

יקום על מיתר (Universe on a string)

רם ברושטיין (Ramy Brustein) – אוניברסיטת בן גוריון, באר שבע
דה-אלויס (Senarath P. de Alwis) – אוניברסיטת קולורדו, בולדר (Boulder), קולורדו

לכל תורות המיתרים המקובלות היום חסר נתון בסיסי – מהי המסה (או הגודל) של אותם מיתרים מהם מורכב כל העולם החומרי. בשל היות המיתרים כה זעירים, לא סביר שבעתיד הנראה לעין נוכל "לייצר" מיתרים במאיץ חלקיקים ובמעבדה. כאן נחלץ לעזרתנו היקום – המעבדה הגדולה מכולן. ברושטיין ודה אלויס מנסחים מחדש את הדרישות מתורות המיתרים כך שישתלבו בקוסמולוגיה המודרנית. אחרי השילוב, הם מוצאים את הקשר ההכרחי בין הפוטנציאל המתאר את המיתרים לבין מדידות הקרינה הקוסמית והקבוע הקוסמולוגי.

התיאוריה של הכל (Theory of everything)

אבן האלכימאים של הפיסיקאים היא "התיאוריה של הכל", תורה שתתאר בתמציתיות ובנאמנות את כל ההיבטים המוכרים של החלקיקים השונים בטבע והאינטראקציות ביניהם. ואולם כשתימצא התורה הזאת, כיצד נוכל לבחון את תקפותה? כיצד נדע אם זו אכן תורה ראויה לשמה, או שמא היא מלאה טעויות כרימון וכל שתתאר הן ידיעותינו המוגבלות אודות העולם החומרי שסובב אותנו?

הפיסיקה של המאה העשרים התקדמה בצעדים מדודים אל עבר המטרה. ראשית לכל זוהו כל הכוחות המוכרים בטבע, כוח הכבידה, הכוח האלקטרו-מגנטי והכוחות הגרעיניים החזק והחלש. בד בבד זוהו החלקיקים השונים שמהם מורכבים בני האדם, הפלנטות, הכוכבים ומה שביניהם. כבר תוך כדי הזיהוי המפורט ניסו הפיזיקאים לחשוף את הקשרים הסמויים שבין החלקיקים ובין הכוחות; איזה חלקיק מתפרק לאילו חלקיקים, איזה כוח הוא דמות (manifestation) אחת בחבורת כוחות מאוחדת. במאה העשרים הצליחו הפיסיקאים להראות שהכוח האלקטרו-מגנטי (הוא שמחזיק את האטומים יחדיו) והכוח הגרעיני החלש (הוא שמחזיק את הנויטרון לבל יתפרק) הם בעצם שתי פנים לכוח אחד – הכוח האלקטרו-חלש. בתיאוריה שנקראת "המודל הסטנדרטי" הצליחו הפיסיקאים להקים מבנה מתמטי מפואר שבו צורף גם הכוח הגרעיני החזק לשני הכוחות המאוחדים. "סטנדרטי" ככל שיהיה, גם במודל זה חסרות עדיין לְבָנִים רבות, שהחשובה בהן היא חלקיק ההיגס (Higgs) שחלקיקאים בכל מעבדות המחקר בעולם עמלים למצואו. אבל עדיין נותר כוח הגרביטציה בודד, ללא יכולת לשדכו עם אף אחד מהכוחות האחרים. הגרביטציה, שלא ככוחות האחרים, קובעת את הזירה בה חיים החלקיקים ובה באים לידי ביטוי שאר הכוחות בטבע. בנבדל מהכוח החשמלי למשל, שמורגש רק על ידי חלקיקים הטעונים מטען חשמלי, כל החלקיקים בעולם חשים את כוח הגרביטציה. אלא שככל שהולכים לחלקיקים יותר ויותר קטנים כך קשה יותר לייחס להם גודל פסי מוגדר והדרך לטפל בהתנהגות שלהם היא תורת הקוונטים ולא המכניקה הניוטונית שאנחנו אוהבים להשתמש בה לתיאור כדורים נופלים וגופים מחליקים.

ניסיונות רבים של איחוד בין כוח הכבידה, המתואר על ידי תורת היחסות הכללית של איינשטיין, לבין שלושת הכוחות האחרים – עלו בתוהו. תפנית חלה כאשר ויתרו הפיסיקאים על תיאור החלקיקים היסודיים כחלקיקים נקודתיים ופנו לתיאורם תחילה כמיתרים (חד-מימדיים) ולבסוף כיריעות (manifolds, membranes) בעלות יותר מימדים. תורות המיתרים הנוכחיות מתוארות כתורות הדרות במרחב שמכיל יותר מימדים מהשלושה המוכרים לנו מחיי היום יום - Z ו Y, X (ומימד הזמן). שישה מימדים נוספים גויסו כדי לקיים את מה שנקרא בשפת הפיסיקאים "שימור סימטרייה", הגישה שאותם חוקי פיסיקה תקפים במערכות ייחוס שונות ושחלקיקים כולם הם רק ביטויים של אותם מיתרים-יריעות בדיוק. אם ברצוננו להציג את כל הכוחות הקיימים כהיטלים, צללים של כוח אחד, חיוני לדרוש שהכוח הזה משוכן במרחב רב מימדי. כדי ליישב את הניסיון היום יומי שלנו של שלושה מימדי מרחב עם עשרת המימדים, צריך להיפטר מהמימדים הנוספים. התעלול הזה מתבצע באמצעות ההכרזה כי המימדים הנוספים הם "מכורבלים" (compactified) - הם קיימים רק בסקאלות קטנות בהרבה מסקאלות היום-יום, הם סגורים בתוך עצמם ולנו אין גישה אליהם. הדבר דומה לתיל דק שממרחק נראה לנו חד מימדי ורק מקרוב מאוד ניכר שיש לו גם הקיף – מימד מכורבל.

עד 1995 מצאו הפיסיקאים חמש תורות מיתרים שונות שעונות על הדרישות הללו. ריבוי התורות לא היטיב עם הקהילה, בהפוך הוא. חוסר היכולת להכריע בין נכונות תיאוריה אחת וטעות השנייה תיסכל את כל מי שעסק בניסיונות לנסח תורת מיתרים. ההקלה באה כשהתברר שחמשת התורות הן פנים שונות לתיאוריה אחת כוללת-כל ה M - theory ששמה בא כנראה מהממברנות הרב מימדיות שתפסו את מקום המיתרים הדקים. מטבע הדברים, מאחר שהחלקיקים המוכרים אמורים להיות ביטויים של המיתרים, גודל המיתרים עצמם קטן מגודלם של החלקיקים. עד כמה קטנים המיתרים - בכך מתחבטים המדענים יום יום. ברושטיין ודה אלוויס פנו למקום שלכאורה הוא הכי פחות צפוי כדי לברר שאלה זו, בדיעבד מסתבר שזהו המקום המתאים ביותר.

מהקטן לגדול

כדי לנסות ולאשש או להפריך את תיאוריות המיתרים יש צורך לחפש זירת ניסויים שמטפלת בחלקיקים קטנים בהרבה מאלה שנבחנים במאיצי חלקיקים. הזירה הזאת, עד כמה שהדבר נשמע מוזר, היא הסקאלה הגדולה ביותר שאנחנו מכירים - הקוסמולוגיה - התורה הפיסיקאלית המנסה לתאר את היקום כולו. הודות לשתי סיבות אנו מוצאים שהקוסמולוגיה יפה לבחינת תיאוריות הממברנות החדשות. הסיבה האחת היא ההקבלה בין גודל החלקיק לאנרגיה. ככל שיוצרים עמוק יותר לחלקיקים היסודיים של החומר יש לעלות באנרגיה. עוצמת הקשר בין החלקיקים בסקאלות קטנות היא גדולה יותר, כדי לפרק קשר חזק יש צורך בהשקעת אנרגיה גדולה. אנרגיה כזו יכולה להיות למשל מהירויות החלקיקים, או המייצגת של מהירויות אלה בצבר של חלקיקים - הטמפרטורה. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר כן האנרגיה לחלקיק גדולה יותר והוא יכול לנתק את הקשר בינו לבין שאר החלקיקים. כיון שתיאורית המפץ הגדול הקוסמולוגית גורסת שהיקום היה פעם קטן בהרבה וחם בהרבה מאשר הוא היום, הרי שהייתה קיימת נקודה בזמן בה הטמפרטורה של היקום היתה גבוהה דיה עד כדי כך שהמיתרים לא עוד הרכיבו חלקיקים אלמנטריים אחרים אלא היו חלקיקים חופשיים, לא קשורים. אם אופי המיתרים מהתקופה ההיא השאיר את חותמו על דמות היקום עד ימינו, נוכל לחפש עדויות אלה ולהסיק מהן על אופי המיתרים. הסיבה השנייה שבעטיה הקוסמולוגיה יכולה להיחלץ לבדיקת תקפותן של תיאוריות מיתרים היא המרחב הגדול שהיקום אוצר בקרבו. המרחב הזה ריק ברובו, כמעט לחלוטין. אלא ש"ריק" בתורת המיתרים (כמו בכל תיאורית חלקיקים אחרת) לא בהכרח אומר ריק מאנרגיה. ייתכן מאוד, גורסות התיאוריות הנ"ל, שגם הריק (ואקום) אוצר בחובו אנרגיה. האנרגיה של האקום עשויה להיות קטנה מאוד (ליחידת נפח) ולכן צריך "לאסוף" נפח גדול מאוד כדי שנחוש בהשפעתה. היקום הוא המעבדה הטבעית בה מצוי נפח גדול כל כך. מכיון שהדרך בה היקום מתפתח ("הדינמיקה של היקום") נקבעת על פי האנרגיה והחומר המצויים בו, יקום שבו לריק יש אנרגיה מתנהג ומתפתח בצורה שונה מאוד מיקום שבו אין לריק אנרגיה. מדידות קוסמולוגיות מצביעות על הצורה בה היקום מתפתח, מסיקות מהם הערכים האפשריים של האנרגיה של הריק (או בכינוייה הקוסמולוגי "הקבוע הקוסמולוגי") ובכך מציבות אתגר לתיאוריות מיתרים. כל תיאוריה ששואפת להסביר את תופעות הטבע כולן תצטרך להתמודד עם הערכים הנמדדים של הקבוע הקוסמולוגי ולנבא אותם, או לפחות לא לשלול אותם. ואולם הקשר בין תיאוריות המיתרים, שמחושבות כדי להסביר סקאלות זעירות בהרבה מסקאלת היקום, לבין ערכים קוסמולוגיים המנובאים מהן, קשר זה הוא מורכב ואינו פשוט להסקה.

קבועים משתנים

ברושטיין ודה אלוויס הבינו שכדי לפצח את הקשרים הסמויים בין ההצעות של תורות המיתרים לבין הקוסמולוגיה, יש תחילה לנסח היטב את השאלות הנשאלות, ובמדויק. מספר מכשלות עמדו בדרכם. הראשונה הייתה ריבוי תורות המיתרים (חמש) שאף כי התברר שהן כולן היבטים של תורה אחת ויחידה, עדיין כדי לקשר אותן לעולם הפיסיקאלי יש לעסוק באחת מהן. כדי לעקוף מכשלה זו מצאו החוקרים דרך בה מתעלמים מהפרטים הקטנים (והשונים) בכל אחת מגרסאות תורות המיתרים ומתמקדים רק במשותף לכולן - בתמונה הגדולה (big picture) שה M - theory מתארת. זוהי הכוללות של תורת המיתרים (String universality). יש לנפות ולהחליט מה נשאר בתמונה הגדולה ומה מיותר בהקשר לשאלות שעומדות על הפרק.

המכשלה השנייה עמה התמודדו ברושטיין ודה אלוויס היא השוני בין הכבידה כמו שאנחנו מכירים אותה מאיינשטיין ותורת היחסות הכללית שלו, לבין הכבידה כפי שבאה לידי ביטוי במסגרת תורת המיתרים. לפיסיקאים יש מספר דרישות מתורת כבידה כדי שזו תתקבל כסבירה. אחת מהדרישות היא שאפשר יהיה לעבור מכל מערכת ייחוס אחת למערכת ייחוס שנייה במהירות קבועה, או מואצת ביחס לראשונה. כדי שהדרישה הזאת תתקיים, צריך לשנות במקצת את תורת הכבידה הרגילה. מהשינוי נובע שקבוע ניוטון, אותו G מפורסם שקובע כמה חזקה תהיה המשיכה בין שני גופים מסיביים הנמצאים במרחק קבוע זה מזה, אם כן אותו קבוע חדל מלהיות קבוע!

מצב שכזה איננו רצוי כלל ועיקר. הרי ממדידות ידוע לנו שתורת ניוטון ואיינשטיין מתארות כהלכה את הכבידה הן בטווחים קטנים (במעבדה), הן במערכת השמש והן בין הגלקסיות וביקום כולו. לכן השאיפה היא למצוא את אותו אזור בתורת המיתרים שבו קבוע ניוטון הוא אכן קבוע. שיקולים דומים מובילים לדרישה שההקשר לקבוע המבנה הדק שקובע את חוזק הקשר באטומים.

ברושטיין ודה אלוויס שואלים את השאלה הבאה: איך אפשר לקחת את תיאוריות המיתרים, להתעלם מפרטיהן, למצוא מהי תורת השדות שמתארת אותן באופן כללי ולגזור את הדרישות שעל תורה זו לקיים כדי שקבועי הפיסיקה שיתקבלו ממנה אכן יהיו קבועים כנדרש. התשובה לשאלה זו הוצגה על ידם בשורת מאמרים.

מיתרים וקרינה קוסמית

בעקבות הניסוח המדויק של הבעיה, התקדמו ברושטיין ודה אלוויס והצליחו לקשור את התורות הללו לתרחישים ידועים ומוכרים בקוסמולוגיה, וחשוב מכך - לניבויים שהתרחישים האלה מעלים. את הניבויים אפשר לעמת מיידית עם נתונים תצפיתיים קיימים, או כאלה שיתקבלו בעתיד הקרוב מאוד. כיצד מתבצעת קשירת קטנות המיתרים לתצפיות שמימיות?

בפיסיקה המודרנית עבר זמנו של ניסוח המציאות הת-אטומית כצבר של חלקיקים. במקום תיאור כזה, מחשבים בכל נקודה במרחב ובזמן "שדה". מן ה"שדה" מוצאים את הסיכוי להמצאות חלקיק בזמן ומקום מסוימים, בהינתן ערכי כל שאר השדות (מה שהיינו קוראים שאר סוגי החלקיקים והאינטראקציות ביניהם). לא פקדי מזכיר הניסוח הזה את השדה החשמלי הישן והטוב או את שדה הכבידה. כשם שהללו יכולים להיות מתוארים על ידי אנרגיה שבכוח - "פוטנציאל", כך מתארים בפיסיקה המודרנית את כל החלקיקים הקיימים, כולל המיתרים. לכן, במקום לשאול מהי מסת המיתר, או הגודל שלו, או באילו אינטראקציות הוא משתתף, אפשר לשאול באופן תמציתי "מהו תיאור השדה של המיתר". תיאור בהקשר זה פירושו פונקציה מתמטית.

בקוסמולוגיה המודרנית לוקחים את השדות, משכנים אותם במרחב היקום המתפשט ושואלים כיצד הם מתפתחים בזמן. כזכור, זמנים מוקדמים ביקום פירושו יקום קטן יותר, חם יותר ולפיכך יקום שמכיל שדות אנרגטיים יותר (בדומה למוזכר ביחס לחלקיקים הקטנים המיוצגים על ידי השדות האלה). בשפה פשוטה - שואלים מה הייתה התנהגות המיתרים כאשר הטמפרטורה של היקום הלכה וירדה - למה הם התפרקו (ובאיזה קצב), מה היה הסיכוי למצוא ריכוז של מיתרים במקום אחד ואזור ריק יחסית ממיתרים במקום אחר וכולי. שאלות אלה ביחס למיתרים אינן אקדמיות גרידא כי אם קשורות קשר הדוק להמשך התפתחות המבנים (structures) ביקום. היקום כפי שהוא נגלה לנו היום הוא השתקפות מועצמת של "סידור" המיתרים ההתחלתי. במקום (גדול דיו) שם היו מרוכזים מיתרים רבים נצפה למצוא גלקסיה או צביר גלקסיות. הבעיה היא שההשתקפות הזאת, של סידור המיתרים ההתחלתי בסידור הנוכחי של הגלקסיות, הולכת ומטשטשת בחלוף הזמן, והרי הגלקסיות שסביבנו נוצרו רק מיליארדי שנים לאחר המפץ. לכן נוח בהרבה להשוות את סידור המיתרים לתמונה שנוצרה רק כחצי מיליון שנים אחרי שהמיתרים חדלו להיות חלקיקים חופשיים. תמונה כזו מספקת קרינת הרקע הקוסמית על אזוריה החמים יותר והחמים פחות. טמפרטורת קרינת הרקע מתורגמת מיידית לפוטנציאל גרביטציוני, הפוטנציאל מושפע מריכוז המיתרים, וכך נקשרו הקצוות. עבור כל פוטנציאל נתון של המיתרים, מצאו ברושטיין ודה אלוויס מה תהיה התמונה שתתקבל על כפת השמיים מקרינת הרקע הקוסמית.

מאז החלו להתקבל מדידות מפורטות של קרינת הרקע הקוסמית בשני העשורים האחרונים, ויותר מכך בזכות המדידות המצופות בעשור הבא עלינו לטובה, לא מדובר עוד בתיאוריה בלבד. המתאם (correlation) בין

טמפרטורת הקרינה הקוסמית באזורי שמיים סמוכים, מלמדת על ה"ספקטרום של הקרינה" וזה קשור קשר הדוק להפרעות הקטנות (fluctuations, perturbations) בסידור ההתחלתי של המיתרים, דהיינו בשדה שלהם. כזכור השדה אוצר בחובו אינפורמציה על מסת המיתרים והאינטראקציות בהן הם משתתפים.

המתודה של קישור הקבוע הקוסמולוגי לתורת המיתרים דומה, וברושטיין ודה אלוויס מיישמים אותה בימים אלה במסגרת הרחבת מחקרם. יש עדויות קוסמולוגיות משדה האסטרופיסיקה כי הקבוע הקוסמולוגי, אותה רמת אנרגיה שגם ריק גמור מכיל בתוכו, איננו אפס. מהצד השני, גרסאות שונות של תורות מיתרים מנבאות קבוע קוסמולוגי מתאפס, או קבוע גדול בהרבה מהערך הנצפה שלו. המתודה בה נקטו ברושטיין ודה אלוויס כדי לבודד את תורות המיתרים הרלבנטיות שנותנות קבועי טבע שהם אכן קבועים, משמשת גם כאן. יש למפות את מרחב הגרסאות של תורות המיתרים כדי למצוא באיזה מהן יש בכלל אפשרות לכיוונון עדין (fine tuning) של הקבוע הקוסמולוגי, כיוונון שיאפשר את קבלת הערך הנצפה.

הזיקה בין תורות המיתרים לבין הקוסמולוגיה עשויה להתברר כמועילה לשני הצדדים כאחד. הקוסמולוגיה תנסה להבין איך היקום מתפתח ממש ברגעיו הראשונים, התפתחות שקובעת במידה רבה גם את דמותו היום, בעוד שתורת המיתרים תהפוך בוודאות לתיאוריה מדעית שיש בצידה ניבויים ותחזיות שעשויים להיות מופרכים בתצפית או ניסוי. בכך יועלה מעמדה של תורת המיתרים והיא תחזל להיות בת מתמטית חורגת בעולם הפיסיקה ותיהפך לחברה מן המניין.