהפך - לעיתים נדירות, אמנם - לנויטרינו מהסוג השלישי, המועמד העיקרי להיות החומר האפל של היקום. האם מישהו ראה אותו אי פעם? לא. גם הסוג הזה של נויטרינו עובר דרך הכל בלי להשאיר שום עקבות, אבל פעם ביוכל, כשהוא כבר משאיר עקבות, הוא מייצר חלקיק טאו, שנע לכל היותר עשירית מילימטר לפני

שהוא מתפרק לחלקיקים אחרים. חישובו על כך: יש מאיץ, שממנו יוצאת אלומה אדירה של מיליארדי מיליארדים של חלקיקי נויטרונים, שאיש לא יכול לראותם. יש תקווה שפעם ביובל אחד מהם יהפוך לנויטרינו מסוג אחר, שגם אותו אין איש יכול לראות. נותנים לנויטרינו האחר הזה לפגוע בגוש חומר, בתקווה שאחד מכל המיליארדים שעוברים שם יפגע במשהו וייצור חלקיק, שמתפרק אחרי עשירית המילימטר לכמה חתיכות, שאותם כבר אפשר לגלות. ולפי החישובים דרוש גוש חומר במשקל טון, לפחות, אחרת אין כל סיכוי לגלות אפילו מקרה אחד...

נניח שיש לנו טון חומר וגלאי מתאים והתרחש האירוע הנדיר הזה. איך ניתן לאתר מסלול של עשירית מילימטר בתוך טון חומר? לכך דווקא יש פתרון פשוט - החומר הזה עשוי מלוחות צילום מהסוג הפשוט ביותר, ומאחוריו מצויה אלקטרוניקה מתוחכמת מאוד, שמסוגלת לאתר באיזה מילימטר מעוקב של החומר של לוחות הצילום קרה אירוע מהסוג המבוקש. ואז, אפילו בעזרת מיקרוסקופ פשוט, ניתן לחפש את עקבות ההתנגשות. אך מכיוון שצריך לחזור על כך עשרות ומאות

אלפי פעמים, משתמשים במערכת ממוחשבת ואוטומטית. הניסוי החל בסוף 1994 ואמור להסתיים בקרוב, מקץ 4 שנים שלאחריהם ייבדקו לוחות הצילום כדי לחפש בתוכם את עשירית המילימטר של מאורע שקורה לעתים נדירות מאוד. ואם יתמזל מזלנו והדבר הזה יקרה, הניסוי הזה יוכיח שאותו נויטרינו חמקמק שלא רואים אותו ולא תופסים אותו, שאחראי לכל כך הרבה דברים מופלאים ביקום - להתפוצצויות של כוכבים ול"בישול" היסודות השונים - מהווה גם את עיקר החומר ביקום. ואולם אם הניסוי יעלה בתוהו, ובסוף 1998 או 1999 לא יימצא דבר, נישאר עם חידה בלתי פתורה. אולי יש חלקיק אחר, שאף אחד עדיין לא גילה, ואולי הסבר אחר, שלא העלינו על הדעת, עד כה. אכן, סיפורו של הנויטרינו הוא סיפור מדהים ומוזר, מרתק, חסר כל תועלת ושימוש בשלב זה של האנושות. אבל נוגע בכל כך הרבה פנים. הנושא הזה מנותק, אולי, מהמחקר השימושי, ה"ארצי", אבל הוא נותן לנו איזושהי פרספקטיבה על מימדיו של היקום ועל כל נפלאותיו.

תהודה

הדמייות בפיזיקה



<http://webphysics.ph.msstate.edu/javamirror>

אתר זה נבנה על-ידי פרופסור טאהא מזורגי מהמחלקה לפיזיקה ואסטרונומיה באוניברסיטת מיסיסיפי. מטרת האתר לרכז הפנייות לכל האתרים הגדולים באינטרנט בהם מפותחים ישומונים (applets) מקוונים (shockwave simulation-1 java applets) בפיזיקה - יש באתר הפנייות אל למעלה ממאתיים (!!) ישומונים בנושאים שונים ומגוונים מכל רחבי האינטרנט. האתר מעודכן לעיתים קרובות והגישה אליו בדרך כלל מהירה.

השימוש בישומונים המקוונים מחייב חיבור online לאינטרנט, והורדת ישומונים אלה דורשת יותר זמן מאשר הורדת דף html רגיל. למרות זאת אפשר להשתמש בהם בשיעור בזמן אמיתי - לאחר ההורדה הישומון רץ על המחשב המקומי ואין שום משמעות למהירות החיבור לאינטרנט. אפשרות מומלצת אחרת היא להפנות תלמידים לישומונים במסגרת שיעורי הבית בתוספת דפי עבודה מנחים.

להדמייות הניתנות בחינם יש גם חסרון: לא כל הישומונים מוצלחים באותה מידה, ובהחלט צריך לבדוק היטב כל הדמייה מבחינת הדיוק הפיזיקלי ומן הבחינה הפדגוגית.

בין ההדמייות המומלצות: תופעות התאבכות ועקיפה (ניתן לשנות את: צבע האור הפוגע, מרחק המסך מן הסדק, רוחב הסדק המרחק בין הסדקים, ולראות **השפעה איכותית בלבד** של השינויים על תמונת ההתאבכות המתקבלת), מעגלי זרם ישר (משנים ערכי רכיבים במעגל ובודקים כיצד משתנה הזרם בערוצים שונים במעגל), שדה אלקטרוסטטי (ניתן להניח מטענים נקודתיים שליליים וחיוביים ולראות את קווי השדה האלקטרוסטטי המתקבל), הקשת בענן (פיזור אור מטיפה כדורית: אפשר לשנות את זווית הפגיעה וצבע האור, ולראות איכותית וכמותית מהי זווית ההסחה המתקבלת), שבירה בעדשות דקות ועבות ועוד ועוד.

מרגלית גרמן

תהודה