



חיהם המוזרים של הקווארקים: מבט מקרוב על החומר

David Gross*

מכון קבלי לפיזיקה תאורטית, אוניברסיטת קליפורניה, סנטה ברברה, סנטה ברברה, קליפורניה, ארצות הברית

סוקרים צעירים

EDOARDO
גיל: 8

ILYAN
גיל: 8

MATTIA
גיל: 9

WHITCHUR-
CH PRIMARY
SCHOOL
10-11



בתחום של פיזיקת החלקיקים אנו מנסים להבין ממה היקום שלנו עשוי. אנו חוקרים את תכונות הבסיס של החומר, מתארים את החלקיקים היסודיים המרכיבים אותו, ומנסים להבין איך החלקיקים השונים שבונים את עולמנו פועלים יחד. במאמר זה נצלול אל תוך האטומים – אבני הבניין של החומר – ונסה לענות על כמה שאלות מסקרנות ובסיסיות על אודות היקום, כמו "מהם פרוטונים וניטרונים, החלקיקים שמהם מורכב גרעין האטום?" וכן, "האם הרכיבים הללו עשויים מחלקיקים קטנים אף יותר?".

פרופסור דיוויד גרוס זכה בפרס נובל לפיזיקה לשנת 2004 יחד עם פרופ' יוֹדִיווִיד פּוֹלִיֶצֶר ועם פרופ' פרנק וילצ'ק, על גילוי חופש אסימפטומטי בתאוריית הכוח החזק.

פיזיקה תאורטית – אהובתי מחטיבת הביניים

המדע סיקרן אותי כבר מגיל צעיר. כשהייתי בחטיבת הביניים התעניינתי מאוד בקריאת ספרי מדע פופולריים, כמו "אחת, שתיים, שלוש... אינסוף" מאת ג'ורג' גאמוב, הבוחן מושגים במתמטיקה ובפיזיקה. לכבוד בר המצווה שלי קיבלתי ספר מיוחד מאוד, שאלברט

פיזיקה תאורטית

(Theoretical Physics)

ענף בפיזיקה שבו משתמשים במשוואות מתמטיות לבניית מודלים שעוזרים לתאר את העולם.

פיזיקת החלקיקים

(Particle Physics)

ענף בפיזיקה שבו חוקרים את אבני הבניין של החומר.

איור 1

מחקרים מוקדמים של מבנה

האטום. (A) ניסוי רדיד הזהב

של רתרפורד בשנת 1919 גילה שבמרכז האטום יש גרעין מוצק. כשרתרפורד "שיגר" חלקיקי אלפא לעבר יריעה של רדיד זהב, חלקם עברו ישר דרכה, בעוד שאחרים פגעו במכשול ששינה את מסלולם. התברר שזה היה גרעין האטום

(האיור נלקח מ: [flexhttps://flexbook.org/ck12.books.flexbook-chemistry--1ck-primary//4.1section//2.rutherford-lesson/](https://flexbook.org/ck12.books.flexbook-chemistry--1ck-primary//4.1section//2.rutherford-lesson/model-chem/atomic-)

(B) מחקרים בשנות ה-30 של

המאה ה-20 חשפו שלאטום יש מבנה דומה למערכת השמש, שבו האלקטרונים נעים סביב הגרעין.

Gold foil = רדיד זהב;

= Alpha particle emitter

פולט חלקיקי אלפא;

Slit = חריץ;

Nucleus = גרעין;

= Detecting screen

מסך זיהוי;

Rutherford's Gold Foil

Experiments = הניסויים של

רדיד הזהב של רתרפורד;

= Atomic Structure

מבנה האטום;

Electrons = אלקטרונים;

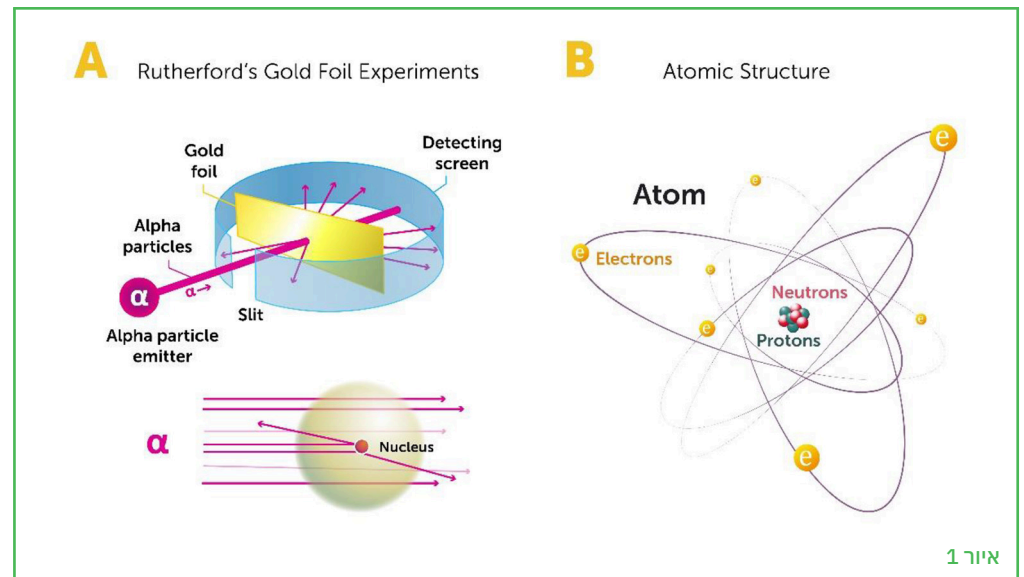
Neutrons = ניטרונים;

Protons = פרוטונים.

איינשטיין בכבודו ובעצמו חתם עליו, מקרוב משפחה של עמיתו של איינשטיין, ליאופולד אינפֶלד, שהיה שותף לכתיבת הספר. כך התאהבתי בפיזיקה תאורטית. הייתי מוקסם מכך שאני יכול להשתמש במתמטיקה ובמוח שלי כדי להבין את היקום. אז הבנתי שאני רוצה להיות פיזיקאי תאורטי – וזה אכן קרה. האהבה שלי לפיזיקה תאורטית התפתחה עם השנים, אבל אז בעצם אותה האהבה שחשתי כנער. המחשבה על פיצוח החידות הבסיסיות של היקום שלנו עדיין מלהיבה אותי. אחת מהן היא: ממה עשוי היקום?

פיזיקת חלקיקים – צוללים אל תוך החומר

מהו בדיוק חומר? ממה הוא מורכב? בתחום פיזיקת החלקיקים אנו מנסים לענות על שאלות מסוג זה. כיום כולם יודעים שכל סוגי החומר – החל מהכוכבים ועד לגופינו שלנו – מורכבים מאטומים, ושהם מורכבים פרוטונים, מניטרונים ומאלקטרונים, אך עד תחילת המאה ה-20 לא הבינו את מבנה האטום. בין השנים 1908 ל-1913 אָרְנֶסְט רֶתְרְפּוֹרְד, פיזיקאי מניו זילנד, ותלמידיו ביצעו סדרה של ניסויים במטרה לחקור את מבנה האטום [1]. הם לקחו חלקיקים זעירים, הנקראים חלקיקי אלפא, ו"ירו" אותם לתוך אטומים ביריעה של רדיד זהב (לחומר קריאה נוסף על ארנסט רתרפורד ועל הניסוי, ראו כאן וכאן). חלק מחלקיקי האלפא עברו דרך היריעה ללא הפרעה, בעוד שנראה היה שאחרים נתקלו במשהו "נוקשה" והתפזרו לכיוונים שונים (איור 1A). תוצאות הניסויים המפורסמים הללו חשפו שרוב נפחו של האטום הוא למעשה חלל ריק, בעוד שרוב המסה שלו וכל המטען החיובי שלו מרוכזים בנפח קטן מאוד במרכזו, הנקרא הגרעין. זאת הייתה תגלית גדולה שבישרה על הולדתה של פיזיקת החלקיקים.



איור 1

כמה שנים לאחר מכן גילה רתרפורד שהמטען החיובי של האטום נוצר על ידי חלקיקים הנקראים פרוטונים, ושמשפר הפרוטונים באטום שווה למספר האלקטרונים המקיפים את הגרעין [2]. לאחר מכן, עברו יותר מ-10 שנים לעלות לשלב הבא לקראת הבנת מבנה הגרעין. בשנת 1932 הפיזיקאי הידוע ג'יימס צ'דוויק (James Chadwick) גילה שהגרעין מכיל פרוטונים וניטרונים [3]. התגלית של צ'דוויק השלימה את ההבנה הבסיסית שלנו של

מודל "מערכת השמש" הקלאסי של האטום, שבו אלקטרונים מסתובבים סביב הגרעין (איור 1B). אבל ממה מורכבים הפרוטונים והניטרונים?

המאיצים שעוזרים לנו להבין יותר מהר

מאז ניסוי רדיד הזהב החלוצי של רתרפורד, חוקרים בתחום פיזיקת החלקיקים ביצעו ניסויים דומים רבים. הם "ירו" חלקיק אחד, הנקרא חלקיק גשש, לעבר חלקיק אחר, הנקרא חלקיק מטרה, כדי ללמוד על תכונותיו של חלקיק המטרה. תהליך זה נקרא גישוש. אנו יורים את חלקיק הגישוש (למשל, אלקטרון) בזוויות שונות וברמות שונות של אנרגיה, ומודדים את שינוי המסלול שלו לאחר שהוא מתנגש בחלקיק המטרה (לדוגמה, פרוטון), וסוטה ממסלולו המקורי. מידע זה מאפשר לנו להסיק מסקנות לגבי המבנה של חלקיק המטרה. כדי להבין את תהליך הגישוש, אפשר להשתמש באנלוגיה הבאה: דמיינו שיש חדר מלא באנשים. אתם רוצים לדעת איפה האנשים, אבל אסור לכם להיכנס לחדר. עם זאת, מותר לכם לזרוק כדורים לתוך החדר. אתם זורקים כדור אחד פנימה וכלום לא קורה. אז, אתם זורקים עוד כדור, בזווית קצת אחרת, ושומעים מבפנים: "איי!". כך אתם יודעים שבכיוון הזה פגעתם במישהו. אם אתם זורקים כדורים רבים לכל מיני כיוונים במהירויות שונות, בסופו של דבר, תוכלו להבין פחות או יותר היכן האנשים ממוקמים בחדר. אותו העיקרון מתקיים כאשר אנו יורים חלקיק אחד על חלקיק אחר – המשוב שאנו מקבלים מפיזור חלקיקי הגישוש עוזר לנו ללמוד על המבנה של חלקיק המטרה.

כדי לזהות את מבנה הגרעין בתהליך הגישוש, רתרפורד ירה לעברו חלקיקי אלפא, כיוון שזה מה שהיה באפשרותו לעשות במעבדה שלו. אם ברצוננו לצלול עמוק עוד יותר לתוך החומר ולחקור את המבנה של חלקיקים תת־אטומיים כמו פרוטונים וניטרונים, או אם ברצוננו לגלות חלקיקים תת־אטומיים חדשים, עלינו להשתמש בחלקיקי גישוש בעלי אנרגיות גבוהות בהרבה מהחלקיקים שבהם השתמש רתרפורד, זאת משום שיש כוחות חזקים שמחזיקים את החלקיקים התת־אטומיים יחדיו, ולכן עלינו להשתמש באנרגיות גדולות כדי לפרק אותם, כדי שנוכל לחקור את המבנים שלהם. לשם כך אנו משתמשים במאיצים – מכשירים שמגבירים מאוד את מהירותם של חלקיקי הגישוש.

בתחילת הקריירה שלי, בשנות ה-60 וה-70 של המאה ה-20, בנו והשמישו מאיצים חדשים. שני מאיצים שהשפיעו רבות על הקריירה שלי היו ה-Bevatron באוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, שבה הייתי סטודנט לתואר שני, והמאיץ הליניארי במרכז המאיץ הליניארי של סטנפורד (SLAC) באוניברסיטת סטנפורד, קליפורניה (איור 2). בהשוואה למאיצים החזקים ביותר שיש לנו כיום (בעיקר מאיץ ההדרונים הגדול ב-CERN), ה-Bevatron והמאיץ הליניארי לא יכלו להאיץ את חלקיקי הגישוש למהירויות גבוהות מאוד. הם הצליחו לייצר אנרגיות של כ-6 ג'יגה אלקטרון וולט (GeV); אלקטרון וולט אחד שווה לאנרגיה שיש לאלקטרון אחד כשהוא מואץ במתח של וולט אחד). האנרגיות של המאיצים כיום חזקות בערך פי אלף. עם זאת, המאיצים הללו היו חזקים מספיק כדי לאפשר למדענים לגלות חלקיקים חדשים מדי שבע. זו הייתה תקופה מרגשת ביותר בפיזיקת החלקיקים, וידעתי שאני רוצה להיות במקום שבו מתרחשים הדברים החשובים הללו. אולם למרות ההצלחה הרבה של הניסויים, הייתה לנו מעט מאוד הבנה תאורטית של מבני החלקיקים

חלקיקים תת־אטומיים (Subatomic Particles)

חלקיקים המרכיבים את האטומים, ולכן הם קטנים מגודלו של אטום.

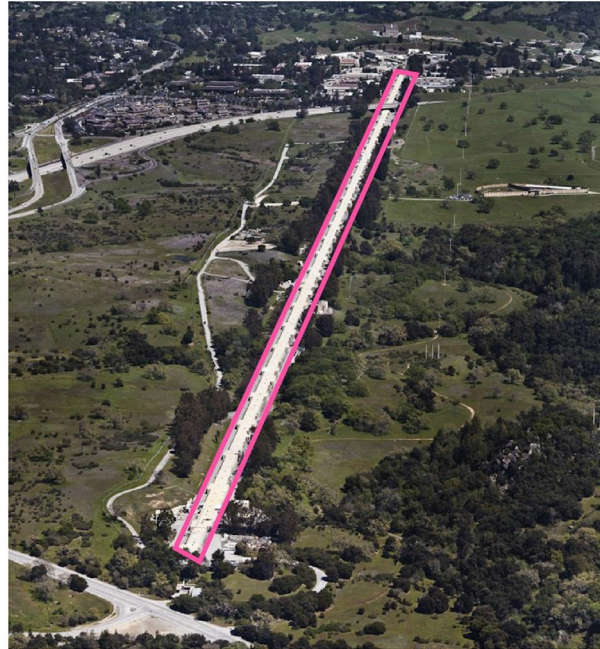
מאיצים (Accelerators)

מכשירים המאיצים חלקיקים למהירויות גבוהות מאוד וגורמים להתנגשות בין החלקיקים המואצים לבין חלקיקי המטרה, כדי לחקור את המבנה של חלקיקי המטרה.

התת־אטומיים ושל האינטראקציות השולטות בהתנהגותם. בחרתי להתמקד בבעיה מאוד בסיסית במבנה החלקיקים: ממה מורכב הפרוטון?

איור 2

מאיץ SLAC הליניארי
באוניברסיטת סטנפורד,
קליפורניה, ארצות
הברית. מאיץ SLAC (מסומן
בוורוד) נבנה בשנת 1966.
אורכו 3.2 קילומטרים, והוא
מסוגל להאיץ אלקטרונים
לאנרגיות של 50 ג'יגה
אלקטרון וולט (מקור
התמונה: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/SLAC_National_Accelerator_Laboratory_Aerial.jpg).



איור 2

מבנה הפרוטונים

במאיץ הליניארי של SLAC נעשה שימוש בתהליך הגיטוש באלקטרונים, שהם חלקיקים נקודתיים פשוטים (כלומר חלקיקים מרוכזים לנפח קטן במיוחד) כדי לחקור את מבנה הפרוטונים. באותה התקופה טרם ידעו ממה עשויים הפרוטונים. אחת ההשערות הייתה שהפרוטון, כמו האלקטרון, הוא חלקיק נקודתי, ושהוא אינו מורכב מחלקים קטנים יותר. השערה נוספת הייתה שהפרוטון עשוי מחומר שאינו מוכר המפוזר באופן שווה. באופן מפתיע, התוצאות ממאיץ ה-SLAC לא התאימו לאף אחת מההשערות, אלא הצביעו על כך שהפרוטון עשוי מחלקיקים נקודתיים אחרים. עם זאת, מעולם אף אחד לא ראה את החלקיקים הנקודתיים שכביכול הרכיבו את הפרוטון; לא משנה באיזו עוצמה "ירינו" את החלקיקים הנקודתיים על הפרוטון, החלקיקים הנקודתיים האלה לא יצאו (לעומת זאת, כאשר יצרנו התנגשות בין שני אטומים, האלקטרונים שלהם מתפזרים). בנוסף לכך, נראה שתוצאות הניסוי הצביעו על כך שהחלקיקים הנקודתיים בפרוטון מקפצים סביב, כאילו אין כוח שפועל ביניהם. תופעה זו הייתה מוזרה מאוד בעינינו, כי ידענו שיש קשר חזק מאוד בין החלקיקים הנקודתיים שבפרוטונים – אך לא יכולנו להסביר מהו הכוח שקושר אותם יחדיו.

בחיפושי אחר הסבר לממצאים המפתיעים הללו, נעזרתי בשתי תאוריות קודמות. אחת התאוריות הוצעה על ידי הפיזיקאים מורי גל-מן (Murray Gell-Mann) וג'ורג' זְוֵיג (George Zweig) בתחילת שנות ה-60 של המאה ה-20 [4, 5]. גל-מן וצוויג הסבר מתמטי לנתונים העולים ממדידות של חלקיקים תת־אטומיים בעלי אינטראקציה חזקה. הם הניחו שהחלקיקים התת־אטומיים עשויים משלושה סוגים של חלקיקים בסיסיים יותר

איור 3

מחקר החלקיקים

התת־אטומיים. (A) בשנות

ה-60 של המאה ה-20

הפיזיקאים מוֹרֵי גֶל-מֶן וג'ורג'

צווייג שיערו שחלקיקים

תת־אטומיים, כמו פרוטונים

וניטרונים, עשויים מחלקיקים

בסיסיים הנקראים קווארקים.

קווארקים נקראים "חלקיקים

בעלי אינטראקציה חזקה"

כיוון שהכוח החזק "קושר"

אותם יחדיו. (B) בשנות ה-70

של המאה ה-20 עמית ואני

מצאנו הסבר מתמטי

להתנהגות הקווארקים –

תופעה שנקראת חופש

אסימפטוטי. החופש

האסימפטוטי מתאר כיצד

האינטראקציה בין קווארקים

נחלשת ככל שהם מתקרבים

זה לזה, ומתחזקת ככל שהם

מתרחקים זה מזה. החופש

האסימפטוטי מסביר מדוע

הקווארקים נשארים "נעולים"

בתוך פרוטונים – תופעה

שאנו קוראים לה "כליאה".

Quarks = קווארקים;

Strongly Interacting

Particles = חלקיקים בעלי

אינטראקציה חזקה;

Asymptotic Freedom

= חופש אסימפטוטי;

Interaction strength

= חוזק האינטראקציה;

= Distance (shorter)

= מרחק (מתקצר).

רדיואקטיביות

(Radioactivity)

תהליך שבו חלקיקים או

אנרגיה (או שניהם) נפלטים

מאטום שאינו יציב.

הכוח החזק

(Strong Force)

הכוח הקושר פרוטונים

וניטרונים בגרעיני האטומים.

חופש אסימפטוטי

(Asymptotic Freedom)

תופעה שבה הקווארקים

פועלים כמו חלקיקים

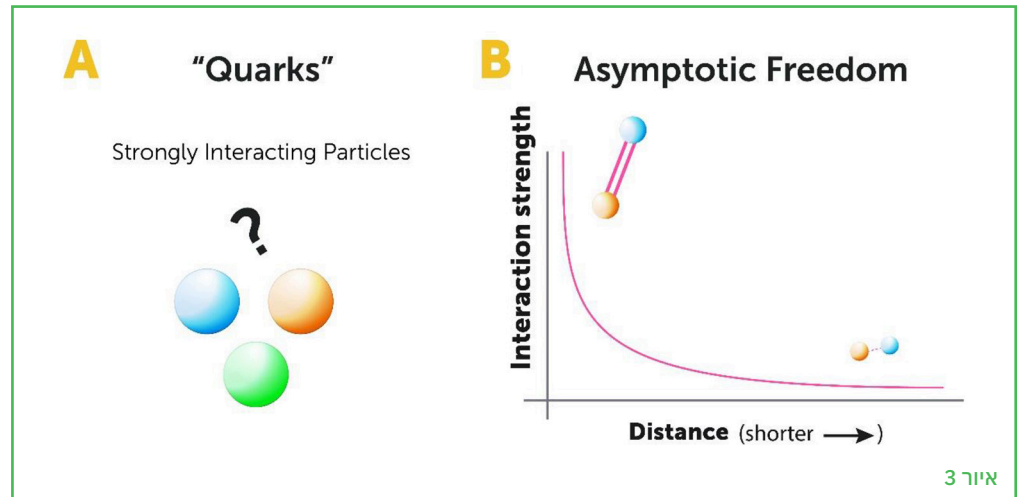
חופשיים כשהם במרחק קטן

זה מזה, אך ככל שהמרחק

גדל קשה יותר להפריד אותם

האחד מהשני.

שגל-מן כינה קווארקים (איור 3A). בהתחלה הנחה זו נחשבה ל"טריק" מתמטי שאין לו שום קשר למציאות, אך ככל שחלף הזמן, התברר שחלק מהתחזיות של המודל הזה היו מדויקות למדי. יחד עם תוצאות חדשות שהתקבלו בניסויים שנערכו במאיצים, נראה היה שכדאי לחקור לעומק את רעיון הקווארקים. כמו כן, השתמשתי בהכללות של תאוריית האלקטרומגנטיות של מקסוול (Maxwell). התאוריה של מקסוול מסבירה את כוח החשמל והמגנטיות בהתבסס על קיומו של סוג אחד של מטען, הנקרא מטען חשמלי.



איור 3

הכללות של התאוריה של מקסוול מובילות למסקנה שסוגים שונים של מטענים עשויים להסביר כוחות אחרים שקיימים בטבע. בפיזיקה ישנם ארבעה כוחות בסיסיים: א. הכוח האלקטרומגנטי האחראי לחשמל ולמגנטיות; ב. הכוח החלש שאחראי לרדיואקטיביות (למידע נוסף על רדיואקטיביות, ראו כאן); ג. הכוח החזק שקושר פרוטונים וניטרונים בגרעיני האטומים; ד. כוח הכבידה המושך עצמים גדולים אחד כלפי השני. ניסיתי למצוא הסבר לכוח החזק ש"מחזיק" את הפרוטונים ואת הניטרונים יחד. לאחר שביצעתי כמה חישובים מתמטיים מורכבים שהתבססו על שתי התאוריות הללו – תאוריית הקווארקים של גל-מן וצווייג ותאוריית האלקטרומגנטיות של מקסוול, פיתחתי תאוריה חדשה בשם קרומודינמיקה קוואנטית (באנגלית Quantum Chromodynamics ובקיצור QCD). תאוריית ה-QCD מסבירה את תכונותיהם של הקווארקים ושל הכוחות הפועלים עליהם. ב-QCD ישנם שלושה סוגים של מטענים (בניגוד לסוג אחד בלבד באלקטרומגנטיות קלאסית, שהוא הסוג החשמלי) ושמונה סוגי כוחות הפועלים על המטענים הללו. אחד ההישגים הגדולים ביותר של תאוריית ה-QCD הוא היכולת שלה להסביר מדוע הקווארקים מתנהגים כמו חלקיקים חופשיים בתוך הפרוטון – ממצא שהפתיע אותנו מאוד. עמית ואני מצאנו הסבר מתמטי לכך שהכוח החזק הפועל בין הקווארקים נחלש יותר ויותר ככל שהקווארקים מתקרבים זה לזה. לתופעה קוראים חופש אסימפטוטי [6, 7] (איור 3B). תגלית זו הובילה להתקדמות משמעותית בפיזיקת החלקיקים, והיא זיכתה אותי בפרס נובל לפיזיקה בשנת 2004 עם יו דיוויד פוליצר ועם פרנק וילצ'ק. הופתענו לגלות את תופעת החופש האסימפטוטי, כיוון שכוחות אחרים בטבע הולכים ונחלשים ככל שהחלקיקים מתרחקים זה מזה. חופש אסימפטוטי מסביר מדוע איננו רואים קווארקים חופשיים, וככל שאנו מנסים להפריד ביניהם, כך הכוח המושך אותם יחדיו מתחזק. משמעות הדבר היא שהקווארקים "נעולים" בתוך הפרוטונים – תופעה שנקראת כליאה.

הקווארקים המוזרים: אבני הבניין המפתיעות של החומר

כיום אנו מאמינים שהקווארקים הם חלקיקים נקודתיים שמרכיבים פרוטונים, ניטרונים, וקבוצה שלמה של חלקיקים בעלי אינטראקציה חזקה הנקראים הֶדְרוֹנִים. כפי שראינו הקווארקים כלואים בתוך החלקיקים שהם מרכיבים, ונעים כמו כדורים קטנים שמקפצים להם בתוך כדור גדול יותר. לקווארקים יש שלושה סוגי מטענים: מטען חשמלי, טעם וצבע (השונים מ"טעם" ומ"צבע" במובן הרגיל, כלומר איננו מזהים אותם בלשון או בעיניים). המטען החשמלי של הקווארקים מהווה חלק כלשהו ממטענם של האלקטרון או של הפרוטון: $-\frac{1}{3}$ (ממטען השלילי שהאלקטרון נושא) או $+\frac{2}{3}$ (מהמטען החיובי שהפרוטון נושא). ישנם שישה "טעמים" של קווארקים. אנו מכנים אותם: "למעלה", "למטה", "מוזר", "קסום", "עליון" ו"תחתון" (איור 4A). טעמי הקווארק קשורים לכוח החלש האחראי לרדיואקטיביות. פרוטונים עשויים משני קווארקים שטעמם "למעלה" וקווארק "למטה" אחד; ניטרונים עשויים משני קווארקים שטעמם "למעלה" וקווארק אחד "למעלה" (איור 4B). בנוסף למטען החשמלי ולטעם, הקווארקים יכולים להיות באחד משלושה "צבעים": אדום, לבן וכחול. הצבעים הם מקור הכוח החזק שקושר את הקווארקים יחד, וזהו גם מקור השם קְרוֹמוֹדִינָמִיקָה – "כרומוס" פירושו "צבע" ביוונית.

כליאה

(Confinement)

תכונת הקווארקים שגורמת להם "להינעל" בתוך פרוטונים (או בחלקיקים אחרים), גם כאשר מפעילים עליהם כוחות גדולים במטרה להפריד ביניהם.

הֶדְרוֹנִים

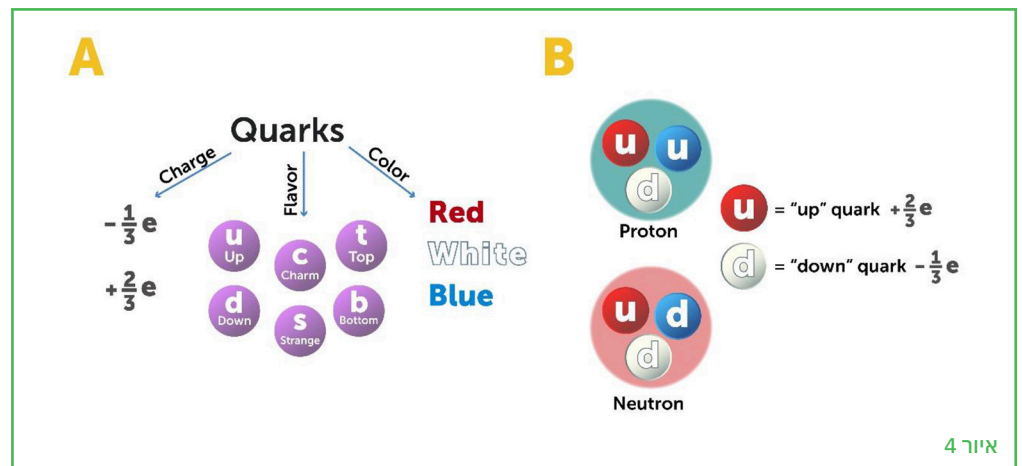
(Hadrons)

חלקיקים המורכבים מקווארקים ומקיימים אינטראקציה דרך הכוח החזק.

איור 4

קווארקים. (A) הקווארקים הם בעלי מטענים חשמליים, "טעמים" ו"צבעים" שונים. המטען שלהם מהווה חלק מהמטען של אלקטרון או פרוטון. הם מגיעים באחד משלושה צבעים, שהם מקור הכוח החזק שקושר אותם יחדיו, ובאחד משישה טעמים הקשורים לכוח החלש. **(B)** פרוטונים עשויים משני קווארקים שטעמם "למעלה" וקווארק "למטה" אחד, בעוד שניטרונים עשויים משני קווארקים שטעמם "למעלה" וקווארק אחד "למעלה".

Charge = מטען;
Flavor = "טעם";
Up = "למעלה";
Down = "למטה";
Charm = "קסום";
Strange = "מוזר";
Top = "עליון";
Bottom = "תחתון";
Quarks = קווארקים;
Proton = פרוטון;
Neutron = ניטרון.



ייתכן שבשלב זה אתם תוהים אם הקווארקים עצמם מורכבים מחלקיקים קטנים עוד יותר. בהיסטוריה של הפיזיקה מצאנו בהדרגה חלקיקים קטנים יותר ויותר המרכיבים את החומר: אטומים עשויים מאלקטרונים וגרעינים, גרעינים עשויים מפרוטונים וניטרונים, פרוטונים וניטרונים עשויים מקווארקים... אז אולי קווארקים מורכבים ממהשהו אחר? עד כה, הניסויים לא הניבו ראיות המצביעות על כך שקווארקים עשויים מתת-קווארקים. כדי לוודא מבחינה מדעית לכך שקווארקים באמת בלתי ניתנים לחלוקה, המאיצים שלנו יזדקקו לאנרגיות גבוהות במיוחד – בסדר גודל של 100 טריליון טריליון eV, כלומר, אנרגיות גבוהות יותר בערך פי טריליון (כלומר פי 10^{12}) מהאנרגיות שאנו רותמים כעת. מאוד קשה ויקר לבצע זאת כיום, ואיננו יודעים עדיין מהו הנתבי הנכון להמשך המחקר. בהיבט התאורטי אנו יכולים לבצע אקסטרפולציה של הידע הנוכחי שלנו על כוחות הטבע הבסיסיים למרחקים קצרים מאוד. כאשר אנו עושים זאת, אנו מגלים שעל כוח המשיכה למלא תפקיד שווה ערך בחשיבותו לזה של הכוח החזק. איננו יכולים להסביר בעזרת המודלים הנוכחיים שלנו את משחק הגומלין הזה בין כוח המשיכה לכוח החזק, כך שמהשהו בלתי צפוי עשוי להתרחש במרחקים קצרים

מאוד. ניסויים מצביעים על כך שמשהו עדיין חסר בתאוריה שלנו, ומחקר הקווארקים עשוי לעזור לנו להתגבר על כמה מהפערים הנוכחיים בדרך שבה אנו מבינים את אבני הבניין הבסיסיות של היקום.

תורת המיתרים: דרך אחרת להסתכל על החומר

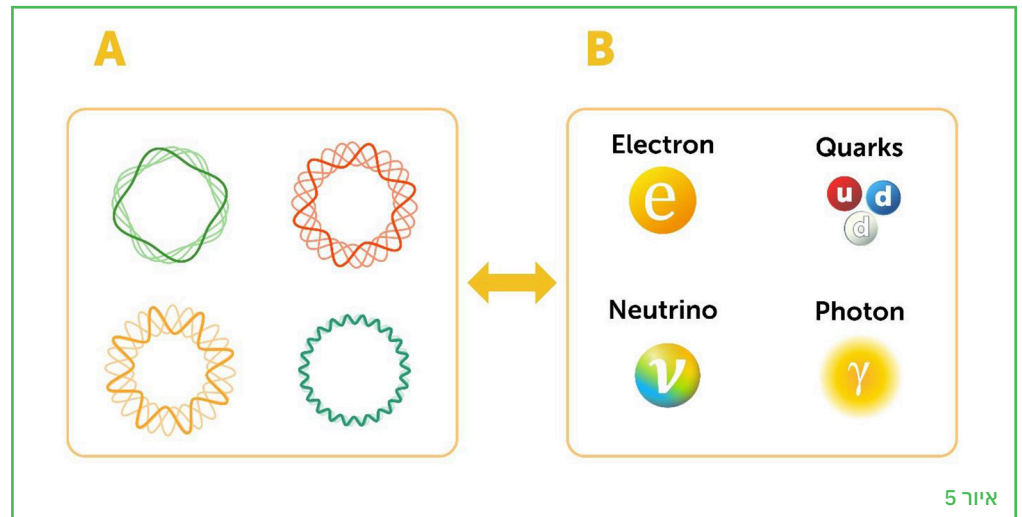
תורת המיתרים, שמדענים רבים (כולל אני) עובדים עליה כבר כמה עשורים, היא תאוריה מעניינת נוספת שמספקת לנו דרך חדשה אפשרית להבין את היקום. תורת המיתרים מסובכת מאוד מבחינה מתמטית, ומורכבת מפרטים רבים שאין באפשרותנו לתאר במאמר זה. בכל זאת, אציג אותה בקצרה: תורת המיתרים מציעה סברה שיש סוג של עצם כלשהו ממנו עשויים כל החלקיקים היסודיים, ובכללם הקווארקים. אותו "דבר" נקרא מיתר. המיתר יכול לרטוט בהרבה דרכים שונות, וכל דפוס רטט תואם לחלקיק יסודי מסוים. לדוגמה, אם המיתר רוטט בדפוס מסוים נקבל קווארק, אם הוא רוטט בדפוס אחר נקבל אלקטרון, וכן הלאה (איור 5). אם תורת המיתרים נכונה, אז קווארקים וחלקיקים יסודיים אחרים אינם מכילים תת-חלקיקים נוספים, אלא עשויים ממיתרים רוטטים. כדי לאמת את התאוריה הזאת באמצעות ניסויים, נזדקק לאנרגיות גבוהות בהרבה ממה שיש לנו כרגע. זה עלול לקחת זמן, אבל אני חושב שבהחלט יש למה לצפות.

תורת המיתרים (String Theory)

תאוריה פיזיקלית המתארת את החלקיקים הבסיסיים של הטבע במונחים של מיתר שרטט בדרכים שונות.

איור 5

תורת המיתרים (A) בתורת המיתרים המדענים מעלים סברה שכל החלקיקים היסודיים מורכבים מעצם הנקרא מיתר. (B) כאשר מיתר זה רוטט בדרכים שונות, נוצרים חלקיקים מסוימים. כיום אין לנו את הטכנולוגיה הנדרשת כדי לבדוק אם תורת המיתרים נכונה, אבל אני מקווה שנוכל לעשות זאת בעתיד.



איור 5

המלצות למוחות צעירים

בפיזיקה, כמו בכל תחומי המדע, חשוב שהמדענים יהיו יצירתיים. למרבה הצער, איננו יודעים איך ללמד אנשים להיות יצירתיים, אבל אנו יכולים לשמש דוגמה ליצירתיות ולהוות מנחים מעוררי השראה עבור התלמידים שלנו. הדבר הטוב ביותר שתלמידים יכולים לעשות הוא להתבונן בדרך שבה עובדים אנשים יצירתיים ומצליחים, וללמוד את השיטות שלהם. אני מתייחס לתלמידים שלי כעמיתים, ונהנה לעבוד איתם כשותפים שתרומתם שווה לשלי. זה עשוי להיות מאתגר עבור הלק מהתלמידים, אבל אחרים פורחים בסוג כזה של מערכת יחסים. פרופ' פרנק וילצ'ק, הסטודנט הרשמי הראשון שלי, זכה איתי בפרס נובל על

עבודתנו המשותפת על חופש אסימפטוטי. הוא דוגמה טובה לסטודנט שפָּרַח בנסיבות שבהן התייחסו אליו כאל שווה בין שווים.

כדי להפוך למדענים טובים, חשוב גם להתחיל במחקר מעשי בהקדם האפשרי. מחקר הוא דבר שונה מאוד משיעורים ומלמידה תאורטית. סדרת בעיות בשיעורי פיזיקה היא השיטה הטובה ביותר שיש לנו להכנת התלמידים למחקר. אנחנו נותנים לתלמידים בעיות רבות, והם חייבים לפתור אותן תוך כדי הסקת מסקנות. עם זאת, אפילו הבעיות הטובות ביותר המוצגות לתלמידים בשיעורים הן בעיות מומצאות. לעומת זאת, מחקר הוא דבר שמבוסס על בעיות אמיתיות, שעדיין לא מצאו להן פתרונות, ושאישי אינו יודע מראש כיצד לפתור אותן. לכן האתגר הגדול ביותר במחקר הוא לשאול את השאלות הנכונות. לפני שאתם מתמודדים עם שאלה מדעית, עליכם לוודא תחילה שהשאלה טובה (איור 6). גם לשאול שאלות טובות היא מיומנות שאיננו יכולים ללמד בצורה ישירה – אנו יכולים רק לספק דוגמאות ולהציג דרכי חשיבה יעילות. אם תצליחו לשאול שאלה טובה, אולי לא תוכלו לענות עליה מייד, אבל לפחות תוכלו להתקדם לקראת תשובה.

איור 6

המלצות למוחות צעירים.
אחד הכישורים החשובים ביותר למחקר טוב הוא היכולת לשאול שאלות טובות.



איור 6

אני סבור כי העיסוק במדע יכול לתרום לחיים מאושרים מהרבה סיבות. קודם כול, החברה בדרך כלל מכבדת את הכישרון הנדרש כדי להיות מדען, כי המדע חשוב כל כך לחיינו. מסיבה זו, העיסוק במדע עשוי לזכות אתכם בתמיכה ובהערכה מהחברה, וגם בפרנסה – וזה תענוג גדול. נעים לעבוד בתחום שבו העבודה היא מגרש המשחקים שלכם ומושא התשוקה והעניין שלכם. יתרון נוסף בעיסוק במדע היא שאתם משתייכים לקהילה בין-לאומית של אנשים שחולקים את אותם התשוקות ותחומי העניין. אתם יכול להגיע לכל מקום בעולם, למצוא אנשים שמתעניינים באותם הנושאים שבהם אתם מתעניינים, ולנהל איתם דיונים מרתקים. המדע הוא סוג של משפחה שבחרים להצטרף אליה.

לדעתי אנשים צריכים לעשות את הדברים שהם אוהבים לעשות. זה לא חייב להיות מדע – זה יכול להיות כל דבר. אם ניתנת לכם האפשרות לעסוק בדברים שאתם נהנים מהם באמת,

אתם בני מזל. זו העצה הטובה ביותר שאני יכול לתת לגבי בחירת התיב שלכם בחיים – גלו ממה אתם נהנים ובמה אתם טובים. לאחר שעשיתם זאת, הִיו שאפתניים – השקיעו מְרָץ ועבודה, וְהִיו מוכנים להיכשל. אם בחרתם בדרך שמספקת לכם הנאה, השמחה שאתם שואבים ממנה שווה את הסיכוי להיכשל.

תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאלכס ברנשטיין עבור האיורים.

חומרים נוספים

1. [Gross David - chromodynamics Quantum](#).

2. [Explains Dave Professor - \(QCD\) Chromodynamics Quantum](#).

הצגת כלי בינה מלאכותית

טקסט חלופי הנלווה לאיורים במאמר זה נוצר על ידי פרונטירז בסיוע כלי בינה מלאכותית, ונעשו מאמצים על מנת להבטיח את דיוקו, כולל בדיקה על ידי כותבי המאמר כאשר הדבר התאפשר. אם ברצונכם לדווח על בעיה, אנו צרו איתנו קשר.

מקורות

1. Rutherford, E. 1911. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Lond. Edinburgh Dublin Philos. Magaz. J. Sci.* 21:669–88. doi: 10.1080/14786440508637080
2. Rutherford, E. 2010. Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen. *Philos. Magaz.* 90:31–7. doi: 10.1017/CBO9780511707179.010
3. Chadwick, J. 1932. The existence of a neutron. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, Contain. Papers Math. Phys. Charact.* 136:692–708. doi: 10.1098/rspa.1932.0112
4. Gell-Mann, M. 1961. *The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry*. Synchrotron Laboratory Report CTSL-20. California Institute of Technology. doi: 10.2172/4008239
5. Zweig, G. 1964. *An SU_3 Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking (No. CERN-TH-412)*. CM-P00042884.
6. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. *Phys. Rev. Lett.* 30:1343. doi: 10.1103/PhysRevLett.30.1343
7. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Asymptotically free gauge theories. I. *Phys. Rev. D* 8:3633. doi: 10.1103/PhysRevD.8.3633

פורסם אונליין: 23 ביולי 2025

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Matteo Lorenzini | Chris North

ציטוט: Gross D (2025) חייהם המוזרים של הקווארקים: מבט מקרוב על החומר.
Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1080918-he

תורגם והותאם מ: Gross D (2023) The Quirky Lives of Quarks: A Close Look Into Matter.
Front. Young Minds 11:1080918. doi: 10.3389/frym.2023.1080918

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

זכויות יוצרים © 2023 Gross. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

8 גיל, EDOARDO

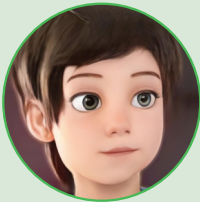
שמי Edoardo ואני אוהב מאוד פוקימון. אני בן 8 וגר במונטה פורצ'יו קאטונה שבפרברי רומא. יש לי אחות קטנה ויפה מאוד. אני מתעניין בקבוצות כוכבים, במיוחד בזו של מזל קשת, כי זה המזל שלי. אני מאוד אוהב לקפוץ, לטפס ולרוץ, אז אני מתאמן בפארקור.

8 גיל, ILYAN

שמי Ilyan. אני בן שמונה ואני מבוגר וזקן, שזאת עיירה קרובה לרומא. אני לומד בבית הספר GermogliAmo. אני אוהב לשחק כדורגל, לרקוד סטפס, לנגן בפסנתר ולשיר. אני אוהב מתנות והפתעות. החיה האהובה עליי היא גורילה. החברים הכי טובים שלי הם Edoardo, Yuri, Leonardo ו-Flavio.

9 גיל, MATTIA

שמי Mattia. אני אוהב לגלוש בסקיטבורד ולשחק כדורסל, ואני מצייר קומיקס. אני חושב שמאמרים מדעיים יכולים להיות מעניינים יותר אם הם נכתבים בבעות מצוירות. אולי יום אחד אהיה קריקטוריסט מדעי!





WHITCHURCH PRIMARY SCHOOL, גיל: 10-11

אנחנו קבוצה של 16 תלמידים בכיתה ו' בבית הספר Whitchurch שבמקדוף, ויילס. אנחנו אוהבים לחקור את העולם הסובב אותנו. נהנינו מאוד ללמוד על תחומים מדעיים מגוונים בפרויקט הזה, ולהיחשף לתגליות החדשות ביותר של האנושות, ולמדנו כל כך הרבה מושגים חדשים! החוויה הזאת בהחלט תשרת אותנו בהמשך דרכנו בתיכון!

הכותבים

DAVID GROSS

פרופסור דיוויד גרוס הוא פיזיקאי אמריקאי. הוא סיים את התואר הראשון שלו בפיזיקה ומתמטיקה באוניברסיטה העברית בירושלים, ישראל. בלימודי הדוקטורט שלו בפיזיקה הוא חקר את הכוח החזק באוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, בהנחייתו של ג'פרי צ'ו. לאחר שסיים את לימודיו ב-1966, הצטרף פרופ' גרוס לאגודת העמיתים של הרוארד וב-1969 נהיה מרצה בכיר באוניברסיטת פרינסטון, ניו-ג'רזי ושם הוא נשאר 27 שנים. בפרינסטון עבד פרופ' גרוס עם תלמידו הראשון לתואר שני, פרנק וילצ'ק, ובשנת 1973 הם גילו את תופעת החופש האסימפטוטי. ממצא זה הוביל לפיתוח תורת הכרומודינמיקה הקוונטית ומאוחר יותר, בשנת 2004, זיכה את גרוס ואת וילצ'ק בפרס נובל לפיזיקה. בשנת 1984 החל פרופ' גרוס לעבוד על תאוריית תורת המיתרים, שמאז הוא מתמקד בה במחקרו. לאחר שנותיו בפרינסטון עבר פרופ' גרוס למכון קבלי לפיזיקה תאורטית באוניברסיטת קליפורניה, סנטה ברברה, שם הוא שימש ראש המכון בין השנים 1997 ל-2012. לפרופ' גרוס שני ילדים מאשתו הראשונה (Shulamith Toaff), Ariela Gross ו- Elisheva Gross ושני נכדים. כיום הוא חי עם אשתו השנייה Jacquelyn Savani ועם בתו החורגת Miranda Savani. *gross@kitp.ucsb.edu

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל

Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן משפחת

שעשוע

Shashua Family Foundation