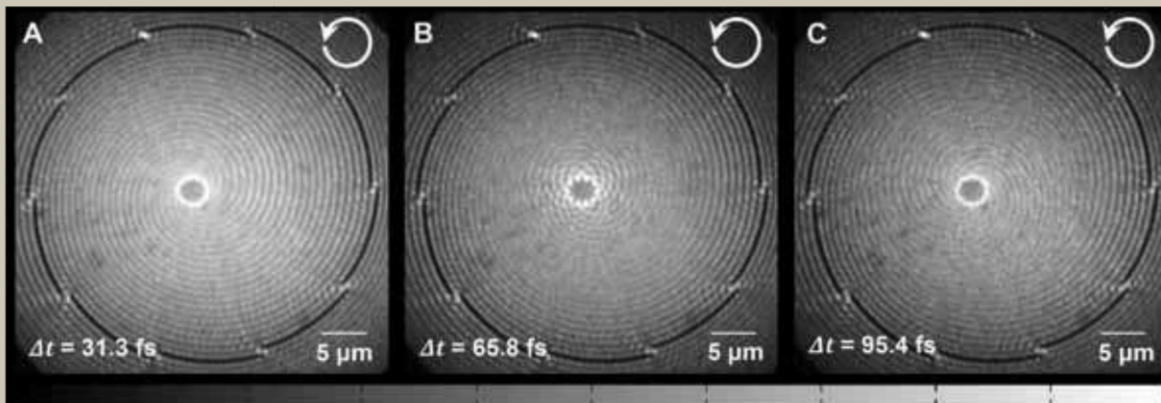


למאמר: <http://science.sciencemag.org/content/355/6330/1187.full>  
 לסרטונים: <http://science.sciencemag.org/content/suppl/2017/03/15/355.6330.1187.DC1>  
 הסרטון השלישי (Movie S3) מציג את התפתחות המערבולת הפלזמונית



פריצת דרך בתחום האינטראקציה בין אור לחומר צפויה להוביל לחידושים

## הדינמיקה של המערבולת

חקרים מהפקולטה להנדסת חשמל ע"ש ויטרבי מציגים פריצת דרך מדעית-טכנולוגית בתחום האינטראקציה בין אור לחומר. בלב המאמר, המתפרסם בכתב העת Science יחד עם עמיתים מגרמניה, מוצג מעקב אחר מערבולות פלזמוניות ברזולוציית זמן ומרחב חסרת תקדים. היישומים הפוטנציאליים רבים ומגוונים: אחסון אופטי של מידע, מלקחיים אופטיים (אחיזה של חומר באמצעות אור), הצפנה קוונטית, מחשוב קוונטי, דימות מיקרוסקופי, יריעות דקות המאופיינות בתכונות מגנטיות ייחודיות ועוד.

המחבר הראשי של המאמר הוא גרישה ספקטור, הלומד לדוקטורט בהנחייתו של פרופ' מאיר אורנשטיין מהפקולטה להנדסת חשמל ע"ש ויטרבי בטכניון. עוד חתומים על המאמר חוקרים מהאוניברסיטאות הגרמניות קייזרסלאטרן, דואיסבורג-אסן ושטוטגרט.

פלזמונים הם מעין גלים משטחיים הנובעים מצימוד בין אור לפלזמה של אלקטרונים חופשיים במתכות. הם נוצרים בממשק שבין חומר מוליך לחומר מבודד מפגיעת אור בחומר ומאופיינים בתכונות פיזיקליות ייחודיות ובהן קיצור משמעותי של אורך הגל של האור הפוגע. היכולת לעצב מבנים ננומטריים במתכות מאפשרת יצירה מבוקרת של מערבולות פלזמוניות זעירות הנושאות תנע זוויתי אורביטלי (OAM) ולמעשה לכודות על המשטח.

מהירות הסיבוב הגבוהה של המערבולות הפלזמוניות מאתגרת את מי שרוצה לעקוב אחריהן וללמוד את מנגנון היווצרותן. בכך חשיבותו של המאמר הנוכחי ב-Science, המציג הצלחה ראשונה במעקב מדויק אחר התפתחותן של מערבולות פלזמוניות ברזולוציה חסרת תקדים של זמן ומרחב.

### רקע היסטורי-מדעי

מאז עבודתו התאורטית של הפיזיקאי ג'ון הנרי פוינטינג ב-1909 והניסויים שערך ריצ'רד בת' באמצע שנות ה-30, ידוע שהאור מאופיין בתנע זוויתי המזכיר תנועה של סביבון סביב עצמו. באופן ציורי, אפשר לדמות את האלקטרון לכדור קטן המסתובב סביב עצמו במהירות נתונה (ספין), בדומה לכדור הארץ או לירח.

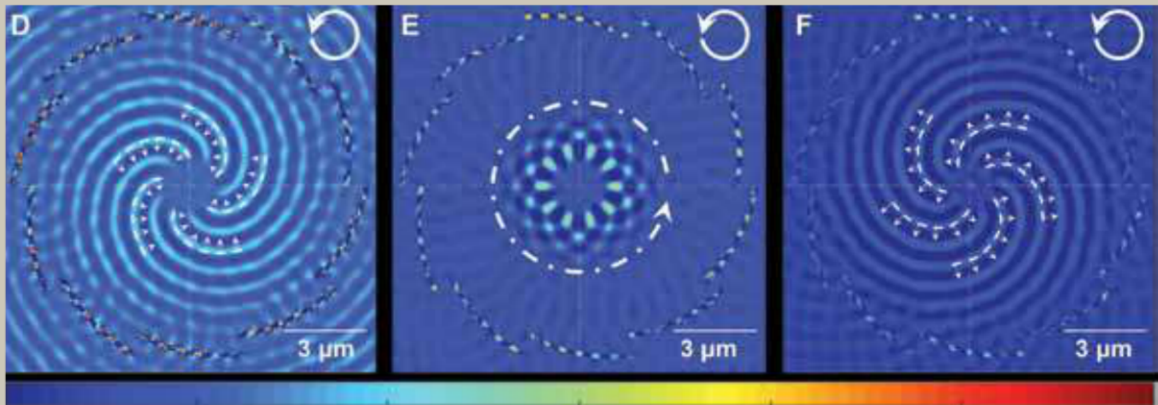
כ-100 שנה התייחסה הקהילה הפיזיקלית לספין כתנע הזוויתי היחיד של הפוטון. עם זאת, בעקבות עבודתו החלוצית של לס אלן שפורסמה ב-1992 התברר כי האור יכול לשאת תנע זוויתי נוסף: תנע זוויתי אורביטלי (OAM). במצב זה האור מתקדם בדומה למדרגות ספיראליות, וחזיתות הגל מסתובבות בקצב של מאות טריליוני סיבובים לשנייה. חברי קבוצתו של פרופ' ארז חסמן מהפקולטה להנדסת



פרופ' מאיר אורנשטיין



גרישה ספקטור



## דרמטיים במחשוב קוונטי ובאחסון מידע

# הפלזמונית

באיור: תיאור התהוות המערבולת הפלזמונית.  
 תרשים A: יצירת חזיתות גל ספירליות על ידי חריצים בתוך משטחי זהב. החזיתות מתקדמות לכיוון מרכז המבנה.  
 B: השלמת היווצרות המערבולת תוך יצירת כמה אונות המסתובבות סביב מרכז המערבולת.  
 C: דעיכת המערבולת תוך יצירת חזיתות גל המתקדמות מן המרכז החוצה.  
 D-F: תיאור תאורטי של שלבי חיי המערבולת. תחילת היווצרות המערבולת תוך התקדמות של חזיתות גל ספירליות לכיוון המרכז (D), התהוות המערבולת במרכז המבנה (E) ודעיכת המערבולת תוך התקדמות הגלים כלפי חוץ עם שינוי כיוון הסיבוב (F).  
 החצים מייצגים את כיוון התקדמות הגלים

מכונות בטכניון הראו לראשונה בשנת 2008 שאפשר לעורר מערבולות פלזמוניות על משטחים. OAM הוא מושא מחקר אטרקטיבי לא רק בשל העניין המדעי הטהור אלא גם בשל הפוטנציאל היישומי העצום הטמון בו: הצפנת מידע, הגדלת הקיבולת של מערכות תקשורת המבוססות על סיבים אופטיים, הצפנה קוונטית ועוד. לבסוף, מזעור התנע הזוויתי שנושא האור וצימודו לפלזמונים טומן בחובו פוטנציאל להעביר כמויות גבוהות של תנע זוויתי לחומר ולאפשר מעברי אנרגיה שכיום נחשבים לבלתי אפשריים.

כדי לייצר התקנים אופטיים זעירים המסתמכים על OAM נדרשים אורכי גל זעירים במיוחד, שאינם אפשריים באופטיקה רגילה. השימוש ב-OAM הנישא על ידי מערבולות פלזמוניות מתגבר על המגבלה מכיוון שתנודות אלה יכולות להגיע לאורכי גל קצרים הרבה יותר משל האור המקורי. במילים אחרות, הן מאפשרות לפתוח התקנים פוטוניים שממדיהם פחותים מ-100 ננומטר (עשירית המיקרון). פיתוחה של טכנולוגיה המפיקה תנודות פלזמוניות מבוקרות הוא אתגר קשה ומורכב, וההצלחה הנוכחית נובעת משיתוף הפעולה הישראלי-גרמני ומשילוב של גבישי זהב באיכות גבוהה מאוד, הבדקי לייזר מהירים ומיקרוסקופ אלקטרונים.

את הקונספט הגה הדוקטורנט גרישה ספקטור מהטכניון, שהוא כאמור המחבר הראשי של המאמר הנוכחי. החוקרת בטינה פרנק מאוניברסיטת שטוטגרט יצרה שכבות זהב דקות מאוד ובתוכן מעין הברגה על פי הנתונים שחישב ספקטור. חוקרים משתי האוניברסיטאות הגרמניות האחרות הקרינו על הזהב הבדקי לייזר קצרים במיוחד - הבדקים של כ-13 פמטו-שניות (פמטו-שנייה היא  $10^{-15}$  שנייה). פגיעת האור בזהב יצרה תנודות פלזמוניות, והחוקרים עקבו אחריהן במיקרוסקופ אלקטרונים ותיעדו אותן ברזולוציית זמן המאפשרת לראות תנועה של אור בתוך מחזור התנודה האופטי. התצפיות מאפשרות לראשונה הבנה מעמיקה של אבולוציית המערבולות ואופי התנהגותן. לבסוף הראו החוקרים דינמיקה של מערבולות הלכודות בממדים של כ-100 ננומטרים.

כאמור, מדובר בתצפית מדויקת ראשונה על היווצרות המערבולות הפלזמוניות, והתיעוד מראה כי מערבולות אלה הן מעין אדוות הנעות מן החוץ פנימה ומתאבכות במרכז. בתהליך זה נוצרות כמה "אונות" המסתובבות סביב המרכז. מספר האונות ומהירותן הזוויתית נמדדו לראשונה, והן מהוות מדידה ישירה של התנע הזוויתי הנישא על ידי המערבולת. בין היתר גילו החוקרים כי ככל שה-OAM גדול יותר, כך נדרש למערבולת זמן ממושך יותר להשלמת סיבוב. החוקרים מעריכים כי המחקר עשוי לסלול דרך למערכות הצפנה זעירות המבוססות על OAM ולהוביל לאינטראקציות אור-חומר חדשות.