

נספח: רקע מדעי למאמר 'מותר האינפורמציה' (פורמציה) – אותיות ובניית עולמות בעידן המידע'

רולי בלפר

חלק א: תורת האינפורמציה ויישומים לעולם הטבע

תורת האינפורמציה¹ שניסח קלוד שאנון היא הענף של המתמטיקה היישומית הנדסת התקשורת, הנעזר בכלים סטטיסטיים לכימות והסדרה של הטיפול בתקשורת – קיבולת, קידוד, פיענוח, כיווץ, הגנה, ועוד כלים המרכיבים תיאוריה מתמטית-שימושית של ניהול מסרים. התורה המתמטית המטפלת במסרים של מידע דיגיטלי נולדה מתוך מאמצי ההתמודדות עם בעיות שעלו במהלך מלחמת העולם השנייה, בה קידוד ופיענוח צפנים היה צורך דחוף. בעיות אלה עברו ניתוח אינטנסיבי במהלך שנות המלחמה, והניסוח התיאורטי של תורה העוסקת בכך יצק צורה מתמטית (יישומית וגם תיאורטית) לבעיות אלה. העוצמה הגלומה בתורת האינפורמציה של שאנון היא בחופש שיש לתקשורת ממצע טכנולוגי מסוים; הנוסחאות של קיבולת קו-נתונים ושל יחסי אות-רעש לא רק הגדירו את היכולת של המערכות הקיימות בזמנו, אלא גם התוו שיא פוטנציאלי שהטכנולוגיה של התקשורת והמיחשוב שואפת אליו מזה מחצית המאה, ובדרכה מחוללת את מהפכת האינפורמציה על השלכותיה רחבות ההיקף.

במסגרת הכלים של תורת האינפורמציה, שאנון הפיק נוסחה לכימות האינפורמציה הגלומה במסר מסוים, המתבססת על חוסר הידיעה של המקבל: מדד זה הוא נוסחה סטטיסטית של מידת ההפתעה שיש לכל חשיפת זהות של אות נוספת במסר. כשמדובר במסר המורכב מאלף-בית של שפה טבעית, מידת ההפתעה נמדדת בסיכוי הסטטיסטי לקבל אות מסוימת לעומת אחרת, על פי התפלגויות של הופעת האותיות באותה שפה. יחידה של אינפורמציה היא מכפלת הסיכוי להופעת אות מסוימת בלוגריתם הטבעי של אותו סיכוי, מה שמאפשר² את הסכימה של אינפורמציה עבור כל המסר. עבור מסר המכיל מספר רב של אותיות (i), הנוסחה היא:

$$H(x) = - \sum_i P(x_i) \ln(P(x_i))$$

כאשר הסיכויים במשוואה ($P(x_i)$) הם מידת ההפתעה שבמצאית אות כזו או אחרת בשפה של המסר, והסכום הוא תוצאה של אוסף כל האותיות במסר הכולל. בסדרה של הטלות מטבע, בה יש סיכוי של 0.5 לכל הטלה, הסכום הוא של כמות ההטלות עצמן,³ המכונה 'ספירת ביטים'. מה שנמדד בפועל במשוואה זו הוא חוסר הידיעה (קרי ההפתעה הפוטנציאלית) לגבי מרכיבי המסר, או לחילופין מידת ההשחתה של האות המגיע ממקור מרוחק. מדד זה מתאים לקביעה מהו הכיווץ החזק ביותר שאפשר להפעיל על מסר כך שניתן יהיה

¹ Shannon, Claude. E., 'The mathematical theory of communication'. Bell Syst. Tech. J. 27, 1948, pp. 379–423
² בגלל תכונת האדטיביות של לוגריתמים ביחס לגורמים המוכפלים בתוכם, כשהסיכויים לאות אחר אות בלתי תלויים ולכן מוכפלים אלה באלה, הביטוי הלוגריתמי שלהם הוא של סכימה. סכימה זו תואמת את הספירה של אינפורמציה ככמות של משהו (במקרה של תורת שאנון – של ביטים).
³ כיון שהסיכוי הוא 0.5, הלוג (על בסיס 2) של הסיכוי הוא -2, ובהכפלת המקדם והסיכוי עצמו, האנטרופיה של כל הטלה היא 1. הסכום של האנטרופיות בכל ההטלות הוא סכום ההטלות עצמן. המונח הטכני שאנון משתמש בו (בעקבות ידיו טוקי במעבדות המחקר של BELL, IBM), הוא ה-bit – יחידה של אינפורמציה המגולמת על ידי אפשרות של מענה 'כן/לא'. זוהי סיפרה בינארית – binary digit – המשמשת אצל שאנון כיחידה הבסיסית הן של תאוריה של תקשורת והן של מיחשוב.

לשחזר אותו במלואו אצל המקבל. לפי ההגדרה של Noiseless Channel Coding Theorem של שאנון, האינפורמציה – $H(x)$ של המשוואה, מוגדרת כגודל הקטן ביותר אליו ניתן לצמצם את המסר. מדד זה נותן כלי לבדיקת העמידות של האות – עד איזו מידה של השחתת מכתב עוד ניתן למצות ממנו מסר שלם.⁴

אין באינפורמציה כזו שום מדד של חשיבות המידע הטמון במסר – אין הבחנה בין רשימת קניות, שיר אהבה או מכתב ריגול גורלי, אלא כימות אובייקטיבי ומנותק של מידע במכנה המשותף האוניברסלי של טכניקת תקשורת. למרות זאת חשוב לזכור שאי אפשר להימנע מגרעין של סובייקטיביות אפילו בתיאור כזה של אינפורמציה: למרות ההימנעות⁵ המוצהרת הזו ממידע סובייקטיבי במדידת האינפורמציה, עדיין טמון גם במדד המתמטי-יבש ממד בלתי ניתן לניעור של תקשורת אינטר-סובייקטיבית: מכתב ומקבילו, מסר הממוען ופיענוחו על ידי הממוענים. אכן, בהוצאה השנייה של המאמר המכונן של תורת האינפורמציה, שאנון עצמו הסכים לקבל את קיום מאפיין הסובייקטיביות הבסיסית הזו לאחר התערבותו של ידידו וויבר, מייסדי הקיברנטיקה, שגם כתב הקדמה לחיבור של שאנון.⁶

הקשר בין תורת האינפורמציה לפיסיקה הוא מורכב היסטורית ורעיונית, עם יישומים ברמות שונות של עומק, לכידות והצלחה. ליישומים אלה יש הקשרים מגוונים, אך המשותף לכולם הוא היניקה מגרעין מתמטי משותף. הצורה המתמטית של נוסחת שאנון לאינפורמציה זהה בצורתה לנוסחה של אנטרופיה במיכניקה הסטטיסטית. המיכניקה הסטטיסטית של בולצמן וגיבס (H Theorem), מתייחסת אל סיכויים למציאות של מערך המולקולות בקונפיגורציה מסוימת. בבסיסה עומדת משוואה עבור האנטרופיה של המערכת, שאיננה מתארת את האנטרופיה במונחים של אנרגיה ניתנת לניצול אלא במונחים של סטטיסטיקה של מצבים, בפונקציה לוגריתמית:

$$S = -k \sum_i P_i \ln(P_i)$$

כאשר P_i הוא הסיכוי למצוא את המערכת בקונפיגורציה מסוימת, ו- k הוא הקבוע של בולצמן.⁷ נוסחה זו של המיכניקה הסטטיסטית⁸ איננה אלא מדד של הסיכוי לסידור של המערכת על כל החלקיקים המיקרוסקופיים המרכיבים אותה. האנטרופיה היא מדד של אי-סדר, תשקיף של מספר הסידורים השונים האפשריים (כל סידור בסיכוי של P_i) של המערכת. אלה הן הקונפיגורציות שאינן עדיפות זו על זו, ומהוות את דרגות החופש של סידור המערכת. בתיאור זה האנטרופיה מודדת את חוסר הידיעה⁹ לגבי הסידורים הספציפיים של החלקיקים,

⁴ שני התיאורים האחרונים הינם קשורים, ועוסקים במאפיין של המסר שבתורת האינפורמציה מכונה redundancy של האות – עמידות העולה מקידוד שמאפשר שחזור גם לאחר צמצום מכוון בנפח או רעש המפריע לקליטה.

⁵ היסוד הסטטיסטי של מדד זה הוא הסיכוי לקבלת אות מסוימת על פני אחרת, בצורת הקידוד שלה כמידע בינארי – bit (שם התהליך – ספירת ביטים). בעבודתו של שאנון במעבדות בל, כל מטען של משמעות מודד במפורש מן הניתוח המתמטי.

⁶ Shannon, Claude. E. & Weaver, Warner (1962), "The mathematical theory of communication". Urbana, IL: The University of Illinois Press.

⁷ שאנון לא מתייחס אל הקבוע של בולצמן כעקרוני, אלא כסקאלה ומדד מסוים אפשרי של אנטרופיה. לשיטתו, האנטרופיה משתנה לפי נקודת המבט, והקבוע של בולצמן הוא נקודה שכזו. בהמשך הדרך, עם התיאום בין האינפורמציה של שאנון והאנטרופיה הפיסיקאלית, האנטרופיה המוכללת היא אכן נטולת ממדים.

⁸ המכניקה הסטטיסטית היא תיאור מתמטי של התנהגות מערכות חומר ואנרגיה שאינן נשען על המניע המקורי לפיתוח הענף של מדע החום – שיפור היעילות של מנוע ומחזורי החום של קרנו. יש פער מושגי עקרוני בין התיאוריה התרמודינמית לפני התיאור על בסיס המכניקה, לבין התיאוריה של בולצמן. התיאוריה הקלאסית מתארת את האנטרופיה במונחים של אנרגיה וטמפרטורה (היחס בין השינוי באנרגיה לבין הטמפרטורה של המערכת), בעוד שבמכניקה הסטטיסטית יש לטמפרטורה משמעות הקשורה למהירות הממוצעת של חלקיקים; בולצמן מציע ניתוח מתמטי של המערכת והסידור של מרכיביה (H). זוהי לא דרוקציה במובן המלא של המילה – ניסוח של תיאוריה אחת במערכת מונחים חדשה המכילה אותה. שתי הבעיות המרכזיות הן: ראשית, התיאור המכניסטי מתקשה להסביר את החד-כיווניות של עליית האנטרופיה, כיוון שהמכניקה הניוטונית היא רוורסבילית לגמרי. שנית, התרמודינמיקה הסטטיסטית מכניסה מימד של סובייקטיביות מובלעת אל תוך תורה מדעית שאמורה לתת כללי יסוד להסבר הטבע. הידע-לגבי-המערכת הוא מונח מבלבל; עבור השד של פלס, למשל, האנטרופיה של העולם כולו איננה קיימת, כיוון שהידע שלו לגבי הקונפיגורציה של המערכת הוא מושלם.

⁹ זוהי פרשנות שלא נוחה כלל למדענים רבים. הוספת ממד של סובייקטיביות לתיאור המתמטי של מערכות פיסיקאליות הינו זר ומוזר למחשבה המדעית. פרשנויות חלופיות למידת הידיעה עליה דיבר בולצמן כלולות מדד של שכיחות או של סיכויים להופעה של קונפיגורציה

הנמצאים במערך מסויים (אך לא ניתן לבירור מלא) של מיקומים ומהירויות מתוך כל הסידורים האפשריים. ניסוח זה מחליף את היחס של אנרגיה שימושית לעומת אנרגיה תרמית במעגל התרמודינמי, ממנו צמח החוק השני אצל רודולף קלאוזיוס במקור: הגבול של יעילות מקסימלית של מנוע, והחמקמקות המתסכלת של המנוע המתמיד – ה-Perpetuum Mobile. התיאור של בולצמן מעמיד את התרמודינמיקה על אדני הסטטיסטיקה וניתוח המידע,¹⁰ בהטרמה של תיאוריית התקשורת שתבוא.

בנוסף למכנה המשותף המתמטי עם הנוסחה לאינפורמציה של שאנון, גם לאנטרופיה של בולצמן וגיבס ניתן לייחס מימד של סובייקטיביות – תכונה בעייתית אצל תיאוריה מדעית.¹¹ ובכל זאת, הפרשנות של חוסר הידע לגבי המערכת הולכת ומתחזקת לאחר הצלחתה של תורת האינפורמציה. המדד לאי הסדר בפיסיקה והמדד לאינפורמציה בתיאוריה מתמטית של תקשורת זהים בצורתם המתמטית.¹² במילים אחרות, 'אינפורמציה' בתורת-האינפורמציה איננה הידע עצמו, אלא מידת חוסר הוודאות לגביו. במקביל,¹³ התיאור הפיסיקאלי של האנטרופיה מוסט מתיאור של יחסי אנרגיות במערכת אל תיאור של ידע פוטנציאלי לגביה, והמרחק של החוקר מן היכולת לקבוע באופן מוחלט את מצב המערכת.

בדרך כלל לא מודגש הצד של כימות של חוסר הידע כבסיס של האנטרופיה בתורת האינפורמציה, אך ההבנה של קבלת חוסר הידע ככלי לניתוח של מערכת, נסיגה זמנית מטיפול באות לטובת הרעש, חילחלה אל המדע בדרכים שונות: דוגמה לגישה זו היא כיוון המחקר אותו הציע E T Jayens למכניקה סטטיסטית, אותו כינה 'עקרון המקסימום-אנטרופיה' (Maximum Entropy Principle – MaxEnt).¹⁴ לפי העיקרון הזה, האנטרופיה המקסימלית במובן של תורת האינפורמציה זהה לאנטרופיה המקסימלית הפיסיקאלית, ושתייהן משקפות את מצב הידע המינימאלי לגבי המערכת. צמצום היומרה לידע לגבי מערכת פיסיקאלית מצד החוקר – קרי הגדלת הענווה של השאיפה לידע, קבלת חוסר הידע לגבי המערכת, היא גישה הנאמנה להבנת הטבע עצמו. הגדלת חוסר הידע משמעותה הגדלת האנטרופיה, וזו בתורה מהווה תכונה פיסיקאלית של המערכת. ניתן להגיע לתובנה לגבי המערכת דווקא דרך ויתור על השליטה של תיאור מלא.

יישום רחב של תורת האינפורמציה הן לתהליך הניסוי והן לחלק של ההיסק התיאורטי, הוצע על ידי ליאון ברילואין (המפורסם בשל עבודתו בתחום הפיסיקה של המצב המוצק),¹⁵ שהתרשם רבות מן ההתקדמות של תורת האינפורמציה והקיברנטיקה. האנטרופיה של האינפורמציה של שאנון מקבלת אצל ברילואין שם המדגיש יותר את שימושה בפיסיקה כמדד של חוסר ידע – Negentropy:

מסוימת. ראו - Von Bayer, Hans Christian, *Information: The new Language of Science*, Harvard University Press, 2005, pp. 90-96.

¹⁰ בשנים האחרונות מתבצעים מחקרים המחברים את הקצוות האלה של הניתוח המתמטי-מדעי, ומתארים את המעגלים התרמודינמיים במונחים של תורת-אינפורמציה. ראו למשל O. Shental, I. Kanter, 'Shannon meets Carnot: Generalized second thermodynamic law', *EPLA* 85, Jan 2009

¹¹ חוסר ידיעה לגבי המערכת איננו הדרך היחידה לתאר את המיכניקה הסטטיסטית של בולצמן, ואכן המתנגדים לפירוש זה מבינים אחרת את המשוואה (במונחים של פיזור שכיחויות על מרחב הפאזה המופשט).

¹² השימוש באותו השם הוא לכאורה עניין הסכמי ו חיצוני לדבר עצמו ('a rose by any other name...'), אך הוא מצביע במקרה זה על הלך רוח מעניין. מן המפורסמות בקרב לומדי תורת האינפורמציה ופיסיקה, שהמתמטיקאי ופיסיקאי ג'ון וון נוימן הציע לשאנון את השם אנטרופיה עבור המדד שלו לאינפורמציה כיוון שבכל מקרה אף אחד לא יכול להגדיר במדויק את משמעות התכונה התרמודינמית של החוק השני, כך שידו של שאנון תהיה על העליונה בויכוחים.

¹³ כאמור לעיל (הערה 7), שאנון עצמו לא הפריד בין 'אנטרופיות' השונות – זו של תורת התקשורת וזו של הפיסיקה. את השימוש בקבוע של בולצמן במכניקה הסטטיסטית הסביר כתלוי בנקודת המבט ממנה בודקים את המערכת, כיון שמדידת האינפורמציה תלויה בקנה המידה בו משתמשים. ניתן למצוא נקודת מבט תיאורטית בה לאנטרופיה אין מימדים, כפי שעשה בהמשך בקנשטיין.

¹⁴ Jaynes, E. T. (1957a), 'Information Theory and Statistical Mechanics'. *Physical Review* 106, pp. 620-630; 'Information Theory and Statistical Mechanics II', *Physical Review* 108, pp. 171-190

¹⁵ (Brillouin Leon. *Science and Information Theory*, New York: Academic Press, 1956 (reprint edition Dover: 2004

Since we do not specify the positions and velocities of the atoms, we are unable to distinguish between two different samples of the gas, when the difference consists only in different positions and velocities for the atoms. Hence we can describe the situation as one of disordered atomic motion... Hence what Shannon calls entropy of information actually represents *negentropy*.

Leon Brillouin¹⁶

השלב הבא של כניסת האינפורמציה – כאלמנט בסיסי של תקשורת ומחשוב – הוא ההשפעה על ההתמודדות עם בעיות פיסיקאליות, מהן נתבונן בשתיים מרכזיות. הראשונה היא ניסוי מחשבה מפורסם מימי המכניקה הסטטיסטית – השד של מקסוול, והשניה היא האופי הפיסיקאלי של חורים שחורים, המוביל לתוצאות מרחיקות לכת בנוגע למציאות הפיסיקאלית עצמה.

להלן נסקור כיצד הדמיון המתמטי מקשר בין תורת האינפורמציה והתרמודינמיקה באופן שהולך ומעמיק ככל שהמחקר מתקדם. ענפים שלמים של הפיסיקה מקבלים גוון של חקר האינפורמציה – כגון תרמודינמיקה של חורים שחורים (Black Hole Thermodynamics - BHTD) ותורת האינפורמציה הקוונטית (Quantum Information Theory - QIT).

חלק ב: השד של מקסוול

...if we conceive a being whose faculties are so sharpened that he can follow every molecule in its course, such a being, whose attributes are still as essentially finite as our own, would be able to do what is at present impossible to us. For we have seen that the molecules in a vessel full of air at uniform temperature are moving with velocities by no means uniform, though the mean velocity of any great number of them, arbitrarily selected, is almost exactly uniform. Now let us suppose that such a vessel is divided into two portions, A and B, by a division in which there is a small hole, and that a being, who can see the individual molecules, opens and closes this hole, so as to allow only the swifter molecules to pass from A to B, and only the slower ones to pass from B to A. He will thus, without expenditure of work, raise the temperature of B and lower that of A, in contradiction to the second law of thermodynamics.

James Clerk Maxwell¹⁷

אחד מניסויי המחשבה המאתגרים שמלווים את המיכניקה הסטטיסטית, ומשמש תפקיד מכריע בפיתוח היחס אל אינפורמציה כאובייקט למחקר פיזיקאלי, הוא ניסוי המחשבה המפורסם של ג'יימס קלרק מקסוול¹⁸ (מנסח משוואות האלקטרודינמיקה) בתרמודינמיקה הסטטיסטית של סוף המאה ה-19. במסורת של שדים מדעיים,¹⁹ השד של מקסוול דוחק את גבולות המודל המדעי ובודק את עמידות התיאוריה המדעית.

מקסוול חקר את ההשלכות של תרמודינמיקה כשזו מנוסחת עבור מערכות המורכבות מכמות עצומה של חלקיקים בודדים. השד הוא ישות (פיזיקאלית, מוגבלת בחוקי הטבע) המסוגלת לשבת בין שני חלקי תא המכיל מולקולות גז, ולבצע החלטות לגבי המעבר של החלקיקים מצד אחד לצד שני.

שלילת המעבר של מולקולות מהירות מצד אחד לשני מייצרת שינוי בטמפרטורה ובכך חוסר איזון ניתן לניצול שהינו לכאורה חופשי מהשקעת אנרגיה (בגלל הקלות הבלתי נסבלת – ולדעת רבים בלתי מתקבלת על הדעת – של הבחירה אותה מבצע השד). לכאורה יש כאן אפשרות ממשית של מכונת תנועה מתמדת, 'אבן החכמים' של התרמודינמיקה. יתר על כן, מדובר בסוג היותר בעייתי של מכונה שכזו – שכן בגלל פעולת השד, האנטרופיה של המערכת כולה יורדת. במונחים של המכניקה הסטטיסטית, מתקבל סידור של המערכת (קרי ידע לגבי פיזור המהירויות) מתוך מצב של פיזור אחיד – נוצר סדר יש מאין. מטרתו של מקסוול היתה להראות שהחוק השני של התרמודינמיקה הוא חוק סטטיסטי, עם וריאציות מקומיות ונקודות קיצון בהן השפעה קטנה יכולה לשנות את גורל

James Clerk Maxwell, *Theory of Heat*, Dover 2001 [Originally published: London-New-York: Longmans, Green & Co 1888 with Maxwell's corrections and additions to the 1871 edition], pp. 329-330

¹⁸ להסבר תיאורטי נגיש והדגמה ויזואלית ראו באתר האינטרנט של Khan Academy, המוקדש להנגשת ידע מדעי ברמה גבוהה לקהל המתעניינים הכללי: <http://www.khanacademy.org/video/maxwell-s-demon?playlist=Chemistry>

¹⁹ שדים ההופכים להיות יותר ויותר אנושיים, עם 'ירידת הדורות': מהדמיון המתעתע של דקרט דרך האינטלקט המושלם – השד של לפלאס – ועד לניסויי המחשבה המכניסטיים שבאים בעקבות השד של מקסוול. ראו Silvan S. Schweber "Demons, Angels, and Probability: Some Aspects of British Science in the Nineteenth Century", in Shimony, A and Feshbach, H. (eds.) *Physics as Natural Philosophy: Essays in honor of Lazlo Tisza on his Seventy-fifth Birthday*, Cambridge, Mass.: The MIT Press 1982, pp. 319-363.

המערכת כולה.²⁰ מתקפה זו על החוק השני של התרמודינמיקה עוררה התנגדויות ודיונים שנמשכים ומפרים את המדע²¹ והתרבות²² עד היום. בסופו של דבר, הכימות המתמטי של מחיקת מידע שימש לטיפול בבעיית השד של מקסוול, באופן המכליל את החוק השני של התרמודינמיקה ומעגן אותו בחוסר הידיעה.

בממשק שבין אינפורמציה ופיסיקה היה לשד של מקסוול השפעה מכריעה: בשנת 1929 הציע לאו סזילארד²³ את הקשר בין אינפורמציה לבין תרמודינמיקה. הוא הציע שככל שהשד של מקסוול מבצע עבודה ברכישת המידע לגבי החלקיקים, כך האנטרופיה של השד עצמו עולה – הלא הוא חלק בלתי נפרד מן המערכת הפיסיקלית²⁴ (שאם לא היה כזה לא היה כאן כל פוטנציאל לערעור של החוק השני). מאוחר יותר הראה בנט²⁵ שניתן לרכוש את המידע בתהליך שאיננו מעלה את האנטרופיה של השד עצמו; הוא הראה שהחלק הקריטי של ה'מעגל התרמודינמי' – פעולת הברירה של השד – החלק שממנו באמת אי אפשר להתחמק, הוא מחיקת המידע לקראת ההחלטה הבאה.²⁶ על מנת לבצע את הפעולה של ההחלטה הכרחי באיזשהו שלב לאבד את הידע לגבי הפעולות הקודמות.²⁷ לאיבוד המידע יש צורה מתמטית – הריהו האנטרופיה של האינפורמציה של שאנון, שכאמור זהה מתמטית לנוסחה עבור תרמודינמיקה סטטיסטית. שכחת המידע של השד התוקף את החוק השני – היא היא הכללת האנטרופיה, חלק בלתי נפרד מבסיסו של החוק השני.

בעקבות זאת, הציב רולף לאנדאוור את העקרון הקרוי על שמו: איבוד אינפורמציה פיסיקלית מתלווה תמיד לעלייה באנטרופיה.²⁸ לנדאוור הסביר שאפילו תמרון מיקרוסקופי של החומר, המעלה את רמת הסדר שלו ובכך מקטין את האנטרופיה, בא על חשבון איבוד המידע של השד, המחיקה הבלתי נמנעת בכל תהליך, אותה תורת האינפורמציה מכמתת בדיוק בזהות למבנה המתמטי המקורי של אנטרופיה. אינפורמציה היא שכחה, איבוד ידע; שכחה היא אנטרופיה במערכת פיסיקלית; התרמודינמיקה ותורת האינפורמציה עוסקות באותו נושא עצמו – מדד של אי סדר, של חוסר ידע. חיבור תחומים אלה, המוביל את לאנדאוור להצהרה כי Information is Physical,²⁹ מבטאת את הצימוד בין אינפורמציה ופיסיקה של מערכות מרוכבות, כשהחיבור אוגד את התיאוריה של מחשוב ושל תקשורת יחדיו בחיבור שבין תרמודינמיקה פיסיקלית ואנטרופיה של

²⁰ כך שבקנה מידה מקומי ניתן למצוא פלקטואציות של סדר מקומי גבוה. יתר על כן, מובטח מקומה של הבחירה והאחריות האישית בעידן (סוף המאה ה-19) של מדע השואף להעמיד את כל ההתרחשות בעולם על רדוקציה דטרמיניסטית. מקסוול היה מדען דתי, שלקח ברצינות תהומית גם את עולמו הדתי וגם את עבודתו כמדען, לא כעולמות נפרדים אלא כתחומים שהוא חי בהם יחדיו. הוא שאף להביא את התיאור המדעי של העולם למצב בו יהיה מקום במערכת הפיסיקלית גם להכרה ולהחלטה של האדם. המטאפורה המקורית של מקסוול (ה'שד' נקרא כך בפי ירדו לורד קלווין) היה של pointsman – אדם שתפקידו להכווין את הרכבות (הסמל השועט של העידן התעשייתי) בהפעלת שיקול דעת ופעולות מינימאליות של החלטות.

²¹ לאסופת מאמרים מרכזיים בתחום ראו: Harvey S. Leff, Andrew F. Rex, [Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information](#), CRC Press 2003

²² Clarke Bruce, 'Allegories of Victorian Thermodynamics', *Configurations* 4.1 (1996) pp. 67-90
²³ L. Szilard, 'On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the intervention of Intelligent Beings', *Z. Phys.* 53:840 (1929)
Behavioral Science 9:301 (1964), p. 539, תרגום לאנגלית.

²⁴ המוקד של העיסוק בשד במערכת פיסיקלית מקרב את האינפורמציה לפיסיקה. כשמתמקדים בצד זה של הבעיה ומדגישים את הצורך להבין את מגבלות היכולת הפיסיקלית של השד עצמו, צץ קשר חזק בין ניתוח של אינפורמציה ופיסיקה עם נושאים אחרים שצומחים במלא המרץ במאה ה-20 – תיאוריות של חישוביות, של תודעה ושל קיברנטיקה. לסקירה של הגישות השונות לאתגר שמציב השד של מקסוול, ראו *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information*.

²⁵ Bennett C. H. (1973), 'Logical reversibility of computation', *IBM Journal of Research and Development*, vol. 17, no. 6, pp. 525-532, 1973.

²⁶ בזאת הראה שיש כאן קישור משולש בין תורת האינפורמציה, החישוביות ופיסיקה. החיבור ההיסטורי בין הנושאים האלה מתחיל מוקדם יותר, עם הקיברנטיקה והניסוח המשותף של תורת האינפורמציה (במהדורה השנייה של פרסומה) על ידי שאנון וירדו וויבר – אבי מדע הקיברנטיקה.

²⁷ סזילארד תיאר כיצד תיראה השבירה של החוק השני לו השד של מקסוול היה מסוגל לה: בתיבה חצויה בעלת חלקיק אחד בדיוק, השד יודע באיזה חצי של התיבה החלקיק נמצא, ויכול להשתמש בו כדי להניע בוכנה קטנה. הצורך לאפס את המערכת לפני כל שימוש שקול לתוספת של יחידת אנטרופיה הנמדדת ביחידות של ביטים.

²⁸ העקרון של לנדאוור מנוסח ב: Rolf Landauer: '[Irreversibility and heat generation in the computing process](#)', *IBM Journal of Research and Development*, vol. 5, pp. 183-191, 1961

²⁹ Rolf Landauer, *Information is Physical*, Proc. Workshop on Physics and Computation PhysComp' 92 - IEEE Comp. Sci. Press, Los Alamitos, 1993, pp. 1-4

אינפורמציה. זהו קשר אונטולוגי טעון,³⁰ החורג מאמצעי הניתוח של הדינמיקה הפיסיקאלית וכבר רומז לגישות קיצוניות יותר של תיאור העולם כמערכת אינפורמציה.

חיבור תורת האינפורמציה והפיסיקה משלב בין התיאור של החוק השני ל'סטטיסטי בלבד' (כפי שרצה מקסוול), ובין האנטרופיה כחוק פיסיקאלי עמוק, עקרונות³¹ (כפי שהתבטא איינשטיין), המבטא תכונות מושרשות ומשותפות לטבע ולמתמטיקה המתארת אותו. ההשלכות של זהות כפולה כזו של החוק השני – סטטיסטיים ועקרונות המשמשות יחדיו – מקדמות את עלילת המדע רווי-האינפורמציה אל היישומים הפיסיקאליים של תורת האינפורמציה לשם תיאור מערכות שיוצאות מגדר ניסויי מחשבה, ונכנסות לתחום של פיסיקה תיאורטית 'קשה' – העוסקת באובייקטים פיסיקאליים של ממש.

השד של מקסוול לא פסח גם על הדמיון האנושי של מדענים ואמנים,³² בייצגו את הגבול הלימינאלי³³ שבין הדטרמיניזם המכניסטי-מדעי לבין הבחירה משדדת המערכות. רק שד משחת יכול להשתחל בסדק זה, ולקרוץ לאנשים על האפשרויות של הקשר שבין המציאות והדמיון. ראוי לזכור כי תחילת דרכו של השד גם היא לא הייתה רק מדעית, אלא התמקמה על צומת הדרכים של מחויבותו העמוקה של מקסוול עצמו הן למדע הדטרמיניסטי, והן לאחריותו המוסרית ולחופש אמונתו הדתית של האדם בעולם. המקום אותו מצא מקסוול, ושבסופו של דבר נקבע בזכרון המדע כניסוי מחשבה, היה גם קריאה לשימור המקום לאנושי בעידן בו אנשים הופכים לסטטיסטים ולמובלים באופן דטרמיניסטי-עיוור אל תוצאות בלתי נמנעות.³⁴

³⁰ זהו קשר עם בעייתיות פילוסופית ומדעית. ראו ביקורתה של אורלי שנקר על ניתוחו של סזילארד ושל לאנדאוור, ועל החיבור שבין תורת

האינפורמציה ופיסיקה: Orly R. Shenker, [Logic and Entropy](#), 2000 PhilSci Archive [Preprint]

³¹ ב'עקרונות' כוונתי לנקודת מוצא המכתיבה פיתוח של הבנת הטבע, כמו הבסיס שהנחה את איינשטיין בפיתוח תורת היחסות – אוניברסליות של מהירות האור ועמידות חוקי הטבע למערכות ייחוס. גישתו של איינשטיין היא האקסמפלר של 'principal theory'.

³² על ההתפתחויות מטרמינולוגיה של אנרגיה לכיוון טרמינולוגיה של אינפורמציה וההשלכות על האמנות, ראו *From Energy to Information – Representations in Science and Technology, Art, and Literature*, Ed. Bruce Clarke & Linda Dalrymple Henderson, Stanford University Press 2002.

³³ השד של מקסוול היווה השראה להרבה יוצרים, מאנשי מוסר ויקטוריאניים ועד לסופרים פוסטמודרניים. ראו *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, ed. W. D. Niven, 2 vols. 1890 (reprint. New York: Dover), vol. 2, p. 760.

³⁴ Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, ed. W. D. Niven, 2 vols. 1890 (New York: Dover), vol. 2, p. 760: "There are methods... by which the application of energy may be directed without interfering with its amount... The dynamical theory of a conservative material system shows us, however, that *in general* the present configuration and motion determine the whole course of the system, exceptions to this rule occurring only at the instants when the system passes through certain isolated and singular phases, at which a strictly infinitesimal force may determine the course of a system to any one of a finite number of equally possible paths, **as the pointsman at a railway junction directs the train to one set of rails or another**'.

חלק ג: חורים שחורים

a final theory must be concerned not with fields, not even with spacetime, but rather with information exchange among physical processes. If so, the vision of information as the stuff the world is made of will have found a worthy embodiment.

Jakob Bekenstein³⁵

תורת היחסות של איינשטיין סיפקה ביטוי למערך היחסים המשלים של חומר ואנרגיה, מאסה ועקמומיות המרחב. אחד הפתרונות הראשונים של משוואות השדה בתורת היחסות הכללית היה הסינגולאריות הגרוויטציונית,³⁶ העיקום האינסופי של מרחב על ואל עצמו. החור השחור הוא האין הפיסיקאלי הקיצוני³⁷ ממנו דבר לא נמלט, אפילו לא אור. הדינאמיקה של אובייקט פיסיקאלי קיצוני שכזה הייתה עמידה שנים רבות בפני ניתוח תיאורטי ואישוש ניסיוני. תקרת הזכוכית שעצרה את יכולת התיאור המדעי של נקודה סינגולארית, הייתה גבול בלתי נראה אליו מגיעה שיטת מחשבה מוסדרת כשזו מנסה לתאר אינסוף, לבטא חוסר נגישות מלאה. הכלים המתמטיים-תיאורטיים המציירים את העולם באופן חיובי לא מסוגלים לתאר מצבים סינגולאריים-קיצוניים.

הקשר בין מדד האינפורמציה של שאנון ובין הבעיה הפיסיקאליות הזו מעוגן באימוץ של חוסר הידע כאובייקט של הכימות המדעי עצמו. יעקב בקנשטיין, בעבודת הדוקטורט שלו תחת ג'ון א. ווילר (מגדולי הפיסיקאים של המאה ה-20, שטבע את השם הפופולארי 'חור שחור'), השתמש במאפיין זה של אינפורמציה בתיאור המתמטי-פיסיקאלי של חורים שחורים. בקנשטיין שאב רבות מההקשר האינפורמטיבי של תרמודינמיקה קלאסית אותו הציעו ג'יינס וברילואין, כמו גם מהדיון סביב השד של מקסוול ותרומתם של סזילארד, בנט ולנדאוור. בקנשטיין, בעידוד המנחה שלו, ניגש לבעיית הסינגולריות הגרוויטציונית, והפיק מודל מתמטי-פיסיקאלי עבור חורים שחורים.³⁸ בקנשטיין מטפל באנטרופיה של חור שחור בהתחשבות בכך שחומר הנופל לתוך חור שחור מאבד את זהותו – האינפורמציה הגלומה בו – וכך מוסיף אנטרופיה במובן של שאנון למערכת הכוללת. הדבר היחיד הידוע על חומר הנבלע אל חור שחור, הוא איבוד המידע לגביו: כימות של איבוד זה מספק מדד שצורתו המתמטית היא כשל האנטרופיה מתרמודינמיקה קלאסית, וניתן לתיאום עם עוד מאפיין של גידול מתמיד – העלייה בשטח הפנים של אופק האירועים בחור השחור עם ספיחת חומר לתוכו. הכימות של איבוד המידע איפשר לבקנשטיין לנסח חוקים תרמודינמיים לחור שחור, כמעט יש מאין. אחת התוצאות המפתיעות של מחקר זה הוא קישור בין אינפורמציה ושטח הפנים של המערכת – כאשר הסינגולריות עצמה ניתנת לתיאור ישיר רק כקריסה מוחלטת, סינגולריות היוצרת אפס שאין כמותו. כשהמערכת איננה נגישה לחלוטין, התיאור המתמטי-פיסיקאלי שלה נסוג למעטפת ולכימות של חוסר הידע.

זיהוי ה- 'information-context'³⁹ עבור תרמודינמיקה, ובהמשך עבור חורים שחורים, הביא לניסוח החוק השני המוכלל – The Generalized Second Law (GSL). בקנשטיין ראה בחוק השני המנוסח עבור חור שחור תכונה תרמודינמית של ממש, ובאנטרופיה של אינפורמציה האובדת אל תוכו כאנטרופיה פיסיקאלית.

³⁵ Jacob Bekenstein, 'Information in the Holographic Universe', **Scientific American** Volume 15, Number 3, 2005, p.74.

³⁶ [Schwarzschild, Karl](#) (1916), 'Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie', *Sitzungsber. Preuss. Akad. D. Wiss.*: 189–196.

³⁷ להדמיה של התמונה המתקבלת כאשר ישנו חור שחור ברקע, ראו את יצירתו של, Ute Kraus, (March 20, 2005), [Step by Step into a Black Hole](#).

³⁸ Jakob Bekenstein, 'Black Holes and Entropy', **Phys. Rev. D**7, 2333 (1973)

³⁹ 'Black Holes and Entropy' p. 2335

כאמור, האנטרופיה אותה תיאר בקנשטיין הייתה קשורה באופן הדוק לאלמנטים של חורים שחורים – שבמקביל לאנטרופיה הקלאסית הינם בתהליך מתמיד של עלייה והצטברות. במקרה של החור השחור, מדובר במאסה ובשטח הפנים. הניסוח המתמטי עבור האנטרופיה של החור השחור הינו פונקציה של שטח הפנים שלו:

$$S \propto \frac{kAc^3}{G\hbar}$$

האנטרופיה (S) שווה למכפלה של קבועי טבע יסודיים בתחומי המדע השונים (ואף הלא ממש תואמים) – מהירות האור (c), קבוע הגרוויטציה של ניוטון (G), הקבוע של פלנק (h), וקבוע בולצמן (k), השייך לתרמודינמיקה הקלאסית. זוהי משוואה האוגדת בתוכה את מכניקת הקוונטים, את היחסות הכללית ואת התרמודינמיקה. ווילר התלהב מאד מהרעיון של התקדמות לקראת תורה מאוחדת, והציע את החלוקה באורך פלנק לשם איזון הממדים של המשוואה. אורך פלנק מאגד את קבוע הגרוויטציה עם מהירות האור (יחסות וגרוויטציה) והקבוע של פלנק (מכניקת הקוונטים). כשהנוסחה לאנטרופיה מבוטאת במונחים של אורכי פלנק $l_p = \sqrt{G\hbar/c^3}$ מתקבלת משוואה מקוצרת:

$$S_{BH} \propto \frac{kA}{l_p}$$

כפי שניתן לראות, המשוואה שבקנשטיין מצא עדיין לא היתה מושלמת – כיוון שלא השיג את המקדם המדויק המקשר בין האנטרופיה של החור השחור ובין שטח הפנים, אלא רק יחס שנשען על הרבה אינטואיציה. סטיבן הוקינג, שבמקביל פיתח חוקים דמויי-תרמודינמיקה עבור חורים שחורים,⁴⁰ התעקש שמדובר באנלוגיה בלבד. הוא דחה את תפיסת בקנשטיין ווילר את המשמעות של אינפורמציה והממשות התרמודינמית של חורים שחורים, בטענה שאין להם טמפרטורה או קרינה. גישה זו התערערה והפכה את גישתו של בקנשטיין למקובלת בקהילה המדעית, לאחר שהוקינג עצמו גילה זמן מועט לאחר מכן את הקרינה הקרויה על שמו.⁴¹ קרינה היא מאפיין קלאסי של גופים תרמודינמיים של ממש, וייחוס אנטרופיה לחורים שחורים (הקרויה על שם בקנשטיין-הוקינג) הפכה לנכס צאן ברזל של הפיסיקה המתארת אותם. גילוי הקרינה של חורים שחורים עם טמפרטורה אופיינית קיבעה מיספרית את היחס הכללי שגילה בקנשטיין והפכה אותו ליחס יסודי בטבע:

$$S_{BH} = \frac{A}{4}$$

כאשר שטח הפנים נמדד ביחידות של אורכי פלנק רבועים. יש לזכור כי האינפורמציה שאובדת בחור השחור, ושבאמצעותה מנסח בקנשטיין את האנטרופיה, גם היא מזוהה עם האנטרופיה. קישור מושגי-פיסיקאלי זה בין אנטרופיה פיסיקאלית, אובדן אינפורמציה והגידול בשטח הפנים של החור השחור, הביא פיסיקאים להסביר מערכות פיסיקאליות במונחים של אינפורמציה, כשזו מקודדת על פני השטח של המערכת הפיסיקאלית (כל אורך פלנק רבוע מכיל יחידת אינפורמציה). מדובר בפרשנות פיסיקאלית החורגת מן האינטואיציה הרגילה בכמה דרכים – לדוגמא, הגישה שרואה את הגרעין המרכז כנקודת מוקד ממנה מתחילים הכוחות ולאחר מכן מאגרי המידע והקידוד. בדרך כלל התפיסה היא שמשטח בעל פחות ממדים מסוגל להשפיע פחות ויהיה

Bardeen, J. M.; Carter, B.; Hawking, S. W. 'The four laws of black hole mechanics'. *Communications in Mathematical Physics*, 31 (2) 1973: 161–170⁴⁰
 Hawking, S. W. (1974). 'Black hole explosions?', *Nature* **248** (5443): 30⁴¹

רלוונטי פחות מבחינה פיסיקאלית. זאת בהקשר של המציאות בכללותה של כל מערכת (!).⁴² אך בראשית דרכה היא עסקה בטיפול במונחי אינפורמציה דווקא במצב הקיצוני של סינגולריות גרוויטציונית, שלגבי תהליכי הפנימיים לא ניתן לומר דבר. ההתייחסות אל פני השטח כצופנים את התכונות הפיסיקאליות היא הכללה של הגישה בטיפול במערכות תרמודינמיות אותה הפנים בקנשטיין – שגם לגביהן יש מידה מועטת מאד של אינפורמציה – באמצעות מספר קטן של משתנים הקובעים את התנהגות המערכת כולה. בקנשטיין מצא כי שטח הפנים של החור השחור פרופורציונאלי באופן הדוק לאינפורמציה, וגידולו של שטח הפנים נקשר לעלייתה המתמדת של האנטרופיה.

עם התקדמות המחקר של בקנשטיין, הטיפול באינפורמציה ומערכות פיסיקאליות נהיה מורכב יותר. ביישום המושגים של תורת האינפורמציה על מערכות 'רגילות', פחות אזטריות, של חומר, הוא החל לחקור את הגבולות של מימוש תהליכי אינפורמציה במערכות פיסיקאליות קלאסיות וקוונטיות. שאלות כמו 'כמה אינפורמציה ניתן להכיל/לשדר במערכת פיסיקאלית כזו' העמידו את האינפורמציה לא רק כהקשר המאפשר לפתור בעיות בפיסיקה, אלא כמוקד המחקר, האובייקט שהכלים הפיסיקאליים הם המשמשים לחקור אותו. בקנשטיין מתאר זאת כ'העמדת הסוס לפני העגלה',⁴³ או מעבר של האינפורמציה מרקע והקשר רעיוני, אל החזית של המחקר הפיסיקאלי. כיוון מחקרי זה⁴⁴ היווה את הבסיס של תחום שלם במכניקת הקוונטים העוסק בשני הצדדים של עיסוק זה באינפורמציה – Quantum Information Theory (QIT). תחום זה הוא מדע רווי-אינפורמציה בעל זהות כפולה של חזית ורקע: הכלים של תורת האינפורמציה מסבירים תופעות פיסיקאליות, ותופעות קוונטיות נבדקות ביכולתן לתמרן אינפורמציה – בשידור ועיבוד חישובי.

⁴² ראו להלן הערה מס' 53 על הקשר לתורת המיתרים.

⁴³ ראיון עם המחבר, 10.09.2009.

⁴⁴ Bekenstein Jakob (1990), Quantum Limitations on the Storage and Transmission of Information (with M. Schiffer); Int. J. (Mod. Phys. C1, 355 (1990)

חלק ד: מלחמת החורים השחורים והעיקרון ההולוגרפי

There is a philosophy that says that if something is unobservable - unobservable in principle - it is not part of science. If there is no way to falsify or confirm a hypothesis, it belongs to the realm of metaphysical speculation, together with astrology and spiritualism. By that standard, most of the universe has no scientific reality - it's just a figment of our imaginations.

Leonard Susskind⁴⁵

משבר של מאבק ליווה את הצעדים המשמעותיים בפיתוח תורת האינפורמציה, וגם צעד חשוב בשילוב של אינפורמציה ופיסיקה התרחש בעיתות מלחמה – מלחמה מדעית. זוהי 'מלחמת החורים השחורים', שהתנהלה במשך כעשרים שנים (1983-2004) בין סטיבן הוקינג ובין לאונרד ססקינד ביחד עם קבוצה – שהייתה קטנה בתחילה אך גדלה והלכה עם השנים – של מדענים שדנו בגורל של אינפורמציה בעולם המכיל חורים שחורים המסוגלים לכאורה לבלוע את המידע לבלי חזור – היינו 'גריסה' של המידע ברמה יסודית הרבה יותר מאשר ערבוב של מולקולות או אפילו של מרכיבי היסוד; ה'תרמליזציה' של חור שחור היא כזו שלא מאפשרת שחזור של המבנה הקדום שקרס לסינגולריות – באף רמה תיאורטית.⁴⁶

ראוי לתת את הדעת להתפתחות בתפקיד של אינפורמציה בדיון המדעי: האינפורמציה בויכוח זה היא כבר לא עניין של טעם אישי בפרשנות פיסיקאלית מסויימת – אלא עצם האפשרות של תיאור פיסיקאלי של הטבע באשר הוא. סטיבן הוקינג (שכאמור לעיל סלד בתחילה מן הרעיון של שימוש באינפורמציה נעלמת כביטוי למאפיין פיסיקאלי, ופיתח חוקים דמויי תרמודינאמיקה עבור חור שחור משיקולי תורת-שדות טהורים) הביע את העמדה שאינפורמציה נעלמת בחור שחור ולעולם לא תחזור. הוקינג טען שאינפורמציה הנכנסת לחור שחור לעולם לא ניתנת לשחזור – אפילו לא במובן המצומצם ביותר בו פיסיקאי יכול לטעון שהאינפורמציה בכרך של כתיב שייקספיר ניתנת לשחזור גם אחרי שריפת הספר.⁴⁷ לעומת אובדן 'טכני' כזה של אינפורמציה, הכניסה לחור שחור, טען הוקינג, מעלימה לנצח את המידע. הוא לעולם לא יצא בצורה המאפשרת שחזור – אפילו תיאורטי.

פיסיקאים שהתרעמו על רעיון זה ראוהו כנוגד את הבסיס לעבודה מדעית (Leonard Susskind, Gerard 't Hooft) – המנסה לעקוב באמצעות אינפורמציה אחר התפתחותה של המערכת הפיסיקאלית. האינפורמציה נתפסה על ידם כפרדיגמה המכוננת של תיאור העולם בידי המדע, כאובייקט חיובי במובהק, שהיעלמותו המלאה היא האסון הגדול ביותר לתקוות התיאור השלם של העולם.

⁴⁵ Susskind, Leonard, *The Black Hole War – My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Little, Brown and Company 2008 p.438

⁴⁶ המלחמה הסתיימה רשמית עם כניעתו של הוקינג (17th International Conference on General Relativity and Gravitation, 21 July 2004) בהתערבות המפורסמת בנוגע לגורל האינפורמציה הנופלת לחור שחור: The Preskill Black Hole Information Bet. הוקינג שילם באנציקלופדיה לתולדות הבייסבול.

⁴⁷ המידע שבמולקולות הספר אינו נעלם אלא **מסודר מחדש, מעורבב**, ובכך עולה האנטרופיה התרמית-קלאסית. מבחינה תיאורטית זו אינה פעולה 'קשה' לשחזר את האותיות שהתעופפו להן, אמנם מעשית מדובר בפעולה שהיא קשה עד כדי לא אפשרית לביצוע, אבל כאמור זהו לא המצב מבחינה תיאורטית. זאת לעומת מה שקורה בסינגולריות – שהיא מייצרת נקודת אל-חזור מבחינת האינפורמציה ברמה שהיא בלתי אפשרית גם תיאורטית. בפעולה היום-יומית, ערבוב האותיות מעלה את האנטרופיה של האינפורמציה. שתי אנטרופיות אלה מהוות חלק מחוק-שני מוכלל (GSL). עבור התיאור הפיסיקאלי, ערבוב מלא זה אינו משנה את האפשרות לשחזור – המידע אינו אובד אלא מסודר מחדש, ואותם כללים של תיאור המערכת הפיסיקאלית עדיין תקפים. התיאור של הוקינג הוא של אובדן מלא, גריסה של האינפורמציה ברמה אליה גם התיאוריה לא יכולה להגיע – והכללים מפסיקים להתייחס אל האובייקט שנפל לחור השחור.

הרעיון שגורלה של אינפורמציה נחרץ עם הכניסה לחור השחור זיעזע את סוקינד, והעמיד לטענתו את כל המפעל המדעי על בלימה. סוקינד הסביר שכל התיאור מדעי של העולם נשען על עיבוד אינפורמציה – בסדרי גודל שונים של עידון ודקויות.⁴⁸ לדעת סוקינד, ההכרזה שאבן היסוד הזו להבנת העולם איננה נשמרת, שקולה להנפת דגל לבן על המפעל המדעי כולו. האינפורמציה וניתוחה הם הם המפעל המדעי, לפי סוקינד.

במהלך המערכה המדעית סביב גורלה של האינפורמציה (החיובית), פותחו כלים מרחיקי לכת ברמת המופשטות שלהם. סוקינד מתאר בסיפור המלחמה כיצד העימות עם ידידו הוקינג נתן דחיפה משמעותית לפיסיקה התיאורטית.⁴⁹ בין השאר, המאבק הוליד פיתוח של תורת מיתרים (תיאור העולם ומרכיביו כרטט של מיתרים שהינם מיקרוסקופיים באופן מוחלט, אך גם פרוסים על פני כל היקום), ⁵⁰Branesi (M-Theory) ברמה הולכת ומשתכללת שמקדמת את המדע אל עבר תיאוריה-של-הכל (TOE). אחד הפיתוחים מרחיקי הלכת ביותר ששימשו את סוקינד וחבריו הוא ההכללה של יחס פני-השטח אל המערכת הפיסיקאלית, אל המערכת השלמה – היקום. בהמשך לאותו פיתוח תיאורטי של בקנשטיין, התיאור של כל מערכת פיסיקאלית נתון על ידי המידע המקודד על שטח הפנים של אותה מערכת. עיקרון זה, אותו ניסח זוכה פרס הנובל ג'ררד ט' הופט, קרוי 'העיקרון ההולוגרפי'.⁵¹ על פי העיקרון הזה, האינפורמציה המלאה של כל מערכת מקודדת על פני השטח שלה. דימוי בו משתמשים על מנת להסביר את סוג המרחב עליו מדובר ואופן הקידוד של כל המידע על היקפו, הוא הציור של המלאכים והשדים המתרבים לאינסוף לקראת שטח הפנים בצירו המפורסם של אשר Circle Limit IV Heaven and Hell.⁵² יש בעיקרון ההולוגרפי צמצום ממדי: ממצואות תלת-ממדית לקידוד דו-ממדי, מממשות נגישה להיטל של ממשות רחוקה. זהו שידוד מערכות קיצוני עבור פיסיקה תיאורטית, בה ממדים נמוכים לא מכתיבים את תפקודם של ממדים גבוהים יותר, אלא להיפך. תמונת העולם המצטיירת דרך עקרון זה היא שהמציאות אותה אנו חווים איננה אלא אשליה, במובן זה שהיא לא מתרחשת כאן ועכשיו אלא ממשת תבניות אינפורמציה רחוקות.

העיקרון ההולוגרפי מסדיר את ההתנהגות המתמטית של חורים שחורים והאינפורמציה הנופלת לתוכם. שימור האינפורמציה למרות גריסתה בחור השחור הוא לא פחות ולא יותר מ'החוק הבסיסי ביותר בטבע – שימור האינפורמציה'.⁵³ אינפורמציה שלא הולכת לאיבוד נחוצה לשם השתשלות של תהליכים פיסיקאליים באשר הם. מערכת בה האינפורמציה נשמרת היא כזו שתוכל להכיל גם חומר 'רגיל' וגם סינגולריות בקידוד על פני משטח בעל ממד נמוך יותר. בהיסטוריה של הרעיונות יש בכך היפוך של המוקד האונטולוגי מן המרכז שמאבד את ממשותו, לטובת ההיקף בו הקידוד הוא המציאות הפיסיקאלית המוחלטת: המציאות התלת-ממדית מתוארת כהיטל של המידע המקודד כהולוגרמה דו-ממדית.

⁴⁸ Lindesay James; Susskind Leonard, 'An introduction to black holes, information and the string theory revolution; The Holographic Universe', World scientific co. 2005, p. 69

⁴⁹ סוקינד, שם, פרקים 5-8

⁵⁰ קיצור של המונח Membrane – במובן של 'קרומית' או 'משטח'. זהו אופן מוכלל של תיאור המיתרים בתורת המיתרים. לדוגמה מיתר אחד הינו 'משטח' בעל מימד אחד. החלקיקים המוכרים לנו אינם אלא רטיטה במיתר ולא גוף בעל מימד אפס. במינוח זה, 'Brane' הינו ה'גוף' הבסיסי שבאמצעותו ניתן להתייחס למרחב-זמן (לחילופין – 'יריעת עולם'). גוף זה יכול להיות בעל מספר מימדים רב, והממברנות מכונות לפי מספר המימדים שלהן. ישנו קשר עמוק בין תורת המיתרים בעלת יותר מ-10 ממדים, לבין התיאור ההולוגרפי של היקום (עבודתו של חואן מלדסנה משנת 1998, שבעקבותיה ניתן לתאר את היקום הארבעה-ממדי 'שלנו' כמקודד על פני ה'שטח' של מרחב חמישה-ממדי. לא ניכנס כאן למה שקורה עם הממדים האחרים והאופן בו טיפלו בהם מלדסנה עם נוייז בקומפקטיפיקציה. ראו Juan Martin Maldacena (1998), 'Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity', *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (2): 231–252

⁵¹ 't Hooft, G, 'Dimensional Reduction in Quantum Gravity', 1993, <arXiv:gr-qc/9310026v2>

⁵² Susskind, 2008 עמ' 403-407.

⁵³ Susskind, 2008 עמ' 9.

באופן פרדוקסאלי, דווקא האינפורמציה כמדד של חוסר ידע מאפשר להעריך את המערכת כולה (פני השטח, הקוד והאובייקטים שבתוכה) והתנהגותה כקיימות באופן עצמאי. בהטמעה של חוסר ידע מכומת אל הפיסיקה, האינפורמציה הופכת לאובייקט עצמאי. הדרישה המדעית לאינפורמציה המכוננת באופן חיובי את המערכת, מניבה תפיסת מציאות בה הממשות של אינפורמציה באה על חשבון זו של הגופים המקודדים על ידה. בעיקרון ההולוגרפי מתגלה המתח הבסיסי בין מדע המנסה לחשוף את סודות הטבע ובין אימוץ חוסר הידע, הויתור על אחיזה מלאה, כשיא של הבנת העולם.