



לפני המפץ

דניאל לינפורד

מאז שנות השישים יש הסכמה כמעט מוחלטת שהיקום הנצפה החל במצב חם ודחוס ומאז הוא הולך ומתרחב. מכך נגזרה התיאוריה הידועה כמפץ הגדול. אבל בעשורים האחרונים החלו לצוץ שאלות: האם באמת כך החל היקום? וגם אם היקום הנצפה אכן התרחב ממצב חם ודחוס, אולי אין להסיק מכך שקודם לכן לא היה דבר

אוקטובר 2025

שנות השלושים של המאה הקודמת שינה כומר ופיזיקאי בלגי בשם ז'ורז' למֶטֶר את האופן שבו אנחנו מבינים את היקום. הוא דימה את הולדת היקום לפיצוץ קוסמי. לפי למֶטֶר, ראשית הזמן הייתה ב"מופע זיקוקים חטוף וזוהר". התיאוריה שלו טענה שאנחנו חיים בזהרורי הדעיכה של אותו מופע - בעולם שבהדרגה לא נותרים ממנו אלא עשן ואפר. "תיאוריית הזיקוקים של התפתחות העולם" ציירה תמונה חדה מאוד, אבל בה בעת הציבה בפני המדענים חידה כמעט בלתי פתירה: האם נוכל למצוא ראיות לראשית הזמן אם נתחקה בדרך כלשהי אחר ההתפתחות ההדרגתית הזאת? האם נמצא תיעוד להולדת היקום בנקודה כלשהי בהווה?

עד למֶטֶר, העיסוק בהולדת היקום נחשב תחומם הבלעדי של מטפיזיקאים ותיאולוגים. מלומדים יהודים, נוצרים ומוסלמים האמינו בבריאה אלוהית, ואילו הוגים אתאיסטים טענו בדרך כלל בזכות עבר נצחי. לראיות בדבר ראשיתו של הזמן היו עשויות להיות השלכות מרחיקות לכת. אם המדע היה מגלה היכן החל הזמן, הדתות האברהמיות יכלו לרוות נחת מאישושה של דוקטרינה חשובה: הבריאה האלוהית של היקום. לעומת זאת, אם המדע היה מגלה שהזמן לא החל מעולם, כי אז היה אפשר לשלול תפיסות מסוימות של אלוהים. אבל ראיות אמפיריות לא מילאו כל תפקיד בוויכוחים הפילוסופיים והתיאולוגיים הללו על מקורות העולם. למעשה, אף אחד - גם לא המדענים - לא האמין ששחר הזמן יכול להותיר עקבות כלשהן בהווה.

המאה העשרים שינתה הכול מבחינה זו. השערתו של למֶטֶר, שבתחילה התקבלה בספקנות, הציעה שמקור היקום היה לוהט - כלומר, אולי אפשר לגלותו. כיום, רבים מאיתנו עדיין מאמינים בסיפור הזה. היקום, כפי שמספרים לנו ספרים פופולריים, סדרות תעודה וקומדיית מצבים אחת לפחות, התחיל במפץ גדול שסימן את ראשיתו של החומר הפיזי ושל הזמן עצמו.

לכאורה נדמה שהוכרעה שאלת הולדתו של היקום שלנו. אבל למרות האופן שבו מוצג המפץ הגדול בתרבות הפופולרית, פיזיקאים רבים ופילוסופים של הפיזיקה הטילו ספק בכך שהמדע יוכל באמת להראות שהייתה לזמן נקודת התחלה. בעשורים האחרונים, פילוסופים בעלי הכשרה מדעית הגיעו למסקנה שהמדע כנראה לא יוכל לעולם להראות שהייתה לזמן נקודת התחלה. ראשית הזמן, שאותה נהגנו לדמיין כהתלקחות פתאומית של זיקוקים, כבר איננה עובדה מדעית בלתי מעורערת.

רגעים שזורים

כאשר הוגים בעת העתיקה, בימי הביניים ובראשית העת החדשה התווכחו ביניהם על השאלה מתי החל העולם, הם ביססו את רעיונותיהם על טיעונים פילוסופיים ועל טקסטים דתיים. "בראשית ברא אלוהים את השמיים ואת הארץ", נכתב בפסוק הראשון בתנ"ך; אבל לגישת חלק מהתיאולוגים, אלוהים שבורא הכול (חוץ מאשר את עצמו) יכול היה לברוא גם עולם נטול ראשית. מלומדים אחרים, ובפרט חסידי התיאולוג והפילוסוף הנוצרי בן המאה השישית לספירה יואנס פילופונוס, לא השתכנעו, וטענו נגד אפשרות קיומו של יקום נצחי. מאוחר יותר, במאה השלוש-עשרה, טען תומס אקווינס שאלוהים ברא את העולם ומקיים אותו, אבל העולם שברא אינו מלמד דבר על ראשית הזמן. תחת זאת, אקווינס סבר שהדרך היחידה לדעת משהו על ראשית העולם היא באמצעות דבר האלוהים, התיאור המקראי של הבריאה כפי שהובא בספר בראשית.

על אף העיסוק ברעיונות הללו, נדמה כי מרבית ההוגים לפני המאה העשרים קיבלו את הרעיון שלא נוכל להצביע באופן אמין על רגע אחד מסוים ולזהותו כרגע תחילתו של היקום. אילו יכולנו לצאת אל מחוץ לקו הזמן שלנו, היינו יכולים לראות אם הייתה לו התחלה; אבל מתוך קו הזמן, שום דבר לא יוכל להבחין רגע אחד ממשנהו.

עד למאה העשרים, מרבית ההוגים פקפקו אפילו באפשרות שעולמנו מתפתח לאורך הזמן. אריסטו, הפיזיקאי רוברט הוק, הגיאולוג צ'רלס לָיִל ואחרים טענו כי אף שפני כדור הארץ מתעצבים מחדש שוב ושוב בתהליכים מחזוריים, העולם עצמו לא עבר תהליך התפתחות לאורך זמן. ואפילו מי שחשד שהעולם התפתח הטיל ספק באפשרות שהתפתחות כזאת עשויה להיות רלוונטית לראשית העולם.

דמותו של הזמן נראתה שונה מאוד למי שחי לפני המאה העשרים. אחת הדרכים להבין את ההבדל הזה היא לחשוב על ההבחנה בין "רגעים" של זמן ובין "תכנים" של זמן. כיום אנחנו מבינים שרגע בזמן שונה מן התוכן שלו: רגע הוא נקודה בזמן, כמו השעה 8:24 בבוקר, ואילו התוכן הוא הדבר שקרה באותו רגע, כמו נסיעה לעבודה או אכילתה של ארוחת הבוקר. כעת דמיינו שכל מה שקרה לכם היום התרחש שעה אחת מאוחר יותר. מנקודת מבט שקודמת למאה העשרים, שינוי כזה לא ישפיע על חוויותיכם, משום שהחוויות שלכם הן חלק מן התוכן של כל רגע.

שוו בדמיונכם שאני נכנס למסעדה, מביט בשעון, רואה שהשעה היא 14:47 ומזמין לי משהו לשתות. עבור מי שחיו לפני המאה העשרים, גם אם האירועים הללו היו מתרחשים שעה אחת מאוחר יותר, הכול היה קורה באותה דרך: השעון עדיין היה מורה 14:47, עדיין הייתי מזמין לי משקה, עדיין הייתי מייצר את

אותה שורת זיכרונות. מנקודת מבט זו, העיתוי המדויק של האירועים אינו רלוונטי לתוכן שלהם. מכאן נבעה המסקנה שהזמן יכול להימתח אחורנית עד אינסוף, משום שאם שום רגע אינו שונה מבחינה מהותית משום רגע אחר, ואם הרגעים עצמם אינם משפיעים על התוכן שלהם, כי אז אין שום דרך לציין ראשית.

עבודתם של פיזיקאים וקוסמולוגים במהלך המאה העשרים שינתה דרמטית את האופן שבו אנחנו תופסים תכנים ורגעים בזמן. עם פיתוחה של תורת היחסות הכללית של אלברט איינשטיין, הרגע ותוכנו נשזרו זה בזה. הדבר אפשר ל"רשומות" של רגעי עבר להישמר עד להווה. תוכני הרגעים החלו לספק רמזים לגבי עצם המבנה של הזמן. התיאוריה של איינשטיין לימדה, כמדומה, שמדענים יוכלו סוף סוף להוכיח שלזמן הייתה ראשית.

כדי להבין מדוע היחסות הכללית ותגליות מדעיות אחרות במאה העשרים רמזו על אפשרות קיומה של ראשית הזמן, צריך לבחון את שאלת היסוד שהביאה לתגליות הללו: מהו אור?

עולם ארבע-ממדי

בשנות השישים של המאה התשע-עשרה החל פיזיקאי סקוטי בשם ג'יימס קלרק מקסוול לפתח תשובה לשאלה מהו אור. בעשורים שקדמו לפריצות הדרך של איינשטיין פיתח מקסוול משוואות שתיארו שדות של כוחות חשמליים ומגנטיים שמתפשטים במרחב. את פעולתם של השדות הבלתי נראים הללו אפשר לראות כשאנחנו משפשפים בלון כנגד שיערו של אדם או מפזרים שבבי ברזל סביב מגנט. מקסוול גילה שהשדות החשמליים והמגנטיים שתיארו משוואותיו היו שני היבטים של שדה אלקטרומגנטי אחד. והאור, כך התברר, היה גל בשדה הזה. משוואות מקסוול אפשרו לחשב לראשונה את מהירות האור במונחים של קבועים מגנטיים וחשמליים. אבל השלכות החשוב הזה לא היו מובנות מאליהן.

מהירותו של אובייקט נמדדת תמיד ביחס למשהו אחר. כך למשל, כדי למצוא את מהירותה של מכונית נוסעת, יש למדוד כמה זמן לוקח למכונית לעבור מרחק מסוים על גבי סרגל נייח. מאחר שאנו עצמנו לא זזים ביחס לסרגל המדידה, אנו תמיד מודדים את עצמנו במנוחה. אבל אם נאיץ למהירותה של המכונית, היא תיראה נייחת ביחס אלינו, משום שלא תנוע עוד לאורך סרגל המדידה. עקרונות התנועה האלה היו חלק מתפיסת עולם מכנית מבוססת היטב שרווחה בקרב מדענים במשך מאות שנים. אבל מקסוול גילה ששום האצה לא תאפשר לך להדביק את מהירות האור; למרבה הפלא, האור אינו משתנה ביחס לתנועתו של גורם אחר.

עובדה זו הציבה פרדוקס בפני הפיזיקאים של שלהי המאה התשע-עשרה: אף שלכאורה אין מהירות מוחלטת שאינה תלויה בתנועתנו שלנו, מהירות האור מוחלטת ונראה כי היא אינה משתנה, בלי קשר לתנועתו של הצופה. מכך נבע שחלה טעות כלשהי בהסברים המדעיים על היקום. צריך היה לשנות משהו - את עקרונות המכניקה המבוססים, את התיאוריה האלקטרומגנטית החדשה של מקסוול, או את שניהם.

בסביבות מפנה המאה התאמצו פיזיקאים כמו הנדריק לורנץ, ג'ורג' פרנסיס פיצג'רלד ואוליבר הוביסייד ליישב את עקרונות המכניקה הישנים עם הפיזיקה האלקטרומגנטית של מקסוול. אבל ב-1905 הציע איינשטיין חלופה נועזת, שהיום אנחנו מכנים אותה "תורת היחסות הפרטית": איינשטיין הציע לשמר את הפיזיקה האלקטרומגנטית החדשה ולהשליך את עקרונות המכניקה. להצעתו היו השלכות מהפכניות על הבנת הזמן.

מאחר שהתזמון המדויק של אירוע כלשהו תלוי בתנועתו היחסית של הצופה, אירועים שונים אינם יכולים להתרחש בו-זמנית באופן אובייקטיבי. ומאחר שאורכו של אובייקט תלוי במדידה בו-זמנית של חלקו הקדמי והאחורי, הרי גם אורך האובייקט הוא דבר יחסי. הוא הדין במשך הזמן החולף בין אירועים: איינשטיין הראה שאם אנשים יסנכרו את שעוניהם במיקום גיאוגרפי מסוים, ייסעו איש איש לדרכו ואז ייפגשו שוב, הם יגלו ששעוניהם אינם מתואמים עוד.

בתוך שלוש שנים מהצגתה של תורת היחסות הפרטית, החל הפיזיקאי והמתמטיקאי הגרמני הרמן מינקובסקי להבין שהתיאוריה לא רק חשפה את התלות ההדדית שבין המרחב לזמן; הוא הראה שאינשטיין שזר מתמטית את המרחב והזמן לכדי אובייקט ארבע-ממדי שלא היה אפשר להעלותו על הדעת עד אז: מרחב-זמן. מתוך ההבנה החדשה הזאת החלה להתגבש תפיסה חדשה לגמרי של הולדת היקום.

אף שאנחנו תופסים את העולם כתלת-ממדי, מינקובסקי הראה שהיחסות הפרטית הגיונית יותר אם מבינים את העולם כארבע-ממדי. לאנשים שונים יכולות להיות פרספקטיבות שונות לגבי אותו אובייקט - למשל בית, שאפשר לאחדו לתיאור תלת-ממדי יחיד של גובה, אורך ורוחב. באותו אופן, צופים במרחב-זמן ארבע-ממדי חווים תפיסות שונות של סימולטניות, אורך ומשך, שאפשר למזגן יחד לכדי מבנה אחד. מרחב-זמן ארבע-ממדי מלכד יחדיו את כל מסגרות ההתייחסות - בהתבסס על מדידות של סרגלים ושעונים - לכדי מבנה יחיד ואחוד המנותק מכל מסגרת התייחסות נתונה. זו הייתה התובנה העמוקה שחילץ מינקובסקי מן היחסות הפרטית של איינשטיין. אבל אף שהיחסות הפרטית העמיקה את הבנת היקום, היא לא יכלה לטפל בשאלת ראשית הזמן. לשם כך נדרשה תיאוריה חדשה של כבידה.

רגע הבראה

בשנת 1907 הוזמן איינשטיין לכתוב סקירה של חקר היחסות הפרטית עבור כתב עת מדעי שערך הפיזיקאי הגרמני יוהנס שטארק. תוך כתיבת הסקירה תפס איינשטיין שהכבידה הניוטונית והיחסות הפרטית אינן עולות בקנה אחד. חוקי הכבידה של ניוטון קבעו שאובייקטים מפעילים כוחות זה על זה מיידית; אלא שמהיחסות הפרטית נגזר ששום אובייקט אינו יכול להשפיע על אובייקט אחר באופן מידי. במהלך העשור הבא פתר איינשטיין פתר את הסתירה הזאת באמצעות פיתוחה של תיאוריית כבידה חדשה לחלוטין, שנקראת כיום תורת היחסות הכללית. למרבה הפלא, לתיאוריה זו היו השלכות מרחיקות לכת על ראשית הזמן. באמצעות תורת היחסות הכללית, רגעים ותוכניהם נשזרים זה בזה לחלוטין.

לפי התיאוריה החדשה של איינשטיין, המרחב-זמן משפיע על החומר והחומר משפיע על המרחב-זמן. כפי שאפשר לחשוף שדה מגנטי בלתי נראה באמצעות פיזור של שבבי ברזל, כך אפשר לחשוף את מבנה המרחב-זמן באמצעות האופן שבו החומר נע במרחב-זמן. מתובנה זו עלה שהפיזיקה עשויה סוף סוף לספר לנו משהו על ראשית הזמן.

איינשטיין גיבש את הרעיון הזה באמצעות שני ניסויי מחשבה. הראשון, הידוע כניסוי הדיסק המסתובב, בחן את הפרדוקסים המתמטיים המתעוררים ממעגל מסתובב. אפשר לדמיין את הניסוי הזה באופן נגיש יותר אם נחשוב על אדם שנתקל בקרוסלה שמסתחררת במהירות קרובה למהירות האור. כדי למדוד את הקוטר וההיקף של הקרוסלה, האדם מציב סביבה סרגלים; אבל לתדהמתו מתברר שאפשר להניח שם יותר סרגלים מכפי שציפה, משום שגוף שנע במהירות הקרובה למהירות האור מתקצר בכיוון התנועה שלו - וגם הסרגלים מתקצרים ביחס לצופה. הקוטר, לעומת זאת, נותר ללא שינוי, מאחר שהוא ניצב לכיוון התנועה. משהו מהותי מתרחש כאן: החוקים המוכרים לנו משיעורי הגיאומטריה בתיכון אינם שימושיים עוד. נדמה שהקרוסלה מעקמת את המרחב. לגוף שנע במהירות (speed) קבועה ובכיוון קבוע יש וקטור מהירות (velocity) קבוע; הקרוסלה, לעומת זאת, מסתחררת במהירות קבועה, אבל כיוון התנועה של הנקודות לאורך ההיקף שלה משתנה בלי הרף. לכן הקרוסלה מרמזת כי קיים קשר בין וקטור מהירות משתנה (תאוצה) ובין הגיאומטריה של מרחבים מעוקמים.

בניסוי המחשבה השני של איינשטיין, אדם עומד בתוך מעלית חסרת חלונות. כאשר הוא מצוי במצב נייח על פני כדור הארץ, כוח הכבידה מצמיד את רגליו לרצפה. אבל הוא ירגיש את אותו כוח אם המעלית תאיץ באופן המתאים בעומק החלל, למשל. פירוש הדבר הוא שתצפית מקומית אינה יכולה להבחין בין כבידה ובין תאוצה. יתר על כן, אותו אדם ירגיש חסר משקל אם הוא והמעלית ייפלו יחד על פני כדור הארץ. אסטרונומים המקיפים את כדור הארץ נתונים כמעט לאותו כוח כבידה כמונו, אבל נראה שהם חסרי משקל משום שהם והחללית נופלים אל כדור הארץ באותו קצב. אם כן, הכבידה היא יחסית לתאוצה, וכפי שאיינשטיין הראה, התאוצה קשורה בעקמומיות המרחב-זמן. אבל מה שהיה פחות ברור הוא הקשר בין הכבידה לעקמומיות המרחב-זמן.

במקרים מסוימים, משטחים עשויים להיראות מעוקמים כאשר מביטים בהם בדרך מסוימת - למשל כאשר מביטים בשולחן דרך אקווריום עגול. באותו אופן, קרוסלה שמסתחררת במהירות עשויה להיראות מעוותת, ומעלית נופלת עשויה לגרום לאדם לחוש חסר משקל. אבל פרוצדורות מתמטיות יכולות להבחין בין מרחבים מעוקמים באמת ובין מרחבים שרק נראים מעוקמים ולזהות שדות כבידה אמיתיים. עבודתו של איינשטיין הראתה שהפרוצדורות האלה, הנפרדות לכאורה, הן למעשה זהות: עקמומיות-לכאורה במרחב-זמן היא כבידה-לכאורה, ועקמומיות אמיתית היא כבידה אמיתית.

אנחנו עושים טעויות כאלה בגלל טיב הקשר שלנו למבנה המרחב-זמן. ראו למשל את עבודתם של משרטטי מפות. כאשר הם ממפים עיר, הם יכולים להתייחס לכדור הארץ כאילו היה שטוח; אבל כדי למפות את כוכב הלכת כולו, עליהם להביא בחשבון את עקמומיות הכדור. דמיינו סדרה של מפות

שטוחות על גבי כדור: האופן שבו מפה שטוחה אחת מתחברת למפות האחרות חושף את עקמומיות הכדור. כעת נדמיין גם מפה שטוחה זעירה בכל נקודה על גבי המרחב־זמן. החיבורים בין המפות מעידים על עקמומיות המרחב־זמן.

גוף שנמצא בתנועה ינוע בקו ישר במהירות קבועה כל עוד לא מופעלים עליו כוחות כלשהם. אבל מפני שהמרחב־זמן מעוקם, ההגדרה של "ישר" אינה פשוטה כל כך. כפי שאדם שנוסע משיקו לפריז חייב לעבור במסלול מעוקם סביב כדור הארץ, כך גופים במרחב־זמן חייבים לנוע במסלולים מעוקמים כדי לנוע ישר ככל האפשר בתוך המרחב־זמן המעוקם שסביבם. צפייה בתנועתם של גופים מאפשרת לנו ללמוד על העקמומיות הזאת.

פירוש הדבר הוא שהחומר והמרחב־זמן שזורים זה בזה. ובהתחשב בשזירה הזאת, אפשר להבחין בין רגעים בזמן באמצעות התכנים שלהם: כל רגע הוא ייחודי בזכות הקונפיגורציה המיוחדת של החומר והאנרגיה בו. ואם נתחקה אחר שינויים בקונפיגורציה של החומר והאנרגיה – כלומר אחר שינויים בעקמומיות המרחב־זמן – אולי נוכל לזהות רגע אחד מסוים כרגע הבריאה? במקרה כזה, היקום עשוי לכלול תיעוד של רגע הולדתו.

איינשטיין השלים את ניסוחה של היחסות הכללית ב־1916 והשיק צורה חדשה בתכלית לחשוב על הזמן. בשנות העשרים, שאלת ראשית הזמן כבר לא הייתה עניין לתיאולוגים או פילוסופים בלבד. נראה כי לשאלה של מקורות היקום עשויות להיות תשובות מדעיות.

המצאת המפץ

הפיזיקה המתמטית שהשיבה על השאלה הקוסמולוגית הזאת הגיעה מליבתה של היחסות הכללית: משוואות השדה של איינשטיין. עשר המשוואות הללו קושרות בין עקמומיות המרחב־זמן ובין פיזור החומר במרחב־זמן. פתרונות למשוואות השדה מייצגים גרסאות אפשריות ליקום, המותאמות לצורות הרבות שהמרחב־זמן יכול ללבוש. אם התיאוריה של איינשטיין נכונה, כי אז היקום שלנו אמור להתאים לאחד הפתרונות הללו.

מייד אחרי שהציג איינשטיין את משוואות השדה שלו, ארבעה פיזיקאים – אלכסנדר פרידמן, ז'ורז' למֶטֶר, הווארד רוברטסון ורתור ווקר – או בקיצור, FLRW – זיהו משפחה של פתרונות. הפתרונות שניסחו הארבעה מתארים התפתחות של יקומים אפשריים בהנחה שכל אחד מהם הוא הומוגני (כלומר זהה בכל נקודה) ואיזוטרופי (כלומר זהה בכל כיוון) במרחב.

בחלק מן המודלים הללו, כאשר עושים אקסטרפולציה לאחור בזמן, עקמומיות המרחב־זמן מתקרבת לאינסוף. לפי תורת היחסות הכללית, המרחב־זמן אינו יכול להימתח עוד יותר מזה; ולכן נראה שחלק מהפתרונות נמתחים מנקודה קטקליזמית התחלתית, שמעבר לה – לפי חוקי הפיזיקה – המרחב־זמן לא יכול היה להתקיים.

בהדרגה החלו להצטבר ראיות אמפיריות שתמכו במודלים של FLRW ובאירוע הקטקליזמי. בשנות העשרים של המאה הקודמת ראה אדווין האבל שגלקסיות רחוקות מתרחקות מאיתנו, והדבר מעיד שהיקום הנצפה מתרחב – אחד ממאפייני המפתח במודלים של FLRW. אישוש נוסף הגיע בשנות הארבעים, כאשר הפיזיקאי ג'ורג' גאמוב ועמיתיו הראו שאפשר להסביר את היקום באמצעות שילוב בין המודלים של FLRW ובין עקרונות הפיזיקה הגרעינית. בתוכנית רדיו ששודרה בבייבי-סי בשנת 1949 התייחס האסטרונם האנגלי פרד הויל ליקום המתרחב וכינה אותו בבדיחות הדעת "המפץ הגדול", the Big Bang. הכינוי נקלט.

אחת החלופות לרעיון הזה הוצעה כבר בשלהי שנות הארבעים: תיאוריית המצב היציב טענה שהיקום מעולם לא התחיל. אבל חלופות כאלה נדחו בדרך כלל לאחר שארנו פֶּנְזִיאס ורוברט וילסון גילו ב־1964 את קרינת הרקע הקוסמית, מעין זהרורים או שאריות של המפץ הגדול. התגלית הזאת לא הותירה עוד ספק של ממש לגבי הקביעה שהיקום הנצפה החל במצב חם ודחוס ומאז הוא הולך ומתרחב.

לפני הקטקליזם

ובכל זאת, עם התקדמות המאה העשרים החלו לצוץ שאלות לגבי המפץ הגדול. האם באמת שם החל היקום? היקום הנצפה אולי התרחב פעם ממצב חם ודחוס, אבל אין פירוש הדבר בהכרח שכך היה ביקום כולו, או שלפני אותו מצב חם ודחוס לא היה דבר.

במקביל התעוררה ביקורת על המודלים של FLRW. כל אחד מהם הניח שהיקום הומוגני ואיזוטרופי מבחינה מרחבית; מדענים ביקשו לבדוק אם הקטסטרופה שניבאו חלק מהמודלים הללו הייתה תוצר לוואי של ההנחות האלה, שאינן תואמות בהכרח את המציאות. מאחר שמשוואות השדה של איינשטיין קשות כל כך לפתרון בכל מקרה מלבד זה הפשוט ביותר, מדענים ביקשו להיעזר בתיאוריית הכבידה של ניוטון. בכמה מן המודלים של ניוטון – שכוללים משוואות דומות לאלה של FLRW – יש גם כן אירוע קטקליזמי בעבר שבו שדה הכבידה נעשה בלתי מוגדר. אבל בניגוד למודלים של FLRW, את התיאוריה של ניוטון אפשר להרחיב גם אל מעבר לאירוע הקטקליזמי.

במודלים ניוטוניים אחרים, הקטקליזם נעלם לגמרי. בשנות החמישים, הפיזיקאים אוטו הקמן ואנגלברט שיקינג הראו שהקטקליזם נעלם אם לא מניחים שהחומר הממלא את היקום הוא זהה בכל הכיוונים (איזוטרופי), אלא משתנה לפי הנקודה שאליה צופים. אם הקטקליזם נעלם במודלים ניוטוניים לא-איזוטרופיים, האם הוא עשוי להיעלם גם במודלים מציאותיים יותר לפי תורת היחסות הכללית?

בשנות השישים והשבעים, פיזיקאים ומתמטיקאים ובהם רוברט ג'רוש, רוג'ר פנרוז, סטיבן הוקינג וג'ורג' אליס החלו לחקור את התכונות הגלובליות של המרחב-זמן. תכונות גלובליות הן מאפיינים שמתייחסים למרחב שלם. כך למשל, תכונתו הגלובלית של כדור היא שכל שני קווים על פניו שבתחילה הם מקבילים ייפגשו בסופו של דבר. הנה שתי תכונות גלובליות אפשריות של המרחב-זמן: ראשית, מאחר שהתחלה חייבת להיות ממוקמת לפני כל דבר אחר, הרי המרחב-זמן חייב שיהיה לו כיוון ברור מן העבר

אל העתיד; ושנית, ליקום כולו - כל המרחב-זמן - חייב להיות גבול, משום שבלי גבול תמיד נוכל ללכת עוד אחורנית ולא לפגוש לעולם את ההתחלה. אבל למרבה ההפתעה, יש מודלים תיאורטיים (כלומר פתרונות למשוואות השדה של איינשטיין) שאינם כוללים **אף אחת** מהתכונות הללו. המודלים הללו מייצגים יקומים אפשריים שבהם הזמן אינו זורם מן העבר אל העתיד, ושבהם למרחב-זמן אין גבול. באחד המודלים הזמן יוצר לולאה, כך שההיסטוריה של היקום היא סופית אבל אין לה התחלה.

בשנות השבעים הראה מחקר חלוצי של הוקינג ופנרוז, שבניגוד למודלים הניוטוניים, הקטקליזם ההיסטורי אינו דורש שהיקום יהיה שווה בכל מקום ובכל כיוון. לפי הנחות שפיזיקאים רבים חשבו שהן כלליות וסבירות בהחלט, הקטקליזם ההיסטורי נראה הכרחי. אבל בתוך עשור למדו המדענים שהפיזיקה הקוונטית עשויה לסתור את אחת ההנחות הללו בדבר תוכני היקום. רעיון הקטקליזם שוב היה נתון לספק, עד שהתקבלה תוצאה נוספת בשנת 2003: בלי להסתמך על ההנחה של הוקינג ופנרוז, שלושה פיזיקאים - ארווינד בורד, אלן גות' ואלכסנדר וילנקין - הראו כי לא קיים מסלול שהמרחב-זמן מתרחב לאורכו (בממוצע) שעשוי להימתח אל העבר עד אינסוף. פירוש הדבר הוא שלא ייתכן שהיקום התרחב מאז ומעולם.

לפי התוצאות הללו, לא ייתכן שאזור כלשהו ביקום מתרחב לנצח; אבל אולי הוא עשה משהו אחר לפני שהחל להתרחב? הניתוחים המתמטיים של בורד, גות' ווילנקין ספגו לאחרונה ביקורת מצידם של ג'וזף לסנפסקי, דמיין איסון ופול דייוויז. לדעתם, אם מבצעים את החישובים כמו שצריך אפשר לראות שהיקום בכל זאת יכול היה להתרחב לנצח.

בעשורים האחרונים החלו גם פיזיקאים אחרים לחשוב שתיאוריות עתידיות יחליפו את ה"קטקליזם" במשהו אחר. כיום נשמעים טיעונים רדיקליים עוד יותר, שמעמידים בסימן שאלה את הרעיונות המקובלים לגבי המפץ הגדול. הטיעונים הללו מתייחסים למבנה הגלובלי של המרחב-זמן, וגורסים בנחרצות ששום תיאורמה ושום כמות של נתונים לא יאפשרו לנו לעולם לדעת אם המרחב-זמן החל בקטקליזם היסטורי כלשהו.

לא ניתן לקבוע

חשבו על האופן שבו נאסף המידע על המרחב-זמן. מאחר שאנו יכולים לקלוט אור רק מן העבר, אנו יכולים לקבל מידע רק מן העבר. כשאני יושב ליד השולחן אני רואה ניירות, ספרים ופרח באגרטל, אבל האור המגיע לעיניי מכל אחד מן האובייקטים הללו מעוכב מעט ומגיע אליי רק כעבור ננו-שניות אחדות. אני מדמיין שאני מוקף בכדורים קונצנטריים שמקננים בצפיפות זה בתוך זה; כל אחד מהם מייצג רגע בעבר בשעה שהאור נע לעברי. אוסף זה של כדורים קונצנטריים צפופים נקרא חרוט (או קונוס) האור.

שמו ניתן לו בגלל האופן שבו הוא מיוצג בשרטוטים. מכיוון שאיננו יכולים לשרטט את כל ארבעת ממדי המרחב-זמן, פיזיקאים מייצגים את המרחב-זמן בשלושה ממדים בלבד: שניים של מרחב ואחד של זמן. בהינתן הייצוג הזה של שני ממדי מרחב, הכדורים הקונצנטריים מתוארים כמעגלים. ומאחר שאנחנו

מייצגים את האור לאורך זמן, המעגלים נערמים זה על גבי זה ויוצרים חרוט, שבקצהו ניצב הצופה. החרוט מייצג את האזור שממנו אני יכול לקבל מידע – זהו חרוט האור שלי. לכל נקודה במרחב־זמן יש חרוט אור משלה, ויחד החרוטים הללו כוללים את כל התצפיות האפשריות שכל צופה יוכל לבצע אי פעם.

עובדה זו מקשה על פיזיקאים המבקשים לקבוע את המבנה הגלובלי של המרחב־זמן. האם צופה יכול לקבוע את כלל התכונות של המרחב־זמן רק על סמך הנתונים הזמינים לו בחרוט האור המסוים שלו? התשובה תלויה בשאלה אם יש נקודה יחידה המשקיפה על כל המרחב־זמן.

ב־1977 טען הפילוסוף דייוויד מלמנט שבהיעדר נקודה כזאת, שום צופה יחיד לא יוכל לקבוע באופן שלם את המבנה הגלובלי של המרחב־זמן שלו. רק מנקודת תצפית כוללת יהיה אפשר לאסוף די מידע כדי לקבוע בוודאות אם יש ליקום תכונות גלובליות שונות ומשונות, ובכלל זה מקור.

בשנת 2009 הראה הפילוסוף ג'יימס מנצ'יק שמלמנט צדק. על בסיס ההצעה של מלמנט, מנצ'יק הראה שבלתי אפשרי לקבוע את המבנה הכולל של מרחב־זמן כלשהו בלא נקודת תצפית כוללת. בכל נקודה מוגדרת במרחב־זמן, הצופה לעולם אינו יכול להיות בטוח בטיבו הגלובלי של המרחב־זמן שלו. יתר על כן, כל התצפיות מתיישבות עם אפשרויות מרובות – את הנתונים שאספת מחרוט האור הספציפי שלך אפשר להסביר באמצעות מודלים שונים של המרחב־זמן, ואפילו מודלים שמוציאים זה את זה. למעשה, לכל חרוטי האור המגיעים מכל הנקודות האפשריות במרחב־זמן יחיד (בעל מערך אחד של תכונות גלובליות), יכולות להיות מקבילות בלתי נבדלות מבחינה איכותית במרחב־זמן אחר (בעל תכונות גלובליות שונות לחלוטין). נקרא לתוצאה זו "משפט מלמנט־מנצ'יק". עולה ממנו התכונות הגלובליות של המרחב־זמן אינן ניתנות לידיעה.

האם יש ביקורת טובה על טענה זו? אחת האפשרויות היא שתצפיותינו עשויות לעלות בקנה אחד עם מודלים רבים ושונים של מרחב־זמן. קורה לפעמים שמדענים מגלים כי תצפיותיהם מתיישבות עם השערות רבות ושונות. כך למשל, בהתבסס על שלל תצפיות קודמות שערכנו עולה שפיסות נחושת מוליכות חשמל. תצפיות אלו מתיישבות עם ההשערה כי כל נחושת מוליכה חשמל, אבל הן גם מתיישבות גם עם ההשערה שפיסות נחושת מסוימות שטרם צפינו בהן אינן מוליכות חשמל. אף שכל התצפיות שלנו מתיישבות עם שתי ההשערות, אנחנו יכולים לומר שכל נחושת מוליכה חשמל, כי אפשר להשליך בביטחון מפיסות הנחושת שבדקנו לכאלה שטרם בדקנו. הפילוסוף נלסון גודמן מכנה דפוסים כאלה בשם "דמויי חוק". הדפוסים האלה מאפשרים לנו להשליך ממקרים ידועים למקרים בלתי ידועים.

אם כן, האם עלינו לצפות שהחלקים הלא נצפים ביקום יתנהגו כמו חלקים שצפינו בהם, והאם מתוך כך נוכל להסיק משהו לגבי התכונות הגלובליות של היקום שלנו? בשביל השלכה כזאת אנחנו זקוקים לדפוס דמוי חוק, אבל מרבית הדפוסים דמויי החוק מוגדרים בלעדית בידי תכונות מקומיות ולא בידי תכונות גלובליות. מנצ'יק הראה ששום דפוס דמוי חוק המבוסס על תכונות מקומיות בלבד לא יוכל לעזור לנו לקבוע את התכונות הגלובליות של המרחב־זמן שלנו.

ומה לגבי דפוסים דמויי חוק שאינם כתובים במונחים של תכונות מקומיות? הדפוסים דמויי החוק הלא-מקומיים היחידים הידועים לנו נוגעים לשזירה קוונטית - מתאמים מוזרים בין התכונות המדידות של חלקיקים מרוחקים מאוד זה מזה. כדי לקבוע אם שני חלקיקים שזורים זה בזה, עלינו לחבר תוצאות מדידות בנקודה אחת. אבל זה אינו יכול לקרות במהירות שגדולה ממהירות האור, ולכן איננו יכולים למדוד במישרין שינויים סימולטניים המתרחשים בין החלקיקים; למעשה, אין לנו דרך לדעת אם חלקיק מסוים במעבדה על פני כדור הארץ שזור בחלקיק אחר הנמצא בקצה השני של היקום. ולכן גם השזירה הקוונטית אינה יכולה לעזור לנו לגלות את התכונות הגלובליות של המרחב-זמן. הבעיה נותרת בעינה: כפי שעולה ממשפט מלמנט-מנצ'ק, לא ניתן לדעת את התכונות הגלובליות של המרחב-זמן.

המשפט הזה התקבל היטב אצל פילוסופים של הפיזיקה בעשור האחרון. הוא מצוטט לעיתים קרובות, ונדחה לעיתים נדירות בלבד. מרבית הפילוסופים של הפיזיקה סבורים כעת שהעניין הוכרע: שום כמות של נתונים לא תספיק כדי לקבוע את תכונותיו הגלובליות של המרחב-זמן. סביר להניח שלא יהיה משפט חזק מספיק כדי לקבוע אם היקום שלנו החל בקטקליזם היסטורי כלשהו. משפט מלמנט-מנצ'ק מראה שאיננו יכולים לדעת כיצד הזמן החל, או אפילו לקבוע אם הוא החל אי פעם.

בגדר מסתורין

השאלה אם הייתה ראשית ליקום הוגבלה פעם לתחומי המטפיזיקה והתיאולוגיה. אחר כך, במשך תקופה מסוימת, נראה היה שזו שאלה שהמדע יוכל להשיב עליה. עבודתו של איינשטיין שינתה את הבנת המרחב והזמן שלנו, קשרה את שניהם בחומר וטענה שהמרחב-זמן עשוי להכיל בעצמו רמזים לגבי מקורותיו. פריצת הדרך הזאת קראה תיגר על התפיסה ש"הראשית" אינה נגישה מבחינה אמפירית, והמריצה פיזיקאים לחפש עקבות כלשהן להולדת היקום. התברר שהניצחון הזה הוא בעירבון מוגבל.

משפט מלמנט-מנצ'ק מציב בפנינו גבול מִפְּכָח: ייתכן שהתצפיות שלנו, נרחבות ככל שיהיו, לעולם לא יספיקו כדי לקבוע את המבנה הגלובלי של המרחב-זמן. מבחינה מתמטית, הצורות והתכונות האפשריות של היקום רבות מדי - גרסאות רבות יכולות להתאים באותה מידה לנתונים הזמינים לנו מחרוטי האור שלנו. אף שהספרות הפופולרית הכריזה כי המפץ הגדול הוא מקור היקום שלנו, פיזיקאים ופילוסופים רבים עדיין לא השתכנעו בכך.

בסופו של דבר, השאלה אם הייתה לזמן ראשית היא חידה קוסמולוגית. למרות התפתחויות מדעיות דרמטיות, נראה כי שום משפט או תצפית אינם חזקים דיים כדי לקבוע אם היקום בקע מ"מופע זיקוקים חטוף וזוהר" או שמא התקיים מאז ומעולם. המדע קירב אותנו להבנת היקום, אבל גם הזכיר לנו את גבולות הידע. בסופו של דבר, ראשית הזמן עשויה להישאר מסתורין שלא נפתור לעולם.

