



פיסיקאי קורא היום את מאמרי איינשטיין

מ-1905*

ח. גוטפרינד, מכון רקח לפיסיקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים

1905 – “השנה המופלאה”

בשנת 2005 יציין העולם כולו מאה שנים ל-“שנה המופלאה” (annus mirabilis) בעבודתו של אלברט איינשטיין. כינוי זה שימש בהיסטוריה של המדע לציון “שנה מופלאה” אחרת, זו של ניוטון, אשר כתב בשנת 1666 שורה של עבודות במתמטיקה ובפיסיקה, שהיו לאבני היסוד של המדע במאה ה-17 ואילך.



איינשטיין ליד שולחנו במשרד הפטנטים בברן

בשנת 1905 חיבר איינשטיין, שהיה אז בן 26 ועבד כפקיד במשרד הפטנטים ב-Bern, ארבעה מאמרים אותם הגיש לפרסום בעיתון המרכזי בפיסיקה של אותם הימים - Annalen der Physik. להלן הכותרות של מאמרים אלה (מתורגמות מילולית מגרמנית):

1. “על נקודת מבט היוריסטית (heuristic) הנוגעת ליצירה ולהתמרה (transformation) של אור.”

2. “על תנועת חלקיקים קטנים המרחפים בנוזלים במנוחה המתחייבת מן התורה הקינטית-מולקולרית של החום.”
3. “על האלקטרודינמיקה של גופים נעים”
4. “האם ההתמדה של גוף תלויה בתכולת האנרגיה שלו?”

באותה השנה איינשטיין השלים גם עבודה על “קביעה חדשה של ממדים מולקולריים”, אותה הגיש כעבודת דוקטור לאוניברסיטת ציריך, אחרי שב-1902 משך בחזרה עבודה קודמת אשר הוגשה על ידו שנה לפני כן למכון הטכנולוגי (ETH) בציריך.

במאמר זה אתייחס לארבע העבודות אשר פורסמו ב-Annalen der Physik. המאמרים האלה מתייחסים לשלושת תחומים בפיסיקה. תרומתו של איינשטיין בכל אחד מן התחומים האלה שינתה תפישות עולם והניחה יסודות לפיסיקה המודרנית. על רגל אחת אפשר לומר שהמאמר הראשון ברשימה מכיל הסבר של האפקט הפוטואלקטרי, עליו זכה איינשטיין לפרס נובל ב-1921, וסלל את הדרך לתורת הקוונטים. המאמר השני מכיל הסבר של התנועה הבראונית והיה ממבשרי התרמודינמיקה הסטטיסטית. שני המאמרים האחרים מכילים את הניסוח הראשון של תורת היחסות הפרטית ושל הקשר בין מסה ואנרגיה המתבטא בנוסחה $E = mc^2$.

הכותרת שלמעלה מתחילה במילים “פיסיקאי קורא...”. זהו מעין ידויו אישי. במשך שנים רבות לימדתי בקורסים שונים את כל הנושאים המוזכרים בפסקה הקודמת וידעתי לייחס אותם לאלברט איינשטיין, אבל לא קראתי את המאמרים עצמם. כאשר עשיתי זאת לאחרונה התברר לי שהם שונים בתוכנם ובדרך החשיבה שלהם מן הדימוי שהיה לי. אכן, היו לי לא מעט הפתעות, בהן אני מבקש לשתף את הקוראים של עיתון מורי הפיסיקה. הבה נסקור את הנקודות העיקריות במאמרים אלה^(*)

חלקיקים של אור

מקובל להתייחס למאמר הראשון ברשימה שלעיל כמאמרו של איינשטיין על האפקט הפוטואלקטרי. תיאור כזה הוא מטעה והוא ממעיט מערכו המונומנטלי של המאמר. איינשטיין עצמו התייחס למאמר זה, ורק למאמר זה מתוך ארבעה המאמרים של 1905, כאל עבודה מהפכנית. ההסבר של האפקט הפוטואלקטרי מופיע

*מבוסס על הרצאה שניתנה ביום עיון לכבוד פרופ. יששכר אונג לרגל פרישתו.



פליטה וקליטה של אור

בהמשך המאמר שואל איינשטיין אם הכללים של פליטה והתמרה של אור, גם הם מתאימים להנחה על האופי הקוונטי של האור. תשובה חיובית לשאלה זאת מספקת מייד הסבר פשוט לשורה של תופעות של אינטראקציה בין קרינה וחומר שלא היה להן הסבר במסגרת הפיסיקה הקלאסית. איינשטיין מונה במאמר שלוש תופעות כאלה:

1. חוק Stokes – בתופעת הפוטולומינסצנציה אור מונוכרומטי בעל תדירות ν_1 הפוגע בחומר גורם לפליטה בתדירות ν_2 , או בשורה של תדירויות ν_3, ν_4, \dots . בעוצמות קרינה נמוכות אפשר לראות את תופעת הפוטולומינסצנציה כהתמרה של פוטון בעל אנרגיה $h\nu_1$ לפוטון בעל אנרגיה $h\nu_2$. האנרגיה של הפוטון הנפלט לא יכולה להיות גדולה יותר מזו של הפוטון הפוגע ולכן:

$$\nu_1 \geq \nu_2 \text{ . זהו חוק Stokes.}$$

2. קרני קתודה (האפקט הפוטואלקטרי) – איינשטיין מתייחס לעבודה החלוצית של Philip Lenard על קרני קתודה. המדידות שלו היו מאוד לא מדויקות ורק סיפקו עדות איכותית לעליית האנרגיה הקינטית המקסימלית E_{max} של האלקטרונים הנפלטים עם עליית התדירות של האור הפוגע. איינשטיין הציע את הביטוי, שנודע מאוחר יותר כמשוואה הפוטואלקטרית,

$$E_{max} = \frac{R}{N} \beta \nu - P = h\nu - P \quad (3)$$

כאשר P – האנרגיה הדרושה כדי לנתק את האלקטרון מן המתכת. על פי הנוסחה הזאת האנרגיה המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים פרופורציונית לאנרגיית הפוטונים של הקרינה המונוכרומטית הפוגעת. כמות האלקטרונים הנפלטים פרופורציונית לעוצמת הקרינה. התיאוריה של האפקט הפוטואלקטרי של איינשטיין אושרה רק תשע שנים מאוחר יותר בניסויים של Robert Millikan.

3. יינון של גזים על ידי אור אולטרא-סגול – אם מניחים שקוונט אחד של אור מיינן מולקולה אחת של גז אז אנרגיית היינון מוגבלת על ידי אנרגיית הפוטון

$$R\beta \nu \geq J \quad (4)$$

כאשר J היא אנרגיית היינון של gram-equivalent*.

*גרם אקויוולנט פרושו מול חלקי הערכיות.

שם כאחת המסקנות והוא תופש רק חלק קטן מן המאמר כולו. לב המאמר הוא ביסוס ההנחה ש- "... בקרן אור הנפלטת ממקור נקודתי, האנרגיה אינה מחולקת באופן רציף בנפח הולך וגדל של המרחב, אלא מורכבת ממספר סופי של קוונטים של אנרגיה המרוכזים בנקודות במרחב, נעים בלי להתחלק, ויכולים להיווצר או להיקלט רק כיחידות שלמות." עיקר המאמר סוקר את מהלך החשיבה המוביל למסקנה זו.

איינשטיין מתאר את הקושי להסביר את הספקטרום של קרינת גוף שחור בתחום התדירויות הגבוהות במסגרת תורת Maxwell הקלאסית. בתחום זה, התלות של עוצמת הקרינה בתדירות מתוארת על ידי נוסחה אמפירית של Wien. איינשטיין מחשב את התלות בנפח של האנטרופיה של קרינה מונוכרומטית, בעלת עוצמה מספיק נמוכה, בתדירויות המתאימות לנוסחה זו, ומשווה אותה עם התלות בנפח של האנטרופיה של גז אידיאלי⁽²⁾. מן הביטוי של האנטרופיה הוא גוזר את הסיכוי למצוא בזמן אקראי מסוים את כל אנרגיית הקרינה בנפח V שהוא חלק מן הנפח המלא V_0 . התוצאה היא:

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\beta \nu}} \quad (1)$$

כאשר N הוא מספר אבוגדרו, R – קבוע הגזים, $\beta = h/k$ (h – הקבוע של פלנק, k – הקבוע של בולצמן). בהשוואה, הסיכוי למצוא ברגע מסוים את כל n החלקיקים של גז אידיאלי בנפח V_0 בנפח חלקי V הוא:

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (2)$$

ההשוואה בין שני הביטויים האלה מוליכה למסקנה שקרינה מונוכרומטית, בעלת עוצמה נמוכה, בתחום התדירויות הגבוהות בהן מתקיימת נוסחת הקרינה של Wien, מתנהגת תרמודינמית כמורכבת מחלקיקים בלתי תלויים בעלי אנרגיה (קוונטים של אנרגיה) בגודל $R\beta \nu/N = h\nu$.

את הקיום של קוונטים של קרינה אפשר להסיק כבר מנוסחת Planck לקרינת גוף שחור⁽³⁾. אכן, היה זה Planck עצמו אשר קבע לראשונה, בהקשר לנוסחה זו, את המושג של קוונט של פעולה. אבל, אצל Planck זאת הייתה פשרה, תוצאה של אינטרפולציה אמפירית בין שני גבולות, תוך נסיון נואש להישאר במסגרת הפיסיקה הקלאסית. לעומתו, איינשטיין היה מוכן לייחס לקוונטים של האור, אשר נקראו מאוחר יותר – פוטונים, ממשות פיסיקלית ולחפש עדויות נוספות לאופי הקוונטי של הקרינה.



כאשר T היא הטמפרטורה, k - צמיגות הנוזל, P - רדיוס החלקיק המרחף, R, N - מספר אבוגדרו וקבוע הגזים. נוסחה זאת נותנת עבור חלקיק בעל רדיוס של 0.001mm , במים ב- 17°C , סטייה ממוצעת λ_x של $6\mu\text{m}$ בדקה. זאת סטייה מספיק גדולה וניתנת למדידה.

איינשטיין מציין במאמר שאם, אכן, ניתן לצפות בתנועה הזאת אז התרמודינמיקה הקלאסית אינה מתאימה לתיאור תחומים שאפשר להבחין בהם במיקרוסקופ. אם, לעומת זאת יתברר שהניבוי של התנועה הזאת אינו נכון, אז הדבר יעורר ספק רציני בתורה המולקולרית-קינטית של החום. הוא מסיים בתקווה שהחוקרים יישבו סוגיה זו שהיא בעלת חשיבות מכרעת לתורת החום.

הסוגיה הזאת אכן יושבה מספר שנים מאוחר יותר כאשר ניסויים מפורטים של Jean Perrin אישרו את כל התחזיות של איינשטיין ובכך אימתו את התורה הקינטית של החום וביססו סופית את המבנה האטומי-מולקולרי של החומר, מה שאז עדיין לא היה נחלת הכלל. המסקנה מעבודה זו, כפי שניסח אותה איינשטיין, היא שהתרמודינמיקה הקלאסית אכן אינה מתאימה לתיאור תחומים שאפשר להבחין בהם במיקרוסקופ. בכך סוללת עבודה זו את הדרך לתרמודינמיקה סטטיסטית.

תורת היחסות הפרטית

תורת היחסות הפרטית נלמדת בקורסים בסיסיים במסגרת לימודי הפיסיקה באוניברסיטה ובקורסי בחירה בתיכון. במשך השנים התגבשה מתכונת כמעט סטנדרטית ללמד את הנושא. בדרך כלל מתחילים בתיאור המצב הניסויני עם דגש על הכישלון של ניסוי Michelson-Morley למדוד את ההשפעה של תנועת כדור הארץ על מהירות האור. עוברים לשתי הנחות היסוד: א. מהירות האור אינה תלויה במהירות המקור או במהירות הצופה. ב. כל מערכות הייחוס הנעות במהירות קבועה זו ביחס לזו (מערכות אינרציאליות) הן שקולות (עקרון היחסות). מחפשים טרנספורמציה מקואורדינטות מרחב-זמן (x, y, z, t) במערכת אחת לקואורדינטות (x', y', z', t') במערכת אינרציאלית אחרת, המעבירה את הביטוי

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad (6)$$

לביטוי

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2 \quad (7)$$

בנוסחאות המתארות את שלוש התופעות לא מופיעה עוצמת הקרינה הפוגעת אלא התדירות שלה. עובדה זו מייצגת את האופי הקוונטי של הקרינה. אילו האנרגיה הייתה מחולקת באופן רציף במרחב כמו בתורת Maxwell של הקרינה האלקטרומגנטית, כל הביטויים האלה היו תלויים בעוצמת הקרינה הפוגעת.

האם אפשר לצפות בתנודות תרמודינמיות?

הבוטנאי Robert Brown ב-1828 התבונן במיקרוסקופ בחלקיקי אבק על פני נוזל וגילה שהם מבצעים תנועה אקראית מתמדת. תנועה זו נודעת כתנועה הבראונית. במשך עשרות שנים, במאה התשע עשרה, הוצעו הסברים רבים ושונים לתופעה זו וכולם נדחו. מקובל לראות את המאמר "על תנועת חלקיקים קטנים המרחפים בנוזלים..." כעבודתו של איינשטיין על התנועה הבראונית. שוב, לתאר את המאמר כך ממעיט בערכו. איינשטיין לא עבד על התנועה הבראונית ולא כתב את המאמר הזה כדי להסביר אותה. בראשית המאמר הוא מעיר: "יתכן שהתנועה המתוארת כאן זהה למה שמכונה "תנועה מולקולרית בראונית". אבל, המידע שיש לי על תנועה זו הוא כל כך לא מדויק עד שאיני יכול לחוות דעה בנדון." אפשר לומר שבמאמר הזה איינשטיין גילה את התנועה הבראונית.

בתרמודינמיקה הגדלים המקרוסקופיים הם ממוצעים על גדלים מיקרוסקופיים המקבלים ערכים אקראיים בהסתברות הנקבעת על ידי התפלגות בולצמן. את איינשטיין הטרידה כבר מספר שנים השאלה אם יש תופעות פיסיקליות שבהן אפשר למדוד פלוקטואציות סביב הממוצעים האלה. במאמרו ב-1905 הראה איינשטיין שאפשר לצפות בפלוקטואציות כאלה בתנועתם של חלקיקים קטנים בנוזל. תנועה זו נובעת מן התורה הקינטית של החום. בולצמן חשב שהדבר הוא בלתי אפשרי: "אפילו בסביבה הקטנה ביותר של חלקיק המרחף בגז מספר המולקולות הוא כל כך גדול עד שזה נראה חסר תועלת לצפות לסטייה ניתנת למדידה, ולו גם בזמן הקצר ביותר, מן הגבול שהיה מתקבל במקרה של מספר אינסופי של חלקיקים."

החישוב של ממוצע ריבוע הסטייה של חלקיק המרחף בנוזל הוא מקורי ואלגנטי. הוא מבוסס על שימוש משולב של תורת החום המולקולרית המיקרוסקופית ותורת הדיפוזיה המקרוסקופית. איינשטיין מצא שהשורש של ממוצע ריבוע

הסטייה בכיוון x : $\lambda_x = \sqrt{x^2}$, תלוי בזמן t כמו:

$$\lambda_x = \sqrt{t} \sqrt{\frac{RT}{N} \frac{1}{3\pi kP}} \quad (5)$$



מצויד בכל אלה, איינשטיין דן בהפעלת הטרנספורמציה של Lorentz על משוואות Maxwell ומראה שהכוח האלקטרומניע הוא מושג עזר הנובע מכך שהשדות המגנטיים והחשמליים תלויים במצב התנועה של המערכת. מה שנראה במערכת אחת כשדה מגנטי ייראה לצופה במערכת אחרת כשדה חשמלי. כך מתקבלת אלקטרודינמיקה קונסיסטנטית של גופים בתנועה המבוססת על התיאוריה של Maxwell עבור גופים במנוחה⁽⁵⁾.

מסה ואנרגיה

אחרי שאיינשטיין פרסם את המאמר על תורת היחסות הוא גילה תוצאה נוספת הנגזרת מן האלקטרודינמיקה של גופים נעים, שנעלמה מעיניו קודם לכן - הקשר בין מסה ואנרגיה. כדי להשלים את החסר, הוא כתב מאמר קצר ובו הראה שמשוואות Maxwell יחד עם עקרון היחסות מוליכות למסקנה שהמסה של גוף הפולט קרינה בעלת אנרגיה L , קטנה בשיעור L/c^2 . איינשטיין הניח שהדבר נכון לכל צורה של אנרגיה והסיק מכך שהמסה היא מידת התכולה של האנרגיה של גוף. אין במאמר הזה עדיין הביטוי המפורש $E = mc^2$ והדרך שבה מתקבלת המסקנה על הקשר מסה-אנרגיה שונה מן הדרך המקובלת להראות קשר זה בספרי הלימוד של היום. איינשטיין כתב על התגלית הזאת לידידו Conrad Habicht ב-1905: "הטעון הוא משעשע ומפתה, אבל ככל שאני יודע, ייתכן שאלוהים צוחק על כך ומוליך אותי באף". היום אנחנו יודעים והאנושות כולה יודעת שאלוהים לא הולך את איינשטיין באף.

1905 - שנת ההכללה

הפיסיקה של שלהי המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 הייתה מורכבת משלושה תחומים - מכניקה, תורת החום ואלקטרודינמיקה. בכל אחד מן התחומים האלה התפתחו מושגים ושיטות מיוחדים להם. אפשר למקם את העבודות של איינשטיין ב-1905 באזורי החפיפה בין תחומים אלה כפי שמתואר באופן סכמטי בתרשים. איינשטיין היה מונע בעבודתו המדעית על ידי הרצון להכליל ולגשר על פני הבדלים במושגים תיאורטיים כדי להביא תופעות שונות לכאורה לבסיס משותף. במכתב לידידו Marcel Grossman מ-1901 הוא נתן ביטוי לשאיפה זו להכללה ולסיפוק שהוא מפיק ממנה: "זאת הרגשה נפלאה להכיר באחידות של מכלול תופעות אשר מלכתחילה נראות כדברים שונים לחלוטין". במובן זה, שנת 1905 סיפקה לאיינשטיין הרגשה נפלאה בשפע.

בתחילת המאמר על האופי הקוונטי של האור מציין איינשטיין את "ההבדלים הפורמליים העמוקים בין מושגים תיאורטיים על

כך מוצאים את הטרנספורמציה של Lorentz ואז מראים שמשוואות Maxwell ומשוואות ניוטון (בשינוי מתאים) אינווריאנטיות תחת הטרנספורמציה הזאת.

פיתוח תורת היחסות הפרטית במאמר "על האלקטרודינמיקה של גופים נעים" שונה מאוד מקו המחשבה הזה. הדיון מתחיל מנקודות מוצא ומשאלות אחרות. לא מוזכר במאמר הזה הניסוי של Michelson-Morley אם כי מוזכרים "הניסיונות הבלתי מוצלחים לגלות את תנועת כדור הארץ ביחס ל'מדיום האור'...". השאלה המטרידה את איינשטיין היא האסימטריה בתיאור התופעות האלקטרודינמיות במערכת של מוליך ומגנט הנעים אחד ביחס לשני. התיאוריה של Maxwell מבחינה בין המקרה שבו המגנט נמצא בתנועה והמוליך במנוחה ובין המקרה ההפוך. בשני המקרים נוצרים במוליך זרמים בעלי אותו גודל, אבל במקרה הראשון הם מיוחסים לשדה החשמלי הנוצר בסביבת מגנט נע ובמקרה השני - לכוח האלקטרומניע המושרה במוליך נע בשדה של מגנט⁽⁴⁾. איינשטיין קובע שמדובר באותה תופעה הקשורה בתנועה היחסית בין המוליך והמגנט והוא מניח שגם בתופעות אלקטרומגנטיות, כמו בתופעות מכניות, אין מערכת מנוחה. בכך הוא מרחיב את עקרון היחסות לאלקטרודינמיקה ומוותר על מושג האתר (ether). לכך מתווספת ההנחה על הקביעות של מהירות האור. שני העקרונות האלה מובילים לאלקטרודינמיקה של גופים נעים שאין בה האסימטריה המוזכרת לעיל.

המאמר מחולק לשני חלקים - החלק הקינמטי והחלק האלקטרודינמי. החלק הראשון מתחיל בבירור המשמעות של הטענה "הרכבת מגיעה לכאן בשעה 7:00". הדיון בשאלה זו מחייב בירור יסודי של המושג מדידת זמן ושל משמעות הטענה ששני שעונים מרוחקים זה מזה מראים את אותה השעה (מסונכרנים). מן הדיון הזה נגזרות מסקנות מפתיעות. שני צופים הנעים אחד ביחס לשני במהירות קצובה ומודדים את אורכו של מקל יקבלו תשובות שונות. הם גם יקבלו תשובות שונות אם יסתכלו על אותו השעון כדי למדוד זמן. כאשר יתבוננו בשני מאורעות מרוחקים זה מזה, לא תמיד יסכימו איזה מהם קדם לשני. לכל המסקנות האלה, על יחסיות של אורך, זמן וסימולטניות בין מאורעות, מגיעים במאמר עדיין בלי טרנספורמציה Lorentz. טרנספורמציה זו מתקבלת בהמשך הדיון ואיינשטיין בודק שהיא מעבירה את הביטוי בנוסחה (6) ל- (7) ובכך מראה את הקונסיסטנטיות של שתי הנחות היסוד. מכאן הדרך לקינמטיקה יחסותית, ובמסגרתה לחוק חיבור מהירויות, היא קצרה.



העבודות של איינשטיין ב-1905 מתמקדות לכאורה בנושאים שונים אבל יש להן מכה משותף. כולן מונעות על ידי השאיפה לאחד תחומים שונים ולחבר אותם למכלול אחד. הן, אכן, מגשרות על פני תחומים ומבהירות את הקשר בין מושגים כמו זמן ומרחב, מסה ואנרגיה, שדות חשמליים ומגנטיים.

יש להניח שאילו איינשטיין לא היה קיים כל הדברים האלה היו מתגלים במוקדם או במאוחר. קרוב לודאי שהדבר היה משתרע על פני מספר שנים ולא היה מושג על ידי אדם אחד. מה שמעורר פליאה הוא שכל זה נעשה במשך שנה אחת על ידי אדם אחד, בן 26, לא במסגרת עבודה באוניברסיטה או במוסד מחקר, אדם שזה עתה קיבל תעודה של מורה בתיכון, אדם המועסק במשרה מלאה ולכן כל מה שעשה חייב היה לעשות בזמנו החופשי. זהו הישג חסר תקדים וזאת הסיבה ששנת 1905 תישאר תמיד "שנה מופלאה" בתולדות הפיסיקה.

מראי מקום

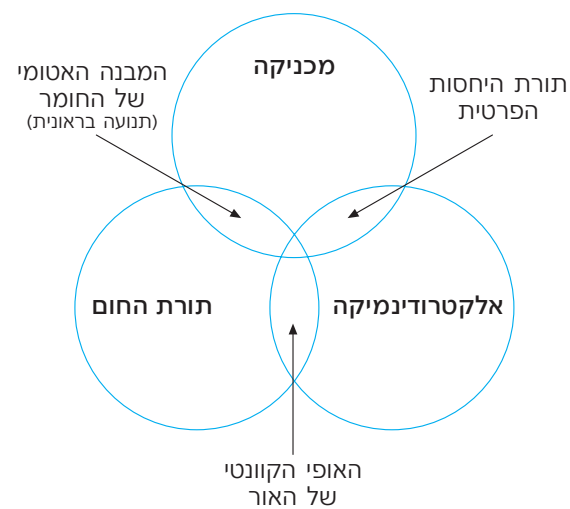
1. מאמרים אלה, בתרגום לאנגלית עם הקדמות מפורטות, מכונסים בספר:
Stachel, J., Einstein's Miraculous Year, Princeton University Press, 1999.
2. ברוקר, ח., גולדרינג, ח., גלר, צ., גניאל, א., מבוא לתרמודינמיקה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשמ"ט, (1989).
3. פיסיקה, אור וגלים - מדריך למורה חלק א', עמוד 18, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1977.
4. גלר, צ., רוזן, ע., עוד על כא"מ מושרה הנוצר במוט בשדות מגנטיים שהשקול שלהם אפס, תהודה 21(2), עמ' 21, 2000.
5. גלילי, י., קפלן, ד., מהי המשמעות של המהירות בשדה מגנטי, תהודה 21(2) עמ' 17, 2000.

שלמי תודה

תמונתו של איינשטיין המתפרסמת במאמר זה היא באדיבות ארכיון אלברט איינשטיין, בית הספרים הלאומי והאוניברסיטאי, האוניברסיטה העברית.

תהודה

גזים וחלקיקים חומריים ובין התיאוריה של Maxwell של תהליכים אלקטרומגנטיים במה שקרוי המרחב הריק. בשעה שבמקרה הראשון האנרגיה נקבעת על ידי מספר סופי (אם כי גדול מאוד) של פרמטרים המתארים את המקום והמהירות של החלקיקים הבודדים, הרי שבמקרה של תופעות אלקטרומגנטיות האנרגיה היא פונקציה רציפה במרחב. איינשטיין משתמש במושגים מתורת החום כדי להראות שגם במקרה זה ההנחה שהאנרגיה מרוכזת ביחידות דיסקרטיות במרחב מביאה לקונסיסטנטיות תיאורתית ומתיישבת היטב עם החומר האמפירי.



המאמר על התנועה האקראית של חלקיקים קטנים בנוזל שייך לגבול שבין המכניקה הקלאסית והתרמודינמיקה. כפי שאפשר ללמוד מן ההקדמה שבמאמר הזה, איינשטיין ראה בקיום הפלוקטואציות הניתנות למדידה מבחן יסודי לרעיון שגופים חומריים מורכבים ממספר גדול של אטומים הנעים לפי חוקי המכניקה.

תורת היחסות הפרטית מגשרת על פני המכניקה והאלקטרודינמיקה. עקרון היחסות הקובע שכל המערכות האינרציאליות שקולות זו לזו היה ידוע ומקובל במכניקה הקלאסית בשעה שהתיאוריה של Maxwell מניחה קיום של מערכת אינרציאלית מיוחסת, זו הנמצאת במנוחה ביחס לאתר (ether). תורת היחסות הפרטית באה ליישב את הסתירה הזאת ולהחיל את עקרון היחסות גם על האלקטרודינמיקה.