

מסע בזמן – איך לבנות מכונת זמן / פול דייוויס

נכתב בתאריך 30 מרץ, 2003 בשעה 12:14 מאת סיינטיפיק אמריקן ישראל

לא קל, אבל אפשרי

המסע בזמן היה ועודנו נושא פופולרי במדע הבדיוני, מאז חיבר ה"ג וולס את ספרו המפורסם מכונת הזמן ב-1895. האומנם אפשר לעשות זאת? האם אפשר לבנות מכונה שתסיע אדם אל העבר, או אל העתיד?

במשך עשרות שנים נמצא המסע בזמן מחוץ לתחומי המדע המכובד, אבל בשנים האחרונות החלו כמה פיסיקאים לעסוק בנושא זה, בינם לבין עצמם. יש לעיסוק הזה היבט בידורי – פשוט, נחמד לחשוב על מסע בזמן. אבל יש למחקריהם גם צד רציני. הבנת היחס בין סיבה ומסובב היא נדבך חשוב בניסיונות לבניית תיאוריה מאוחדת של הפיסיקה. אם המסע הבלתי-מוגבל בזמן אפשרי בכלל, אפילו עקרונית, יש בכך כדי להשפיע במידה ניכרת על צביונה של תיאוריה מאוחדת כזו.

הבנתנו המעמיקה ביותר את הזמן נובעת מתורות היחסות של איינשטיין. לפני הולדתו נחשב הזמן בעיני רבים מוחלט ואוניברסלי, זהה לכל אחד ואחד בלי כל תלות בנסיבותיו הפיסיקליות. אך בתורת היחסות הפרטית שלו קבע איינשטיין כי מדידת מרווח הזמן בין שני אירועים תלויה באופן תנועתו של המשקיף. הנקודה החיונית היא ששני משקיפים הנעים בדרכים שונות יחושו מרווחי זמן שונים בין אותם שני אירועים עצמם.

התוצאה מתוארת על-פירוב כ"פרדוקס התאומים". נניח שסאלי וסם הם תאומים. סאלי נכנסת לחללית וטסה במהירות גבוהה לכוכב סמוך, מקיפה אותו וחוזרת לכדור הארץ. סם, לעומת זאת, נשאר בבית. מבחינתה של סאלי, מסעה עשוי להימשך שנה אחת, נאמר, אך כשהיא שבה ויוצאת מהחללית, היא מגלה שחלפו 10 שנים בכדור הארץ. אחיה התאום מבוגר ממנה עכשיו בתשע שנים. סאלי וסם אינם עוד בני גיל אחד, אף-על-פי שנולדו באותו יום. למעשה, סאלי דילגה בתשע שנים אל עתידו של כדור הארץ.

פער סילוני

זהו תוצא (אפקט) התרחבות הזמן, המתרחש כל אימת ששני משקיפים נעים זה ביחס לזה. בחיי היומיום איננו מרגישים בעיוותי-זמן משונים כאלה, משום שהתוצא מתחיל לבלוט רק כשהמהירות התנועה קרובה למהירות האור. אפילו במהירויות של מטוסים, התרחבות הזמן בטיסה רגילה מסתכמת רק בכמה ננו-שניות – איש לא יאמר שזו הרפתקה נוסח ה"ג ולס. ובכל זאת, השעונים האטומיים מדויקים די הצורך לתעד את ההיסט ולאשר כי הזמן אכן התמתח עקב התנועה. ובכן, המסע אל העתיד הוא עובדה מוכחת, גם אם מידתו אינה מסעירה את הדמיון.

על-מנת לחזות בעיוותי-זמן דרסטיים, יש לחרוג אל מעבר למסגרתה של ההתנסות היומיומית. מאיצי חלקיקים גדולים יכולים להאיץ חלקיקים תת-אטומיים לקרבת מהירות האור. אחדים מהחלקיקים האלה, המואזנים למשל, מצוידים בשעון פנימי משלהם, משום שזמן מחצית-החיים שלהם עד להתפרקות ידוע בדיוק; ואכן נצפו במאיצי מואזנים מהירים שהתפרקו בהילוך מואט, כפי שמחייבת תורת איינשטיין. כמה קרניים קוסמיות מפגיות אף הן עיוותי-זמן מרשימים. חלקיקים אלה נעים במהירות כה קרובה למהירות האור, עד שהם חוצים את הגלקסיה בדקות ספורות, מבחינתם, גם אם הדבר נמשך רבבות שנים במסגרת הייחוס של כדור הארץ. אלמלא היתה מתרחשת התרחבות הזמן, חלקיקים אלה כלל לא היו מגיעים לכאן.

המהירות היא אחת הדרכים לדילוג קדימה בזמן; הכבידה מציעה דרך נוספת. בתורת היחסות הכללית שלו ניבא איינשטיין כי הכבידה מאיטה את הזמן. שעונים נעים קצת יותר מהר בראש מגדל מאשר במרתף, הקרוב יותר למרכז כדור הארץ ולפיכך מצוי עמוק יותר בשדה הכבידה שלו. בדומה

לכך, שעונים נעים מהר יותר בחלל מאשר על הקרקע. שוב, זהו תוצא זערוּר, אבל הוא נמדד במישרין בשעונים מדויקים. למעשה, מערכת המיקום הגלובלית (GPS) חייבת להביא בחשבון את עיוותי-הזמן הללו. אלמלא כן היו הספנים, נהגי המוניות וטילי השיוט מוצאים את עצמם במרחק של קילומטרים רבים ממחוז חפצם.

על פניו של כוכב נייטרונים, הכבידה חזקה עד-כדי-כך שהיא מאיטה את הזמן בכ-30 אחוז, יחסית לזמן הארצי. במבט מוכב כזה, האירועים יראו כמו בסרט וידיאו שהורץ במהירות קדימה. חור שחור מייצג את עיוותי-הזמן העילאי; על-פני חור כזה הזמן עומד מלכת, יחסית לכדור הארץ. פירוש של דבר הוא שאם תיפלו בשוגג לחור שחור ממקום סמוך לו, ותגיעו אל פניו בתוך זמן קצר מבחינתכם, תימשך הנפילה הזאת לנצח מבחינתו של שאר היקום. האיזור שבתוך חור שחור נמצא אם כן מעבר לקצה הזמן, עד כמה שהדבר נוגע ליקום שמחוצה לו. אילו היה אסטרונאוט יכול לחלוף ביעף בקרבה רבה לחור שחור ולחזור בלי-פגע – ויש להודות שזו משוגת דמיון, ולא רק איוולת מסוכנת – הוא ידלג הרחק אל העתיד.

ראשי סחרחר עלי

עד כה דיברתי על מסע בזמן קדימה, אל העתיד. מה על חזרה אחורה, לעבר? זה עניין הרבה יותר בעייתי. ב-1948 הציג קורט גדל, במכון למחקר מתקדם בפרינסטון שבניו ג'רזי, פתרון למשוואות שדה הכבידה של איינשטיין המתאר יקום מסתובב סביב ציר. ביקום כזה יכול אסטרונאוט לנוע במרחב ולהגיע אל העבר שלו עצמו. הסיבה נוגעת להשפעת הכבידה על האור. סיבוב היקום יגרור את האור (ועמו את היחסים הסיבתיים בין גופים) סביב יחד עמו, ויאפשר לחפץ חומרי לנוע בלולאה סגורה במרחב, שהיא גם לולאה סגורה בזמן, בלא שיעבור בשום שלב את מהירות האור בסביבתו הקרובה של החלקיק. הפיסיקאים פטרו את פתרון גדל במשיכת כתפיים, כקוריוז מתמטי – אחרי ככלות הכול, התצפיות לא גילו שום סימן לכך שהיקום בכללותו מסתובב על ציר. אף-על-פי-כן, תוצאת גדל שימשה כהוכחה לכך שתורת היחסות אינה אוסרת על מסע אחורה בזמן. ואכן, איינשטיין התוודה שמדאיגה אותו המחשבה על כך שתורתו עשויה להתיר מסע אל העבר בנסיבות מסוימות.

נמצאו עוד תרחישים שמאפשרים מסע אל העבר. לדוגמה, ב-1974 חישב פרנק ג' טיפֿלר מאוניברסיטת טולין ומצא כי גליל מסיבי בעל אורך אינסופי, המסתובב סביב צירו במהירות קרובה למהירות האור, יאפשר לאסטרונאוטים לחזור אל העבר שלהם – שוב, משום שהוא גורר את האור סביב עצמו ויוצר לולאה. ב-1991 ניבא ג' ריצ'רד גוט מאוניברסיטת פרינסטון כי מיתרים קוסמיים – מבנים שנוצרו לדעת הקוסמולוגים בשלביו הראשונים של המפץ הגדול – עשויים לספק תוצאות דומות. אבל באמצע שנות השמונים הופיע התרחיש המציאותי ביותר למכונת זמן, והוא מבוסס על מושג חור התולעת.

המדע הבדיוני מכנה את חורי התולעת בשם "שערי הכוכבים"; הם מציעים קיצורי-דרך בין נקודות מרוחקות מאוד זו מזו במרחב. אם תקפצו לתוך חור תולעת היפותטי, תוכלו לצאת ממנו כעבור כמה רגעים בקצה האחר של הגלקסיה. חורי התולעת משתלבים באופן טבעי בתורת היחסות הכללית, הגורסת שהכבידה מעקמת לא רק את הזמן אלא גם את המרחב. התיאוריה מאפשרת מעין דרכים חלופיות, מנהרות המקשרות שתי נקודות במרחב. המתמטיקאים מתארים מרחב כזה כרבי-קישורים. כשם שמנהרה בבטן הר יכולה להיות קצרה יותר מכביש על-פני הקרקע, כן יכול חור התולעת לייצג דרך קצרה מהדרך הפשוטה במרחב רגיל.

חור התולעת שימש את קרל סייגן כאמצעי בדיוני בספרו מגע (שהיה לסרט קונטקט) ב-1985. לבקשתו של סייגן, פנו קיפ ס' ת'ורן ועמיתיו במכון הטכנולוגי של קליפורניה לבדוק אם חורי תולעת עולים בקנה אחד עם הפיסיקה המוכרת. נקודת המוצא שלהם היתה זו: חור התולעת דומה לחור שחור, כיוון שהוא גוף בעל כבידה אדירה. אבל בניגוד לחור השחור, המציע רק מסע חד-סטרי לשום-מקום, לחור התולעת יש גם יציאה וגם כניסה.

בלולאה

על-מנת שחור תולעת יוכל להתיר מעבר דרכו, הוא חייב להכיל חומר אקזוטי, כלשוננו של ת'ורן. בפועל, מדובר במשהו שיחולל אנטי-כבידה כנגד נטייתה הטבעית של מערכת מסיבית לקרוס לחור שחור תחת כובד משקלה הרב. אנטי-כבידה, או דחייה כבידתית, יכולה להיווצר על-ידי אנרגיה שלילית, או לחץ שלילי. ידוע לנו שמצבי כבידה שלילית קיימים במערכות קוואנטיות מסימות, ומכאן משתמע שחוקי הפיסיקה אינם פוסלים את קיומו של חומר אקזוטי נוסח ת'ורן, אם כי לא ברור שאכן אפשר לאסוף כמות מספקת של חומר אנטי-כבידתי, כמות שיש בה כדי לייצב חור תולעת.

בתוך זמן קצר התברר לת'ורן ולעמיתיו כי אם אמנם אפשר ליצור חור תולעת, יהיה קל להפוך אותו למכונת זמן. אסטרונוט שיעבור דרך חור כזה עשוי לצאת ממנו לא רק במקום אחר ביקום, אלא גם במקום אחר בזמן – בעתיד או בעבר.

כדי להתאים חור תולעת למסע בזמן, אפשר לגרור אחד מפתחיו אל כוכב נייטרונים ולהציבו בסמוך לפני הכוכב. כבידתו של כוכב הנייטרונים תאט את הזמן בקרבת פתח זה של חור התולעת, ובהדרגה ילך ויצטבר הפרש זמן בין שני קצותיו של חור התולעת. אז יוצבו שני הפתחים במקום נוח במרחב, והפרש הזמן הזה יישאר מוקפא ביניהם.

נניח שההפרש הוא 10 שנים. אסטרונוט שיעבור בחור התולעת בכיוון אחד ידלג 10 שנים אל העתיד, ואילו אסטרונוט שינוע בכיוון ההפוך ידלג 10 שנים לעבר. אם יחזור האסטרונוט השני לנקודת המוצא שלו במהירות גדולה במרחב רגיל, אפשר שיגיע הביתה לפני שיצא ממנו. לשון אחר, לולאה סגורה במרחב יכולה להיות גם לולאה בזמן. ההגבלה היחידה היא שהאסטרונוט לא יוכל לחזור לזמן הקודם למועד בנייתו של חור התולעת מלכתחילה.

בעיה קשה מאוד הניצבת לשטן על דרך בנייתה של מכונת זמן נוסח חור התולעת היא יצירתו של חור התולעת, ראשית חוכמה. ייתכן שמבנים מסוג זה משתחלים בלאו הכי בחלל, מדרך הטבע – שרידים מהמפץ הגדול. אם כן, ציוויליזציה מתקדמת ביותר יכולה להשתלט על אחד מהם. לחילופין, אולי אפשר ליצור חורי תולעת בקנה-מידה זעיר מאוד, מה שקרוי אורך פֶּלַנְק, הקטן ב-20 סדרי גודל מגרעין האטום. עקרונית, אפשר לייצב חור תולעת זעור כזה בעזרת דופק של אנרגיה, ולנפח אותו איכשהו לממדים ראויים לשימוש.

צנזורה!

בנייתה של מכונת זמן, אם נניח שאפשר להתגבר על הבעיות ההנדסיות, תפתח תיבת פנדורה של פרדוקסים סיבתיים. תארו לעצמכם, למשל, נוסע בזמן שבא לביקור בעבר ורצח את אמו בעת שהיתה ילדה. כיצד עלינו להבין זאת? אם הילדה מתה, היא לא תוכל להיות אמו של הנוסע בזמן. אבל אם הנוסע בזמן לא נולד כלל, הוא לא יוכל לחזור ולרצוח את אמו.

פרדוקסים מסוג זה מתעוררים כשהנוסע בזמן מנסה לשנות את העבר, ומובן מאליו שדבר זה אינו אפשרי. אבל אין זה מונע בעד מישהו מלהיות חלק מהעבר. נניח שהנוסע בזמן חוזר אחורה ומציל ילדה מרצח, וילדה זו מתבגרת ונעשית אמו. הלולאה הסיבתית הזאת היא עקבית כלפי עצמה, ואין בה שום פרדוקס. ייתכן שהעקביות הסיבתית מטילה הגבלות על מה שיכול הנוסע בזמן לעשות, אבל אין היא שוללת את המסע בזמן עצמו.

גם אם המסע בזמן אינו בדיוק פרדוקסלי, ודאי שהוא משונה. תארו לעצמכם נוסע בזמן שמדלג שנה קדימה וקורא על משפט מתמטי חדש בגיליון עתידי של סאיינטיפיק אמריקן. הוא רושם לעצמו את הפרטים, חוזר אל זמן מוצאו ומסביר את המשפט לתלמידו, וזה מחבר מאמר ומפרסם אותו בסאיינטיפיק אמריקן. אין צורך לומר שזה אותו מאמר עצמו שהנוסע בזמן קרא מלכתחילה, ומכאן נשאלת השאלה: מה מקורו של המידע על המשפט הזה? המקור אינו הנוסע, משום שהוא רק קרא אותו, וגם אינו התלמיד, משום שהוא רק שמע אותו מפי הנוסע. דומה כאילו המידע הופיע יש מאין, בלי שום סיבה.

השלכותיו הביזאריות של המסע בזמן הניעו כמה מדענים לפסול אותו על הסף. סטיבן ו' הוקינג מאוניברסיטת קיימברידג' הציע את "ניחוש הגנת הכרונולוגיה", האוסר על לולאות סיבתיות. הואיל וידוע שתורת היחסות מתירה לולאות סיבתיות, הגנת הכרונולוגיה מחייבת את התערבותו של גורם אחר כלשהו שימנע מסע אל העבר. מה יכול להיות טיבו של גורם זה? אחת ההצעות היא שתהליכים קוואנטיים יצילו את המצב. קיומה של מכונת זמן יאפשר לחלקיקים לנוע בלולאות אל העבר שלהם. בחישובים יש רמז לכך שההפרעה אשר תיווצר כך תלך ותגביר את עצמה, עד שתחולל שטף אנרגיה שיהרוס את חור התולעת.

הגנת הכרונולוגיה אינה אלא ניחוש, ולכן המסע בזמן עודנו בגדר אפשרות. יישובה הסופי של השאלה יצטרך לחכות עד שיצליח איחודן של מכניקת הקוואנטים והכבידה, אולי באמצעות תורת המיתרים, או הרחבתה המכונה תיאוריית M. אפשר אפילו לקוות כי הדור הבא של מאיצי חלקיקים יוכל להפיק חורי תולעת תת-אטומיים, שיתקיימו למשך זמן מספיק למעבר חלקיקים סמוכים דרכם ולביצוע לולאות סיבתיות קצרות-יומין. זה עדיין יהיה רחוק מאוד מחזון מכונת הזמן של ה"ג ולס, אבל זה ישנה לצמיתות את השקפתנו על המציאות הפיסיקלית.

סקירה תמציתית

– המסע קדימה בזמן הוא עניין קל יחסית. מי שמתקרב למהירות האור, או שרוי בשדה כבידה חזק, הזמן עובר עליו לאט מכפי שהוא עובר על שאר הבריות – לשון אחר, הוא נע לעתיד שלהם.

– המסע לעבר הרבה יותר מסובך. תורת היחסות מאפשרת תצורות מסוימות של מרחב-זמן: יקום מסתובב על צירו, גליל מסתובב על צירו, והדרך המפורסמת ביותר, חור תולעת – מנהרה במרחב ובזמן.

מכונת זמן נוסח חור תולעת בשלושה שלבים לא-קלים

1. יש למצוא או לבנות חור תולעת – מנהרה המקשרת בין שני אתרים שונים במרחב. אפשר שחורי תולעת טבעיים גדולים קיימים במעמקי החלל, זכר למפץ הגדול. ואם אין, יהיה עלינו להסתפק בחורי תולעת תת-אטומיים, טבעיים (יש אומרים שאלה מופיעים מכל עבר סביבנו ושבים ונעלמים מיד כלעומת שבאו) או מלאכותיים (שנוצרו במאיצי חלקיקים, כמתואר בציור זה). את חורי התולעת הקטנים האלה יש להגדיל לממדים שימושיים, אולי בעזרת שדות אנרגיה מעין אלה שגרמו לתפיחת המרחב זמן קצר אחרי המפץ הגדול.

2. יש לייצב את חור התולעת. הזרקת אנרגיה שלילית שנוצרה באמצעים קוואנטיים, למשל במה שקרוי תוצא קזימיר, תוכל לאפשר מעבר אות או עצם בשלום דרך חור התולעת. האנרגיה השלילית מקזזת את נטייתו של חור התולעת להצטמק לנקודה בעלת צפיפות אינסופית, או כמעט אינסופית. לשון אחר, היא מונעת את ההפכות חור התולעת לחור שחור.

3. יש לגרור את חור התולעת. חללית, שנבנתה מן הסתם בטכנולוגיה מתקדמת ביותר, תפריד בין פתחי חור התולעת. פתח אחד אפשר להציב בסמוך לכוכב נייטרונים – כוכב בעל צפיפות קיצונית ושדה כבידה חזק מאוד. הכבידה העזה תגרום להאטת הזמן. הואיל והזמן יעבור מהר יותר בפתחו האחר של חור התולעת, תיווצר הפרדה בין שני הפתחים לא רק במרחב, אלא גם בזמן.

אמא של כל הפרדוקסים

פרדוקס האם הידוע לשמצה (יש המכנים אותו על שם בני משפחה אחרים) מופיע כשאנשים או עצמים נעים לאחור בזמן ומשנים את העבר. גרסה פשטנית שלו מתבססת על כדורי ביליארד. כדור

ביליארד עובר דרך חור תולעת המשמש כמכונת זמן. כשהוא מגיח מתוכו, הוא פוגע בעצמיותו הקודמת, וכך מונע את כניסתו לחור התולעת מלכתחילה.

יישוב הפרדוקס נובע מההכרה הפשוטה בכך שכדור הביליארד אינו יכול לעשות דבר שאינו עולה בקנה אחד עם ההיגיון או עם חוקי הפיסיקה. הוא אינו יכול לעבור דרך חור התולעת באופן שימנע את מעברו דרך חור התולעת. אבל שום דבר אינו מונע בעדו מלעבור דרך חור התולעת באינסוף דרכים אחרות.

עוד בנושא

Paul J. Nahin, Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction
(American Institute of Physics, 1993).

D. Deutsch & M. Lockwood, "The Quantum Physics of Time Travel", Scientific American, Vo.
273 No. 3, March 1994, pp. 68-74.

Kip S. Thorne, Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy (N.Y., W.W.
(Norton, 1994).

J. Richard Gott, Time Travel in Einstein's Universe: The Physical Possibilities of Travel through
(Time (N.Y., Houghton Mifflin, 2001).

(Paul Davies, How to Build a Time Machine (N.Y., Viking, 2002).

L.H. Ford & T.A. Roman, "Negative Energy, Wormholes and Warp Drives", Scientific
American, January 2000.

ג'ון גריבין, בחיפוש אחר גבולות הזמן, תר' ע' לוטם (ירושלים, כתר, 1993).