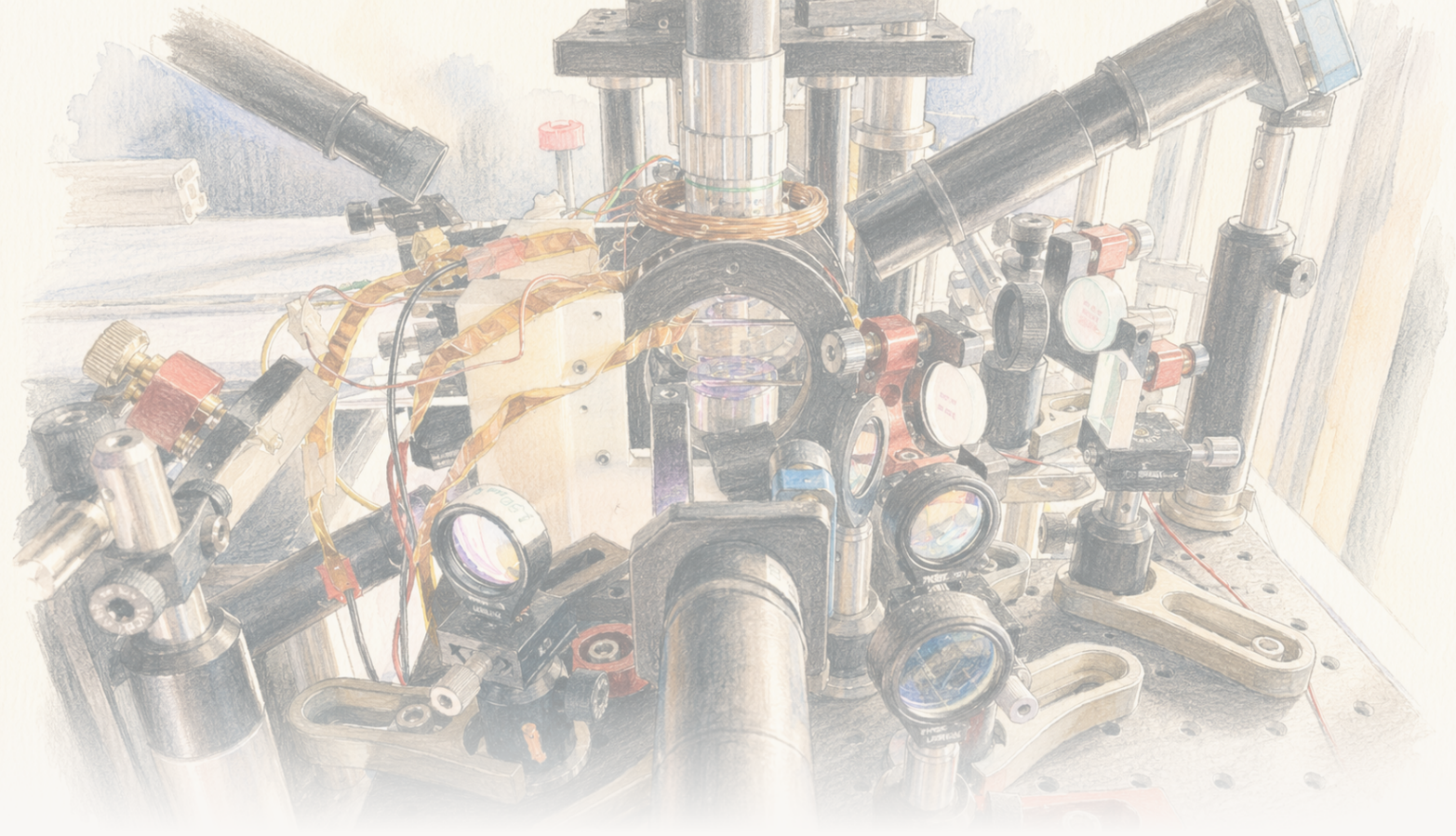




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

ניסוי באטומים קרים בוחן את 'בעיית הזמן' של הכבידה הקוונטית — כאנלוג מעבדתי, לא כפתרון

בכבידה קוונטית קבוגית, למשוואת *Wheeler-DeWitt* אין שעון חיצוני שמסדר אירועים ברצף. זו 'בעיית הזמן'. ניסוי של מחבר יחיד מבודד עיבוי בוז-איינשטיין, מפצל אותו באמצעות מחסום אופטי דק למגזר שאינו נצפה ולמגזר נצפה, ובונה שעון פנימי מתוך האנטרופיה שזורמת ביניהם. 'הזמן האנטרופי' הזה מסדר את ההתפשטות והקריסה מחדש של המגזר הנצפה, ומשוואה אפקטיבית משחזרת את הנתונים שנמדדו במקרה בעל המחסום הנמוך שנבדק. זהו שדה ניסוי מבוקר לרעיונות של זמן יחסי: 'המפץ הגדול', 'הקריסה הגדולה' מיני-יקום הם תוויות אנלוגיות לגז כלוא, לא קוסמולוגיה אמיתית, והעבודה אינה טוענת לפתור את בעיית הזמן או את הכבידה הקוונטית.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research, 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

שעון שנבנה מאנטרופיה, בתוך מלכודת

בכבידה קוונטית קנונית יש חידה מוזרה ועיקשת: במשוואה המרכזית אין זמן. משוואת Wheeler-DeWitt, הדבר הקרוב ביותר למשוואת שרדינגר עבור היקום כולו, אומרת בפשטות שאופרטור מסוים הפועל על המצב נותן אפס. אין פרמטר חיצוני שמתקתק, שום דבר שמסדר "לפני" ו"אחרי" — ובכל זאת אנחנו חווים בבירור את חלוף הזמן. זו בעיית הזמן, והיא עומדת ללא פתרון כבר יותר מחצי מאה.

מאמר של מחבר יחיד ב-*Research Review Physical* אינו פותר אותה. מה שהוא עושה שקט יותר, ובדרכו גם שימושי יותר: הוא בונה מערכת מעבדתית קטנה ומבוקרת היטב שבה אפשר לבדוק מול נתונים אמיתיים משפחה אחת של תשובות מוצעות. Barontini Giovanni מאוניברסיטת ברמינגהם לוקח עיבוי בוז-איינשטיין — ענן של אטומים קרים מאוד שמתנהגים כאובייקט קוונטי יחיד — והופך אותו לאנלוג שבו אפשר למדוד את הרעיון של זמן "פנימי", יחסי, במקום רק להתווכח עליו. הטריק הוא לבנות שעון לא מסטופר חיצוני, אלא מן האנטרופיה שהמערכת מעבירה בתוכה.

המרחק בין "אנלוג מבוקר של בעיית הזמן" לבין "פיזיקאים פתרו את הזמן" הוא כל הסיפור כאן — וזה מרחק גדול מאוד.

מה החוקר עשה

המתקן הוא עיבוי של כ-24,000 אטומי רובידיום-87 המוחזקים במלכודת דיפול אופטית שמרנית ומונעים לתנועה — כל ענן האטומים נע הלך ושוב דרך המלכודת. מחסום אופטי דק — ברוחב של כ-8 מיקרון, מצויר באור של 675 ננומטר באמצעות התקן מיקרו-מראות דיגיטלי — מחלק את המלכודת לשני חצאים. מחצית אחת נצפית ("המגזר הבהיר"); השנייה אינה נצפית ("המגזר האפל"). במהלך חלון הניסוי, שאורכו כ-100 מילישניות, לא נמדדת אובדן חלקיקים או דיספיציה משמעותית, ולכן בקירוב טוב מדובר במערכת סגורה עם המיליטוניאן שאינו תלוי בעצמו בזמן.

[figure_pair pending]

משמאל, המלכודת המגנטו-אופטית מייצרת את ענן אטומי הרובידיום הקרים בתוך תא הזכוכית: שלב קירור מוקדם בדרך להכנת העיבוי. מימין, Barontini Giovanni עומד לצד המתקן האופטי. אלה תצלומים של המערכת המעבדתית שמאחורי הניסוי, לא תמונות של יקום זעיר ממשי.

כאשר צופים במערכת עם שעון מעבדה רגיל — תמונת בליעה אחת בכל 2 מילישניות — המגזר הבהיר עושה משהו מעורר אסוציאציות. אטומים זורמים דרך המחסום והמגזר גדל מכלום (Barontini Giovanni) מכנה את הרגע הזה "המפץ הגדול", מגיע להיקף מרבי, ואז מתכווץ ומתרוקן חזרה אל הצד האפל ("הקריסה הגדולה"). בהתאם לגובה המחסום, התהליך יכול לחזור במחזורים.

ואז מגיעה הנקודה האמיתית. שעון המעבדה הוא חיצוני למערכת — בדיוק מסוג הדברים שאינם קיימים במסגרת Wheeler-DeWitt. לכן Barontini שואל: האם אפשר לסדר את ההיסטוריה של המגזר הבהיר באמצעות גדלים פנימיים בלבד? התשובה שלו היא שעון שהוא מכנה זמן אנטרופי, שנקרא ישירות מאותן תמונות בשלושה צעדים פשוטים. ראשית, מכל תמונת בליעה הוא מחלץ ארבעה מספרים עבור המגזר הבהיר: מספר האטומים שבו, מרכז המסה של פרופיל הצפיפות שלו (שממלא את תפקידו של "שדה סקלרי" אנלוגי), רוחבו והאנטרופיה שלו — האנטרופיה לאטום, המתקבלת בשיטה סטנדרטית, מוכפלת במספר האטומים. שנית, כאשר אטומים חוצים את המחסום, האנטרופיה הזו עולה ויורדת. שלישית, השעון עוקב אחר גרדיאנט האנטרופיה לאורך מסלול מרכז המסה שנמדד, וסופר את גודל כל ההעתקה במקום את כיוונה. כאשר האנטרופיה ומרכז המסה עולים או יורדים יחד, כל צעד מקדם את השעון גם אם הענן משנה כיוון. בנתונים מתקבל כך סדר יחיד מן "המפץ הגדול" של המגזר ועד "הקריסה

הגדולה" שלו כמעט בכל מקום, עם כמה תנודות קטנות בלבד שבהן הדגימה הגסה גורמת לשני השינויים לא להסכים. לבסוף הוא גוזר "משוואת שרדינגר בזמן אנטרופי" אפקטיבית — משוואת התפתחות עבור המגזר הבהיר שנכתבת במונחי השעון הפנימי הזה במקום הזמן החיצוני — ופותר אותה נומרית כדי לבדוק אם היא משחזרת את מה שהמצלמה באמת תיעדה.

מה נמצא

שלוש תוצאות, בסדר עולה של שאפתנות.

- **השעון הפנימי עובד כסדר זמנים.** הזמן האנטרופי גדל בצורה מונוטונית כמעט בכל מקום, והמהירות שלו נקבעת לפי קצב מעבר האנטרופיה דרך המחסום: הוא רץ מהר יותר כאשר אנטרופיה מוחלפת ונעצר לחלוטין כאשר אין החלפה. במשטר ההפוך בעל המחסום הנמוך, לא חולף כלל זמן פנימי בין קריסה גדולה לבין המפץ הגדול הבא — מפני שבזמן הזה אין חילופי אנטרופיה — אף ששעות המעבדה ממשיכות לתקתק. לאורך כל מערך הנתונים, האנטרופיה הכוללת של שני המגזרים יחד נשארה קבועה בתוך פסי השגיאה, כנדרש ממערכת סגורה.
- **משטרים שונים נותנים "זמנים" שונים.** כאשר מעלים את המחסום חילופי האנטרופיה מצטמצמים, ולכן השעון הפנימי פועל לאט יותר. כאשר המחסום מגיע למצב שבו שני המגזרים כמעט אינם מתקשרים, המגזר הבהיר מתייצב לכיוון מה שהמאמר מכנה "מוות תרמי": מצב נייח שבו הזמן האנטרופי פשוט נעצר.
- **משוואה אפקטיבית משחזרת את הנתונים.** משוואת שרדינגר בזמן אנטרופי, כאשר מזינים אליה את פרמטרי הניסוי, משחזרת נומרית את התפתחות רוחב הענן שנמדדה, והמאמר מדווח על התאמה מצוינת במקרה של המחסום הנמוך (שבו האיבר המונע על ידי אנטרופיה דומיננטי); ההשוואה המספרית המפורשת נעשתה למקרה הזה.

מהי "בעיית הזמן", ומהו כאן "זמן אנטרופי"?

כוללת אינה (Wheeler-DeWitt) הקנונית הקוונטית הכבידה של היסוד שמשוואת העובדה היא **הזמן בעיית** כל את ולתאר כ"שעון", המערכת בתוך אחד פיזיקלי גודל לבחור: יחסית היא נפוצה תגובה חיצונית. זמן משתנה מחדש שקורסת מערכת — מונוטוניות תמיד אינן לשעון טבעיות שבחירות הוא חוזר קושי אליו. ביחס השאר ועד מתחלה יחיד כיוון נקייה בצורה לסמן יכול אינו הוא ולכן — אחורה ואז קדימה המוצע השעון את מריצה סוף.

זמן אנטרופי הוא דרכו של Barontini לעקוף את הבעיה הזו. במקום לקרוא משתנה דמוי-מיקום, הוא בונה את השעון מן האנטרופיה המוחלפת בין המגזר הנצפה לזה שאינו נצפה, באופן שתוכנן לא להתהפך. הרעיון קרוב ברוחו להצעות ותיקות יותר של "זמן תרמי", אבל כאן הוא מוגדר באופן תפעולי מתוך זרימת אנטרופיה שאפשר למדוד, ולא מתוך מבנה מתמטי מופשט — וזה בדיוק מה שהופך אותו לניתן לבדיקה במתקן אמיתי. חשוב במיוחד: המילים הקוסמולוגיות — "המפץ הגדול", "הקריסה הגדולה", "פקטור סקלה", "שדה סקלרי", "מיני-יקום" — הן תוויות אנלוגיות. הן מתארות תכונות של גז אטומים כלוא שבמקרה רומות מבחינה מבנית למשוואות של מודלים קוסמולוגיים מופשטים. הן אינן טענות על היקום האמיתי.

מה זה לא מוכיח

כאן צריך להיות זהירים במיוחד, משום שאוצר המילים מזמין הפרזה.

- **זה לא פותר את בעיית הזמן, וגם לא טוען לעשות זאת.** המסגור של המאמר עצמו הוא שהוא "מבסס סביבה ניסויית מבוקרת שבה אפשר לבדוק באופן כמותי בניות של זמן יחסי". שדה ניסוי אינו משפט מתמטי. השאלה אם זמן יחסי או אנטרופי הוא התיאור הנכון של זמן בכבידה קוונטית נשארת פתוחה בדיוק כפי שהייתה קודם.
- **זה אנלוג, לא היקום.** לא צופים כאן בקוסמולוגיה. צופים בעיבוי בוז-איינשטיין במלכודת, והתיאור המצומצם שלו דומה מתמטית למודל קוסמולוגי מפושט ("minisuperspace") הדמיון הוא כל נקודת הניסוי; והוא גם הגבול שלו. שום דבר כאן לא מראה שהיקום המוקדם עבר מפץ גדול מסוג זה, שמרחב-זמן עשוי מאטומים, או ש"הזמן אינו קיים".
- **זה לא מראה שהזמן הוא 'באמת' אנטרופיה.** השעון האנטרופי הוא סדר פנימי אחד שנבנה ועובד היטב במערכת הזו. המאמר מציין קרבה רעיונית להשערת הזמן התרמי, אך משאיר במפורש פתוח אפילו אם השניים חופפים. "שעון פנימי הבנוי מאנטרופיה יכול לסדר את הניסוי הזה" היא טענה צרה בהרבה מ"הזמן הוא אנטרופיה".
- **המשוואה האפקטיבית היא תוצאה של מידול, לא כתיבה מחדש של מכניקת הקוונטים.** משוואות שרדינגר שנגזרה בזמן אנטרופי מצטמצמת למכניקת הקוונטים הרגילה כאשר זרימת האנטרופיה איטית, והיא בדיוק התורה היוניטרית הרגילה רק כאשר אין כלל זרימת אנטרופיה. המאמר מציג אותה ככללית יותר מן המשוואה הסטנדרטית באופן ספציפי כאשר מערכת נצפית פתוחה תרמודינמית למערכת שאינה נצפית — טענה על תת-מערכות פתוחות בסידור מן הסוג הזה, לא טענה שחוקי היסוד של הפיזיקה חייבים להיכתב מחדש כך.
- **זה ניסוי אחד, מחבר אחד ובחירת שעון אחת.** התוצאות נושאות אי-ודאות סטטיסטית של בערך 5% לכל נקודת נתונים ונשענות על קירובי שדה ממוצע וצפיפות ממוצעת. השעון שנבחר וה-graining הגס הם החלטות מידול מכוונות, מהסוג שקבוצות אחרות ירצו לבחון לפני שמסיקים מסקנות מבניות.

עד כמה הראיות חזקות

עבור הטענה הצנועה שהמאמר באמת מעלה, הראיות נקיות. המערכת מבודדת היטב באמת בסקאלת הזמן הרלוונטית, מאזן האנטרופיה נסגר (האנטרופיה הכוללת קבועה בתוך פסי השגיאה), השעון הפנימי אכן מסדר את הנתונים בצורה מונוטונית כמעט בכל מקום, ומשוואה אפקטיבית שנגזרה על ידי המחבר מאותו מודל עם פרמטרים שהוסקו מן הנתונים משחזרת את הדינמיקה שנמדדה במקרה בעל המחסום הנמוך שבו יושמה. הנתונים זמינים בגלוי. זו מדידה אמיתית של מערכת אמיתית וניתנת לשליטה, לא ניסוי מחשבתי.

המשקל שהיא יכולה לשאת צנוע בהתאם. הכול נשען על האנלוגיה בין מודל העיבוי המצומצם לבין קוסמולוגיית minisuperspace ואנלוגיות יכולות להאיר בלי להוכיח. פלטפורמה אחת, ממחבר יחיד, שמראה שמתכון אחד לזמן פנימי עובד היא הוכחת עיקרון חזקה ובסיס חלש לכל טענה על האופן שבו הזמן פועל בטבע. הקריאה הנכונה היא: כעת זו שיטה שאפשר לבצע במעבדה, ולבדוק.

למה זה חשוב

הדיונים בבעיית הזמן היו תקועים זמן רב ברמת הפורמליזם, שבה קשה להפריך הצעות מתחרות מפני שהן מניבות מעט תחזיות קונקרטיות וניתנות למדידה. הפיכת אפילו פינה אחת של הוויכוח לניסוי שאפשר להריץ — שבו שעון

פנימי או מסדר את הנתונים או לא, ומשוואה אפקטיבית או מתאימה או לא — משנה את אופיו של הדיון. היא נותנת לתיאורטיקנים ספסל עבודה שעליו אפשר לבדוק את הכלים שלהם.

זו התרומה האמיתית: לא תשובה על הזמן, אלא מקום שבו אפשר לשאול את השאלה באופן כמותי. פלטפורמות של אטומים קרים כבר שימשו כאנלוגים נשלטים לקרינת הוקינג, ליקומים מתפשטים ולדעיכת ואקום כוזב; העבודה הזו מוסיפה לארגז הכלים זמן יחסי וחץ זמן. הערך נמצא במחקר ההמשך שהיא מאפשרת — בחירות שונות של שעון, התנהגות קופצנית לעומת סינגולרית, מבחני הפיכות — שכל אחד מהם יכול כעת להיות מדידה ולא רק חישוב.

בקצרה

פיזיקאי בנה עיבוי בוז-איינשטיין, פיצל אותו בעזרת מחסום אופטי דק למחצית נצפית ולמחצית שאינה נצפית, והשתמש באנטרופיה הזורמת בין השתיים כדי לבנות "זמן אנטרופי" פנימי. השעון הזה מסדר את מחזור ההתפשטות והקריסה מחדש של המחצית הנצפית, רץ מהר כאשר אנטרופיה מוחלפת ונעצר כאשר אין חילוף, ומשוואה אפקטיבית שנכתבת בזמן הפנימי הזה משחזרת את הנתונים שנמדדו במקרה של המחסום הנמוך שנבחן. המתקן הוא אנלוג ל"בעיית הזמן" בכבידה קוונטית קנונית: "המפץ הגדול", "הקריסה הגדולה" ו"מיני-יקום" הם תוויות לגז כלוא שדומה מתמטית למודל קוסמולוגי מפושט. זהו שדה ניסוי מבוקר לרעיונות של זמן יחסי — לא פתרון לבעיית הזמן, לא טענה על היקום האמיתי ולא ראיה לכך שהזמן הוא "באמת" אנטרופיה.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: במערכת אחת מבודדת היטב של אטומים קרים, שעון פנימי שמוגדר מתוך חילופי אנטרופיה יכול לסדר באופן מונטוני את הדינמיקה הנצפית, ומשוואת "זמן אנטרופי" אפקטיבית משחזרת את ההתפתחות שנמדדה במקרה של המחסום הנמוך שנבדק.

מה סביר אך לא הוכח: שזמן אנטרופי או יחסי הוא תיאור טוב של זמן בכבידה קוונטית אמיתית. הניסוי מתיישב עם האפשרות לקחת ברצינות מבנים כאלה; הוא אינו מאשר אותם לגבי הטבע.

מה הוא אינו מראה: שבעיית הזמן נפתרה; שהכבידה הקוונטית נפתרה; שהיקום התחיל במפץ גדול מסוג זה; שמרחב-זמן נובע מאטומים; או ש"הזמן אינו קיים".

המגבלות העיקריות: פלטפורמה יחידה, מחבר יחיד ובחירת שעון אחת; אי-ודאות של בערך 5% לכל נקודה; קירובי שדה ממוצע וצפיפות ממוצעת; ומעל הכול, הסתמכות על אנלוגיה בין עיבוי כלוא לבין מודל קוסמולוגי מפושט.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? ביטחון גבוה שהניסוי עשה את מה שהוא מדווח בתוך המערכת שלו. ביטחון נמוך בכל קפיצה מן האנלוג הזה לטענות על הזמן ביקום האמיתי.

מקורות