

# כתב היד איינשטיין-גֶסוֹ: ציון דרך בדרכו של איינשטיין לתורת היחסות הכללית

Hanoch Gutfreund

פרופסור לפיזיקה והמנהל האקדמי של ארכיוני אלברט איינשטיין, האוניברסיטה העברית בירושלים, ירושלים, ישראל



בשנת 1913, איינשטיין ובסו שיתפו פעולה במטרה לחשב את המסלול של כוכב חמה (Mercury) בהתבסס על תיאוריית אנטוורף. בסו נתפס תמיד כאדם שאותו איינשטיין שיתף ברעיונותיו, אך מעולם לא ראו בו שותף פעיל בעבודתו המדעית. אולם, במקרה זה שיתוף הפעולה ביניהם היה שוויוני הרבה יותר בהשוואה למקרים קודמים.

מאז אמצע המאה ה-19 היה ידוע כי המסלול של כוכב חמה מראה סטייה קטנה מהמסלול הצפוי על פי חוקי ניוטון, אשר מתארים את תנועת כוכבי הלכת במסלולם סביב השמש. מנקודת המבט של השמש, ציר המסלול האליפטי של כוכב חמה סביב השמש מסתובב בכ-550 שניות קשת בכל מאה שנים. מעגל שלם הוא בן 360 מעלות, ומעלה אחת היא בת 3,600 שניות. אם כן, הקטטה של 550 שניות בכל מאה שנים היא אפקט קטן מאוד, אך אפילו השפעות קטנות כל כך הן חשובות ובעלות משמעות.

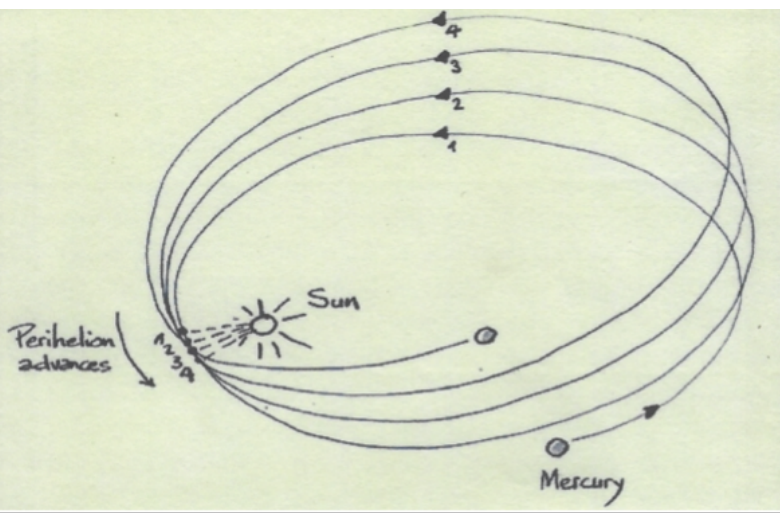
כשכוכב חמה מבצע את מסלולו סביב השמש, הפרעה קטנה מוסט מעט במהלך כל סיבוב (איור 1). אפקט זה ידוע בתור פרעה של הפריהליון של כוכב חמה. את מרבית האפקט הזה אפשר להסביר על ידי ההשפעה של כוכבי לכת שכנים, אולם 43 שניות מדי מאה שנים של הפרצסיה אינן מוסברות באמצעותה. כאשר איינשטיין החל לחפש תיאוריה של יחסות כללית, הוא ציפה כי ההסבר למסלול יוצא הדופן של כוכב חמה ישמש כאחד המבחנים לתיאוריה החדשה שעל פיתוחה הוא עבד משנת 1907 עד 1915.

כתבי יד מקוריים של מסמכים היסטוריים חשובים, הם בעלי קסם מיוחד. לעיתים קרובות מסמכים כאלה הם יפים, בולטים בייחודם ועשויים לעורר רגשות השתאות ועוגג בקרב המעיינים בהם. מסמכים כאלה מוצגים כאוצרות תרבותיים במוזיאונים ובתערוכות ציבוריות, ונרכשים על ידי אספנים במכירות פומביות. הם מסייעים לנו לחוות הזדהות עם הכותבים, ופותחים צוהר לתהליך היצירתי של כתיבתם. כמו כן מסמכים כאלה מאפשרים לנו לדמיין איך היינו מרגישים לו נכחנו במקום שבו נכתבו, ובמועד היווצרותם.

זהו המקרה עבור כתב יד איינשטיין-בסו (Einstein-Besso), אשר נרכש ב-23 בנובמבר 2021, במכירה פומבית בפריז. האירוע אורגן על ידי חברת המכירות הפומביות המפורסמת Christie's, וכתב היד נמכר בסכום של כ-13 מיליון דולר.

לאורך חייו של אלברט איינשטיין היה מינשל בסו, מהנדס מכונות שוויצרי, חבר קרוב. הם נפגשו כסטודנטים במכון הטכנולוגי של ציריך, שווייץ, ומאוחר יותר עבדו יחד במשרד הפטנטים השוויצרי בברן. בשיחותיהם התכופות והממושכות בסו היה שומע מתעניין, אשר שאל שאלות שעודדו את איינשטיין לדון ברעיונות שהעלה בפניו בן-שיחו, להבהירם ולפתח אותם. תפקידו של בסו בתהליך זה היה חשוב ביותר. ואכן, מאמרו המכונן והחשוב של איינשטיין, שבו הציג את תיאוריית היחסות הפרטית שלו, אינו מכיל הפניות למאמרים של חוקרים אחרים, אלא רק דברי תודה לחברו ולקולגה הנאמן שלו: "לסיועם, הרשו לי לציין שחברי והשותף שלי מ. בסו עמד לצידי בהתמדה בעבודתי על הבעיה שנידונה כאן, ואני חב לו על הצעות יקרות-ערך רבות".

בשנת 1912 התמנה איינשטיין לפרופסור במכון הטכנולוגי של ציריך, שם בילה את שנותיו כסטודנט. במשך כמה שנים הוא עבד בנמרצות על תיאוריה חדשה של כבידה (גרביטציה), שאותה השלים בנובמבר 1915.



איור 1. הפרצסיה של הפריהליון של כוכב חמה. בכל סיבוב של כוכב חמה סביב השמש, ישנה סטייה קטנה והדרגתית בנטייה (אורינטציה) של הסיבוב. הפריהליון, שהוא הנקודה הקרובה ביותר לשמש, מוסט מעט ('מתקדם') במהלך כל סיבוב.



איור 2. העמוד הראשון של כתב היד איינשטיין-בסו, כתוב בכתב ידו של איינשטיין. כאן, איינשטיין מְחַשֵּב את שדה הכבידה של השמש. בעמודים העוקבים (שאינם מוצגים כאן), הוא מְפַתֵחַ את המשוואה שמתארת בצורה נכונה את תנועתו של כוכב חמה.

Gleichungen der Grav. in erster Näherung (1)

$$-\left(\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2} + \dots - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial t^2}\right) = K \rho_0 \frac{dx_\mu}{ds} \frac{dx_\nu}{ds} \quad ds^2 = -dx^2 - \dots + c_0^2 dt^2$$

Statischer Fall

$$-\Delta \gamma_{44} = \frac{K \rho_0}{c_0^2}$$

$$\kappa = K \frac{8\pi}{c_0^2}$$

Tabelle des Schwerefeldes für die erste Annäherung:

γ			
-1	0	0	0
0	-1	0	0
0	0	-1	0
0	0	0	$\frac{1}{c_0^2} \left(1 + \frac{A}{r}\right)$

g			
-1	0	0	0
0	-1	0	0
0	0	-1	0
0	0	0	$c_0^2 \left(1 - \frac{A}{r}\right)$

$$A = \frac{\kappa M}{4\pi} = \frac{2KM}{c_0^2}$$

$$g = -c_0^2 \left(1 - \frac{A}{r}\right)$$

Zweite Annäherung.

$$-\left(\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x^2} + \dots - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial t^2}\right)$$

1)  $\gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta}$   
 $\sum \gamma_{\alpha\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha^2}$

2) 0 0 0 0

0 0 0  $\frac{A^2}{2c_0^2 r^4}$

3)  $-\sum \gamma_{\alpha\beta} g_{\gamma\epsilon} \frac{\partial \gamma_{\mu\gamma}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \gamma_{\nu\epsilon}}{\partial x_\beta}$

0 0 0 0

0 0 0  $+\frac{A^2}{c_0^2 r^4}$

$$-\frac{1}{2} \sum \gamma_{\alpha\mu} \gamma_{\beta\nu} \frac{\partial g_{\gamma\epsilon}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial g_{\gamma\epsilon}}{\partial x_\beta}$$

$$\frac{A^2}{2} \left| \begin{array}{cccc} \left(\frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial x} \frac{\partial \frac{1}{r}}{\partial y} & & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$

$$+\frac{1}{4} \gamma_{\mu\nu} \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial g_{\gamma\epsilon}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial g_{\gamma\epsilon}}{\partial x_\beta}$$

$$\frac{A^2}{4} \left| \begin{array}{cccc} -\frac{1}{r^4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r^4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r^4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c_0^2 r^4} \end{array} \right|$$

תיאוריה זו מוכרת לנו כיום כתורת היחסות הכללית. בתחילת 1913, פרסם איינשטיין גרסה ראשונית של התיאוריה שלו, הידועה בתור תיאוריית אנטוורף (פירוש המילה Entwurf בגרמנית הוא 'טיוטה'). כיום אנו יודעים כי תיאוריה זו אינה נכונה, אך היא שימשה כצעד חשוב בדרך לגרסה הסופית של תורת היחסות הכללית, ומכילה חלק מהמאפיינים הבסיסיים שלה.

מטרתו העיקרית של שיתוף הפעולה בין איינשטיין לבסו הייתה לברר אם התיאוריה החדשה, שהייתה שלב ביניים בדרך לתאוריה הסופית הנכונה, תוכל להסביר את אותן 43 שניות בלתי מוסברות, המבטאות את ההבדל הזעיר בין התצפיות האסטרונומיות של תנועת כוכב חמה בפועל לבין התנועה שנחזתה על ידי התיאוריה של ניוטון. המשוואות והחישובים המתמטיים שערכו מילאו יותר מ-50 עמודים של מה שהתגבש להיות כתב יד איינשטיין-בסו. מחציתם כתובים בכתב ידו של איינשטיין (איור 2), והמחצית השנייה בכתב ידו של בסו. את מרבית העבודה ניתן לתארך ליוני 1913.

איינשטיין ובסו מצאו כי הגרסה המוקדמת של תורת היחסות הכללית יכולה להסביר רק 18 שניות בכל מאה שנים מתוך הפרצסיה הבלתי רגילה של מסלול הסיבוב של כוכב חמה.

הסוגיה הזאת באה על פתרונה בנובמבר 1915, כאשר חישוב דומה שהתבסס על הגרסה הסופית של תורת היחסות הכללית ניבא את התוצאה הצפויה של 43 שניות מדי מאה שנים. איינשטיין דיווח מאוחר יותר, שכאשר נוכח כי התיאוריה שלו חזתה את התוצאה הנצפית, הוא התרגש כל כך עד שסבל מפרפורים בלב, ולא יכול היה לעבוד במשך כמה ימים.

בתחילת 1914 שלח איינשטיין לבסו את הרשימות של העבודה המשותפת שביצעו עד לאותה נקודת זמן, ודחק בחברו להשלים את הפרויקט. רשימות אלה השתמרו במשפחתו של בסו. הן נמכרו ונמכרו שוב, עד שהגיעו למכירה הפומבית האחרונה בפריז. כתב היד הזה מכיל גם חישובים המתארים השלכות אחרות של תיאוריית אנטוורף, אולם הם בעלי חשיבות פחותה יחסית למה שתואר לעיל. נוסף על כך חישובים אלה מכילים כמה טעויות, כך שמסקנותיהם שגויות.

כתב היד איינשטיין-בסו הוא אחד משני כתבי יד שהיו אבני דרך אשר הובילו לתורת היחסות הכללית. כתב היד הנוסף נקרא מחברת ציריך, והוא מאביב 1912. מחברת זו מכילה עשרות עמודים של משוואות מתמטיות, בכתב ידו של איינשטיין, עם מעט מאוד הערות. היא מתעדת את איינשטיין לומד את השיטות המתמטיות הבסיסיות שנדרשו על מנת להתקדם במסע לעבר התורה החדשה. מחברת ציריך מכילה את הגרעין של התורה הסופית, אולם כתוצאה מפירוש לא נכון של התוצאות שאלהן הגיע בחישוביו, איינשטיין נטש אותן וניסח את תיאוריית אנטוורף. ב-1915, איינשטיין זנח את התיאוריה הזאת, וחזר לעבודתו במחברת ציריך. אז, בעבודה מאומצת של חודש אחד הוא הצליח להשלים את תורת היחסות הכללית כפי שהיא מוכרת כיום. מחברת ציריך המקורית נמצאת בארכיון אלברט איינשטיין באוניברסיטה העברית בירושלים.

כתב היד איינשטיין-בסו ומחברת ציריך מספקים לנו הזדמנות ייחודית להציץ מעבר לכתפו של איינשטיין בתקופה האינטנסיבית והיצירתית ביותר של הקריירה המדעית שלו. עבודתו והתקדמותו של איינשטיין בשנים אלה, בין השאר כפי שהן באות לידי ביטוי בכתבים האמורים, הובילו ליצירת המופת המדעית שלו – תורת היחסות הכללית.

## מילון מונחים

פְּרִיְהֵלִיּוֹן (Perihelion): הנקודה במסלולו של כוכב לכת, שבה הוא נמצא הכי קרוב לשמש.

פְּרֶצֶסְיָה (Precession): שינוי כיוון ציר הסיבוב של גוף תלת-ממדי המצוי בתנועה סיבובית. השינוי הוא בכיוון המרחבי ביחס לזמן.