

היקום כהולוגרמה

למשך שלושים שנה נראה היה שתורת המיתרים, שנולדה מתוך ניסיון להסביר את פעולתו של הכוח החזק, אינה מצליחה במשימה זו. לאחרונה, בשל התפתחות חדשה המכונה "הולוגרפיה", מסתמנת פריצת דרך, המקדמת הבנה של הכוח החזק באמצעות מיתרים ויקום שבו עשרה ממדים

כתבה זו מוקדשת לזכרו של אבי, אורי ארמוני, נובמבר 1939 - אוגוסט 2010

■ בשנת 1997 הוכה עולם הפיזיקה התיאורטית בתדהמה: **חואן מלדסנה** (Juan Maldacena), פיזיקאי ארגנטינאי בן 29 שזה עתה סיים את עבודת הדוקטורט שלו, כתב מאמר קצר ובו הציע, שגרסה מסוימת של הכוח החזק – זה הגורם ללכידת קוורקים בפרוטונים ובנויטרונים – ניתנת לתיאור על-ידי תורת כבידה במרחב בעל עשרה ממדים. תורת כבידה זו כשלעצמה מתקבלת מתורת מיתרים מסוימת (אחת מחמש תורות הסופר-מיתר). ההצעה מוכרת כיום בשם **”ההשערה ההולוגרפית של מלדסנה”**.

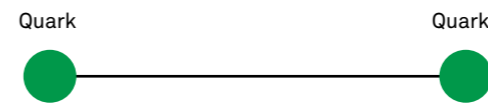
המושג ההולוגרפיה לקוח מתחום האופטיקה. ההולוגרפיה אופטית היא, בפשטות, טכניקת צילום המאכסנת תמונה תלת-ממדית על פני משטח דו-ממדי.

הרעיון של מלדסנה לא הוכח עד היום באופן מתמטי מסודר. הוא עבר בחינות תיאורטיות רבות, נעשו חישובים מורכבים מאוד באמצעות תורת הכבידה, ואלו הושוו לחישובים המתקבלים מתורת השדות (שהיא התורה הקונבנציונלית המטפלת בכוח החזק), ועל אף שהתיאוריה לא הוכחה, גם לא נמצאה כל סתירה בינה לבין התיאוריות המקובלות. לכן הצעתו של מלדסנה התקבלה על-ידי הקהילה המדעית. ככל שאנו מבינים, עולמנו בנוי מארבעה ממדים (שלושה ממדי מרחב וממד זמן אחד). כיצד ניתן לתאר עולם זה באמצעות עשרה ממדים? כדי לנסות ולהסביר את הצעתו של מלדסנה, עלי לתאר בקצרה מהי תורת הכוח החזק (שהיא תורת שדות הנקראת **כרומודינמיקה קוונטית**), מהי תורת המיתרים, וכיצד הציע מלדסנה לקשר בין השתיים.

נתחיל בתיאור תורת הכוח החזק. גרעין האטום מורכב מפרוטונים ומנויטרונים. חלקיקים אלו אינם יסודיים: הם בנויים מקוורקים. הקוורקים נמשכים זה לזה באמצעות חלקיקים אחרים, הקרויים **גלואונים**. כוח המשיכה הפועל בין הקוורקים קרוי הכוח החזק: הוא כולא את הקוורקים כך שלא ניתן להפרידם זה מזה. בנוסף לנויטרונים ולפרוטונים המורכבים משלושה קוורקים, קיימת משפחה נוספת של חלקיקים (שאינם מרכיבים את הגרעין), ואלה נקראים **מזונים**. המזונים מורכבים משני קוורקים, שגם הם כולאים יחד באמצעות הכוח החזק.

הניסיון להבין כיצד הקוורקים כולאים ואחוזים זה בזה, מעסיק את הפיזיקה התיאורטית זה כארבעה עשורים. הבנתנו את הכוח החזק הינה, לעת עתה, חלקית ומוגבלת. אנחנו מבינים היטב כיצד הכוח מושך את הקוורקים זה לזה כאשר המרחק ביניהם קצר מאוד, אך איננו מבינים בדיוק מדוע איננו מסוגלים לבודד אתם הקוורקים ולהפרידם זה מזה. במילים אחרות: איננו מבינים את תופעת כליאת הקוורקים במרחקים ארוכים יותר (מרחקים אלו, כ-10 בחזקת מינוס 15 מטר, עשויים להיחשב בעיני הקורא למרחקים קצרים, אך עבור הכוח החזק אלו מרחקים ארוכים).

מודל מסוים שמוצע לתיאור הכוח החזק במרחקים ארוכים, והוא רלוונטי לדיוננו, גורס שבין הקוורקים מתוחים מיתרים (שעשויים מגלואונים). מיתרים אלו הם בעלי מתיחות (כוח) עצומה, כמשקלו של פיל, שאינה מאפשרת את הפרדת הקוורקים. לדוגמה, נעיין באיור מס' 1, שבו מתואר מזון בודד על-ידי זוג קוורקים שביניהם מתוח מיתר. כמות האנרגיה שנושאת המערכת היא מתיחות המיתר כפול המרחק, דהיינו $E=TL$. כדי להרחיק את הקוורקים מרחק אינסופי זה מזה יהיה עלינו להשקיע כמות אנרגיה אינסופית, ולכן לא ניתן לבודד את הקוורקים.

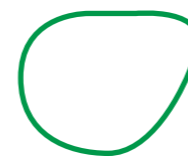


איור מס' 1 - מיתר פתוח המחבר שני קוורקים

זהו, אם כן, רעיון המיתרים. על-פי תורת המיתרים, האלמנטים הבסיסיים אינם נקודות, אלא עצמים חד-ממדיים - מיתרים - היכולים להיות פתוחים או סגורים (ראו איור מס' 2). המיתרים רוטטים בתדרים שונים בדומה למיתרי כינור, מתנגשים, ולעתים אף מתמזגים או נפרדים זה מזה (על התפתחות תורת המיתרים קראו במסגרת למאמר).

כפי שכתבתי (ותואר באיור מס' 1), ניתן להסביר את כליאת הקוורקים בעזרת מודל פשוט למדי של מיתרים פתוחים. למעשה, הקשר בין תורת המיתרים והכוח החזק המחבר את הקוורקים קיים כבר משנת 1968, עת פיזיקאי צעיר כבן 26 בשם **גבריאל ונציאנו**, שאך זה סיים את עבודת הדוקטורט שלו במכון ויצמן, גילה כי ניתן לתאר את הכוח המתקיים בין המזונים על-ידי ביטוי מתמטי פשוט ויפה, הנקרא **פונקציית בטא של אוילר**. ביטוי מתמטי זה הובן זמן קצר לאחר מכן כאינטרקציה בין מיתרים פתוחים (ראו איור מס' 3). כך החלה ההיסטוריה של תורת המיתרים כתיאוריה המתארת את הכוח החזק.

עד לשנת 1973 לא הועמדה כנגד תורת המיתרים אלטרנטיבה רצינית לתיאור הכוח החזק, אך היא סבלה ממספר בעיות קשות: התורה



close-string



open-string

איור מס' 2 - מיתרים פתוחים ומיתרים סגורים

”כדי לתאר את הכוח החזק בעולמנו הארבעה-ממדי (שלושה ממדי מרחב + זמן), עלינו להיעזר בתורת מיתרים בעלת עשרה ממדים. חמישה מתוכם הם ממדי מרחב, הנקרא מרחב אנטי דה-סיטר. מבלי לדייק (ואף לחטוא לאמת) ניתן לדמות ממדים אלו לכדור (או בלון). עולמנו מצוי על שפת הכדור, ואילו התהליכים הפיזיקליים מתרחשים בתוך הכדור עצמו”



איור מס' 3 - אינטרקציה בין מיתרים פתוחים

חייבה קיום של 26 ממדים, חזתה חלקיקים רבים שאינם קיימים בעולמנו, וסבלה מקיומו של חלקיק המתקדם במהירות שעולה על מהירות האור (טכיון). גרסה אחרת של תורת המיתרים, הדורשת עולם בן 10 ממדים, חזתה את קיומה של “סימטריית-על” שלא נצפתה בעולם. עקב בעיות אלו, ועל רקע התפתחותה של תיאוריה קונבנציונלית יותר הנקראת **כרומודינמיקה קוונטית - תורת הקוורקים והגלואונים**, נזנחה תורת המיתרים כתיאוריה של הכוח החזק למשך כ-25 שנה, עד להופעת מאמרו של מלדסנה שבו פתחנו.

משנת 1973 ואילך התבססה הכרומודינמיקה הקוונטית כתורת הכוח החזק המקובלת. הצטברו עוד ועוד עדויות ניסיוניות ותיאורטיות על כך, שהפרוטונים, הנויטרונים והמזונים מורכבים מקוורקים שנמשכים זה לזה על-ידי גלואונים. תורת הכרומודינמיקה הקוונטית חוזה תופעות בדיוקנות רבה כאשר המרחק בין הקוורקים קצר מאוד. חישובי הכוח בין קוורקים במרחקים קצרים, וכן ההדגמה כיצד הכוח החזק נחלש כאשר מקרבים את הקוורקים זה לזה, אף זיכתה את **גרוס, פוליצר ווילצ'ק** בפרס נובל לפיזיקה בשנת 2004. אולם, כאמור, תופעת הכליאה במרחקים גדולים ותופעות אחרות הקשורות לכוח החזק, עדיין אינן ניתנות להסבר פשוט על-ידי הכרומודינמיקה הקוונטית.

תורת המיתרים התפתחה במקביל, בכיוון שונה ובלתי צפוי. התברר שמיתרים סגורים דומים בהתנהגותם לגרוויטונים - החלקיקים האחראים לכוח הכבידה. בעזרת אינטרקציה הנישאת על-ידי מיתרים סגורים ניתן להסביר את תורת הכבידה של ניוטון, ואף

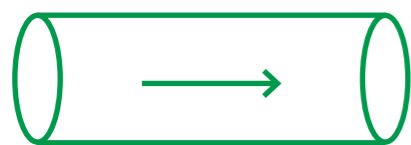
את תורת הכבידה של אינשטיין (תורת היחסות הכללית). תיאור פשוטי למדי של תורת מיתרים זו הוא, שכוח המשיכה הכבידתית נובע ממסירה (החלפה) של מיתרים סגורים בין כל שני עצמים (ראו איור מס' 4). על התפתחות תורת המיתרים כתורת כבידה קוונטית אני רוצה להרחיב מעט.

הסברי הכרומודינמיקה הקוונטית לכוח החזק, ובמקביל, התפתחות תורת המיתרים לתיאוריה בתחום כוח הכבידה, גרמו לחוקרי המיתרים לזנוח את המחקר בנושא כליאת הכוח החזק. ואז, בשנת 1997 מלדסנה הציע לפתע גרסה “משופרת” לקשר בין תורת המיתרים לבין הכוח החזק.

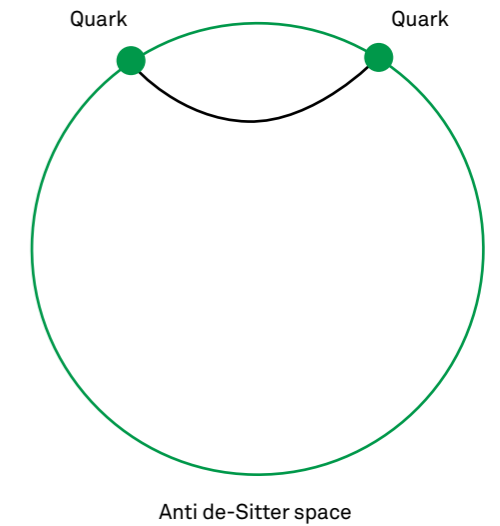
הגרסה החדשה כוללת בהכרח מרכיבים חדשים: כדי לתאר את הכוח החזק בעולמנו הארבעה-ממדי, עלינו להיעזר בתורת מיתרים בעלת עשרה ממדים. חמישה מתוכם הם ממדי מרחב, הנקרא מרחב אנטי דה-סיטר (על-שם המתמטיקאי ההולנדי וילם דה-סיטר). מבלי לדייק (ואף לחטוא לאמת) ניתן לדמות ממדים אלו לכדור (או בלון). מעתה ואילך אתעלם מחמשת הממדים הנוספים, שאינם חשובים לדיוננו (ובמקרים רבים אף אינם משחקים תפקיד בחישובים המדעיים המדויקים).

עולמנו מצוי על שפת הכדור, ואילו התהליכים הפיזיקליים מתרחשים בתוך הכדור עצמו. לפנינו אפוא תיאור הולוגרפי של הכוח החזק: תהליכי הטבע הארבעה-ממדי מתוארים באמצעות דינמיקה במרחב חמישה-ממדי, שהוא הכדור, בדומה להולוגרפיה אופטית, שבה אנו משליכים את התמונה התלת-ממדית על משטח דו-ממדי.

לשם המחשת הפיזיקה החדשה אתאר מספר חישובים הולוגרפיים. נניח שברצוננו לחשב את האנרגיה הנתונה בין שני קוורקים. נמקם



איור מס' 4 - אינטרקציה כבידתית על-ידי החלפת מיתר סגור



איור מס' 5 - מיתר פתוח מחבר שני קוורקים על שפת המרחב

שני קוורקים אלו על שפת מרחב אנטי דה-סיטר ("הכדור"), וביניהם נמתח מיתר פתוח מינימלי - כלומר, המיתר הקצר ביותר שיכול לחבר זוג קוורקים זה (איור מס' 5). מתברר שבמרחב אנטי דה-סיטר (שהוא עקמומי) יעדיף המיתר לצלול אל תוך עומקי המרחב - אל הממד החמישי. זוהי המחשה של העיקרון ההולוגרפי: על אף שהקוורקים נתונים על שפת המרחב החמישה-ממדי וממוקמים על מרחבנו הארבעה-ממדי, המיתר שבעזרתו אנו מחשבים את אנרגיית המערכת "חי" בחמישה ממדים.

חישוב אנרגיית המערכת פשוט למדי: היא נתונה על-ידי אורכו של המיתר. ניתן להראות שתופעת הכליאה מוסברת בקלות יחסית: בדומה למודל המיתרים הפשוטני, המתואר באיור מס' 1, מודל המיתרים ההולוגרפי מוביל למסקנה, שהאנרגיה היא מכפלת מתיחות המיתר באורכו. לפיכך לא ניתן להפריד זוג קוורקים זה מזה: האנרגיה שתידרש להפרדת קוורקים הנמצאים במרחק אינסופי זה מזה, היא אינסופית. זוהי גדולתה של ההולוגרפיה: בניגוד לכרומודינמיקה הקוונטית המקובלת, ניתן לגזור באמצעותה תוצאות מרשימות בפשטות יחסית.

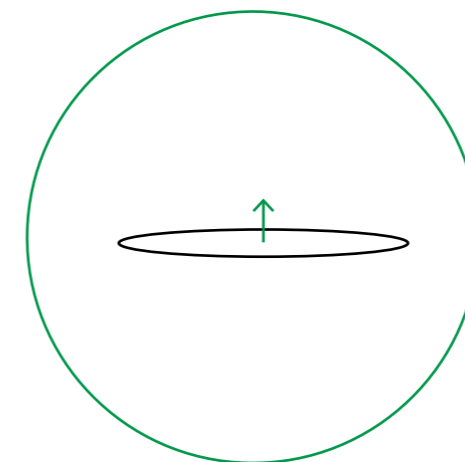
הבה נעיין בדוגמה נוספת. נניח שנוציב מיתר סגור במרכזו של מרחב אנטי דה-סיטר (או בהכללה, במרכזו של המרחב החמישה-ממדי שלנו, כמתואר באיור מס' 6). עכשיו נסובב את המיתר במהירות גדולה. בהשפעת הכוח הצנטריפוגלי המיתר יימעך ויתארך. ידוע כי מסתו של המיתר פרופורציונלית לאורכו. כעת ניעזר בקשר נוסף, הלקוח ממכניקה, שקובע כי התנע הזוויתי (גודל הקשור למהירות הסיבוב) פרופורציונלי למסה כפול האורך. שילוב שני הקשרים מוביל למסקנה, שעבור מיתר סגור זה, המסה בריבוע גדלה ביחס

ישר לתנע הזוויתי. הנוסחה שהגענו אליה כאן אכן נצפתה עבור מזונים בשנות השישים של המאה שעברה (והיא נקראת מסלול רג'ה, על-שם הפיזיקאי האיטלקי יליד טורינו, **טוליו רג'ה**).

התיאור הזה, שמערב פיזיקה תיכונית עם תורת המיתרים, מוביל למסקנה חשובה: אחד מעקרונות ההולוגרפיה קובע, **שמה שמתחולל עבור מיתרים סגורים בתוך המרחב החמישה-ממדי קשור לתופעות פיזיקליות בעולמנו הארבעה-ממדי**. מיתרים סגורים (או פתוחים) שמסתובבים קשורים באמצעות ההולוגרפיה לחלקיקי הכוח החזק, כדוגמת המזונים שהזכרנו.

מאז פרסום המאמר של מלדסנה נכתבו על הנושא יותר מ-6,000 מאמרים. התחום התפתח במספר כיוונים. חלקם של המאמרים ניסו לאושש את ההשערה ההולוגרפית. כאמור בתחילת מאמר זה, בדיקות מדוקדקות של ההשערה ההולוגרפית לא העלו שום סתירה. נהפוך הוא: אישוש ההשערה בבדיקות רבות הוביל להתקבלות בקרב הקהילה המדעית.

חלק אחר של המאמרים נועד ליצור קשרים הולוגרפיים נוספים בין תורות מעולם החלקיקים לתורות כבידה. המוטיבציה העיקרית היא לקבל מודל קרוב ככל האפשר לתיאור מהימן של הכוח החזק עבור מרחקים ארוכים, שבהם מתרחשת תופעת הכליאה. אחד הקשרים המעניינים שהתגלו הוא, שעל מנת לתאר את הכוח החזק בטמפרטורות גבוהות, שבהן חלקיקי הכוח החזק נמסים למרכיביהם, עלינו להשתמש במרחב חמישה-ממדי שמכיל בתוכו חור שחור. זהו קשר הולוגרפי מרתק בין פיזיקה של חורים שחורים חמישה-ממדיים לבין תופעות הקשורות בטמפרטורות גבוהות בעולמנו.



Anti de-Sitter space

איור מס' 6 - מיתר סגור סובב במרחב "אנטי דה סיטר"

בנוסף, לאחרונה התרחבה הפיזיקה ההולוגרפית לכיוון הפיזיקה של החומר המעובה: בעזרת תיאור הולוגרפי מנסים פיזיקאים להבין תופעות סבוכות בתחום העל-מוליכות. זהו תחום חשוב בפיזיקה של חומרים בעלי התנגדות חשמלית אפסית. שיטות אנליטיות "קונבנציונליות" נתקלו בקשיים, והתקווה היא שההולוגרפיה תוכל לשפוך אור חדש על תחום מרכזי זה.

פריצת הדרך של מלדסנה הובילה לשינוי תפיסתי בפיזיקה התיאורטית. תיאור מסובך בעזרת פיזיקה "סטנדרטית" בארבעה-ממדים ניתן היום לפישוט רב בעזרת תיאור במרחב בעל חמישה ממדים.

התיאור ההולוגרפי של הפיזיקה של הכוח החזק הזכיר לפיזיקאי הדגול **אלכסנדר פוליאקוב** את משל המערה של אפלטון. במשל רואים יושבי המערה את הצללים שעל קיר המערה ומדמים לעצמם, בבערותם, שזוהי המציאות. אולם המציאות העמוקה יותר היא, כמובן, תופעות הטבע אשר יוצרות את הצללים. כך גם בהולוגרפיה: תופעות הכוח החזק ניתנות לתיאור פשוט בעזרת המרחב החמישה-ממדי. התמונה המתקבלת משתקפת בעולמנו הארבעה-ממדי על-ידי השלכת התהליכים הפיזיקליים של תורת

המיתרים על שפת ה"כדור" (מרחב אנטי דה-סיטר). תמונה זו נראית, כמובן, מורכבת למדי. עד לפרסום מאמרו של מלדסנה נדמה היה לאנשים הצופים שהם רואים תופעות, בעוד שלמעשה הם ראו את הצללים המשתקפים מממדים אחרים שהם, בעצם, מקור התופעות! כיצד אנו צריכים אפוא לפרש את תמונת ההולוגרפיה? האם עלינו

42 שנות התפתחות תורת המיתרים

כאמור בגוף המאמר, לידתה של תורת המיתרים במאמרו של **גבריאל ונציאנו** משנת 1968. זמן קצר לאחר פרסום מאמר זה הבינו הפיזיקאי היפני הדגול **יויצ'ירו נמבו**, חתן פרס נובל לפיזיקה לשנת 2008, ומדענים אחרים, שהנוסחה של ונציאנו מתארת אינטרקציה בין מיתרים פתוחים. ההכללה למיתרים סגורים נעשתה מייד לאחר מכן.

כך נוצרה תורת המיתרים הראשונה, שנקראה "תורת המיתרים הבחזנית". עוד בחיתוליה התברר שתורה זו היא בעייתית. היא חוזה חלקיק טכיוני - כלומר, חלקיק הנע אחורה בזמן. כמו כן, היא חוזה חלקיק חסר מסה בעל תנע זוויתי כפול משל הפוטונים (חלקיקי האור) - חלקיק שמעולם לא נצפה. ולבסוף, התורה מחייבת את קיומם של 26 ממדים.

הפיזיקאי **פייר רמנד** גילה בשנת 1971 שניתן ליצור תורות מיתרים אחרות, שנקראות כיום "תורות מיתרים סופרסימטריות". תורות אלה מוותרות על החלקיק טכיוני, אך עדיין הן מצריכות 10 ממדים. בשנת 1974 כתבו הפיזיקאים **יואל שרק וג'ון שוורץ** מאמר נועז: הם הציעו שהחלקיק חסר המסה, בעל הספין (תנע זוויתי פנימי) הכפול ביחס לפוטון, הוא הגרוויטון! כלומר, הם הראו שמתורת המיתרים הקוונטית מתקבלת תורת היחסות הקלאסית של אינשטיין. אי לכך הם הציעו לזנוח את תורת המיתרים כתורה של הכוח החזק ולאמצה כתורה בסיסית של גרוויטציה קוונטית. כדי לפתור את בעיית הממדים הנוספים הם הציעו מכניזם, שבו הממדים המיותרים הם כה מכורבלים וקטנים, שלא ניתן לצפות בהם.

בשנות השבעים פינתה תורת המיתרים את הבמה לתיאוריית הכרומודינמיקה הקוונטית, ורק קומץ פיזיקאים המשיך לעבוד עליה. פריצת הדרך החשובה מכול, לפחות מבחינה היסטורית, הייתה בראשית שנות השמונים. **מייקל גרין וג'ון שוורץ** הראו שמכניזם מורכב ויפה (הנקרא היום מכניזם גרין-שוורץ) מאושש את תורת המיתרים הסופרסימטרית כתורה עקבית של גרוויטציה קוונטית. מרגע זה השתכנעה קהילת הפיזיקאים שתורת המיתרים היא התורה העקבית היחידה לתיאור גרוויטציה קוונטית. רבים זנחו את עבודתם הקודמת והחלו לעבוד על תורת המיתרים.

בעקבות זאת הופיעו באמצע שנות השמונים מספר תורות מיתרים סופרסימטריות לתיאור כל החלקיקים היסודיים בטבע (!), שנראו ריאליסטיות. סך-הכול ידועות היום חמש תורות מיתרים סופרסימטריות, וכולן מחייבות 10 ממדים. בשנת 1995 איחד הפיזיקאי מתמטיקאי החשוב **אדוארד ויטן** את כל חמש תורות המיתרים, ואף גרס שכולן קשורות לתורה אחת-עשר-ממדית.

כיום, הקהילה המדעית חצויה בין אלה הסבורים שתורת המיתרים היא-היא התורה המתארת גרוויטציה קוונטית, לבין אלה המפקפקים בכך. כמו בכל תחום אחר בפיזיקה, רק הניסיון יכול להפריך או לאושש את התורה. ההנחה השמרנית הרווחת היא שככל הנראה, אין בידינו לבחון כרגע (באמצעות הכלים הניסויים העומדים לרשותנו) את תורת המיתרים, ולכן ייתכן שניאלץ להמתין שנים רבות עד לאישושה או להפרכתה כתורה יסודית של הטבע. כל זאת אינו גורע מיכולתה של תורת המיתרים לשמש ככלי חשוב בהבנתו של הכוח החזק.

לקבל את הפיזיקה החדשה ככלי - כלומר, לקבל את ההולוגרפיה כאמצעי חישובי ותיאורטי בלבד - או שמא עלינו ללכת צעד נוסף ולדמות, שאנו אכן חיים בעולם שבו חמישה ממדים? ■