

אנו חיים בתוך מעגל חשמלי

כאשר אנשים שומעים את המונח **מזג אוויר חללי**, הם עשויים לחשוב על התפרצויות שמש המפריעות ללוויינים או על זוהר הקוטב המרצד בלילה הקוטבי. אך במהותו, מזג האוויר החללי אינו דבר אקזוטי יותר מאשר התנהגותם של חלקיקים טעונים הזורמים החוצה מהשמש.

השכבות החיצוניות של השמש הן פלזמה רותחת: כל כך חמה שהאלקטרונים והפרוטונים כבר אינם קשורים באטומים, אלא נעים בחופשיות. כמו חוט להט עצום בצינור ואקום, השמש פולטת ללא הרף את הנוזל המוליך חשמלית הזה, המכונה **רוח השמש**. היא זורמת החוצה דרך מערכת השמש במהירות של מאות קילומטרים לשנייה, נושאת עימה אלקטרונים, פרוטונים, חלקיקי אלפא ושדות מגנטיים סבוכים.

חלליות בנקודת L1 – מיליון קילומטרים במעלה הזרם מהארץ – מודדות את רוח השמש בזמן אמת. הן מספרות לנו כמה אלקטרונים ויונים כבדים יותר מגיעים, ובאיזו מהירות. בתנאים שקטים, הרוח נוטה להכיל עודף קל של אלקטרונים, כך שהחלל הבין-פלנטרי נושא רקע של מטען שלילי קל.

כאשר **פליטת מסה קורולנית (CME)** מתפרצת מהשמש, האיזון משתנה. בועות ענקיות של פלזמה ושדה מגנטי סורקות את החלל ומתנגשות במגן המגנטי של כדור הארץ. בקטבים, חלק מהאנרגיה הזו מועבר כלפי מטה לאורך קווי השדה המגנטי, מעורר אטומי חמצן וחנקן לוויילונות זוהרים של ירוק ואדום: **זוהר הקוטב הצפוני** בחצי הכדור הצפוני, ו**זוהר הקוטב הדרומי** בחצי הכדור הדרומי.

כדור הארץ היה שקוע בסביבה זו במשך מיליארדי שנים. גופים מוליכים המוטבעים בפלזמה אינם נשארים נייטרליים; הם צוברים מטען. לאורך זמן גיאולוגי, כדור הארץ התייצב על **פוטנציאל חשמלי שלילי קל ביחס לסביבתו החללית**.

ההבנה הזו היא המעבר שלנו מהחלל לשמיים: אם כדור הארץ שלילי, והחלל מעליו שטוף באלקטרונים ופרוטונים, כיצד מתאזן המטען באטמוספירה עצמה? התשובה היא **היונוספירה**.

היונוספירה ושדה מזג האוויר השקט

היונוספירה מתחילה בגובה של כ-50 ק"מ ומשתרעת למאות קילומטרים. שם, אור אולטרה-סגול מהשמש וחלקיקים נכנסים מפרידים אלקטרונים מאטומים, ומשאירים גז מדולל של יונים. עבורנו על הקרקע, האוויר נראה כמבודד. אך עם הגובה, היוניזציה גדלה במהירות, והמוליכות עולה בכמה סדרי גודל.

היונוספירה התגלתה בשנות ה-20 של המאה הקודמת, לא על ידי פיזיקאים, אלא על ידי מהנדסי רדיו. אדוארד אפלטון ועמיתיו הבחינו שגלי רדיו לפעמים נעים הרבה מעבר לאופק. האותות קפצו משכבה מוליכה גבוהה מעל – מה שאנו מכנים כיום **שכבות F ו-E** של היונוספירה. "המראה בשמיים" זו אפשרה שידור גלובלי, ועבודתו של אפלטון זיכתה אותו בפרס נובל.

אך מעבר לרדיו, ליונוספירה יש משמעות עמוקה יותר. דמיינו את כדור הארץ ככדור מוליך הנושא מטען שלילי, ואת היונוספירה כקליפה טעונה חיובית בגובה עשרות קילומטרים. ביניהם נמצאת האטמוספירה: לא ואקום מושלם, לא מבודד מושלם, אלא דיאלקטרי דולף. יחד הם יוצרים **קבל כדורי**, טעון לכ- **250,000+ וולט**.

על הקרקע, פוטנציאל זה מופיע כשדה חשמלי אטמוספרי של מזג אוויר שקט: כ-100 עד +300 וולט למטר, מכוון כלפי מטה. במילים אחרות, היונספירה החיובית מושכת אלקטרונים כלפי מעלה, ומשאירה את פני השטח שליליים יחסית. מכיוון שהאוויר הופך מוליך יותר עם הגובה, רוב ירידת המתח הזו מתרחשת ב-10-15 הקילומטרים התחתונים – **הטרופוספירה**, שבה נמצאים כל העננים ומזג האוויר.

בתנאים שקטים, שדה זה יציב, מווסת רק על ידי הקצב הגלובלי של כל הסערות בעולם – מחזור יומי המכונה **עקומת קרני**. עם זאת, בסיס שקט זה מכין את הבמה לדרמה של סופות רעמים.

סופות רעמים כמכונות חשמליות

בתוך ענן קומולונימבוס גדל, טריליוני חלקיקי קרח וטיפות מתנגשים. כל אחד נושא יונים: H^+ ו- OH^- , הנמצאים תמיד במים. השדה החשמלי הסביבתי משפיע על אופן תנועת המטענים הללו. גבישי קרח קטנים נוטים לרכוש מטען חיובי ומועברים כלפי מעלה על ידי זרמי אוויר עולים, בעוד שגרעיני קרח כבדים יותר אוספים מטען שלילי ונופלים לרמות בינוניות.

התוצאה היא **מבנה תלת-קוטבי**:

- **אזור מטען שלילי ראשי** בגובה 4-7 ק"מ,
- **אזור חיובי** בראש הענן (10-12 ק"מ),
- לעיתים **שכבה חיובית משנית** ליד הבסיס.

הפרדה זו משקפת ניסוי מפורסם מהמאה ה-19. בשנת 1867, **לורד קלווין** – הידוע בעיקר בזכות סולם הטמפרטורות התרמודינמי – בנה מכשיר באמצעות מים מטפטפים, טבעות ודליים בלבד. **גנרטור טיפות המים של קלווין** ניצל חוסר איזון יוני קטן בטיפות הנופלות. עם אינדוקציה חכמה, תנודות אלו התחזקו עד שקפצו ניצוצות של אלפי וולט מהמכשיר.

המכשיר השולחני של קלווין היה סופת רעמים בזעיר אנפין. עננים הם פשוט גרסאות גדולות יותר של אותו מפעל מטענים, המונע על ידי כבידה, הסעה והתנגשויות.

רוב הברקים שאנו רואים מגיעים מהשכבה השלילית האמצעית המתפרקת לקרקע. אך לעיתים, האזור החיובי העליון משחרר את מטענו. **ברקים חיוביים** אלו חזקים בהרבה, נושאים זרמים גדולים יותר ומגיעים לעשרות קילומטרים לצדדים – הידועים לשמצה כ"ברקים מהשמיים הבהירים". נדירים אך קטלניים, הם ההפך משדה מזג האוויר השקט: החלק החיובי של הענן מתפרק ישירות אל כדור הארץ.

כל סופת רעמים פועלת כך כ**גנרטור**, שואבת מטען חיובי כלפי מעלה ליונספירה ומטען שלילי כלפי מטה לקרקע. יחד, כ-2,000 הסערות הפעילות של כדור הארץ שומרות על הפוטנציאל הגלובלי של 250 קילו-וולט, ממלאות מחדש את מה שהיה דולף אחרת. סופות רעמים אינן רק אירועי מזג אוויר; הן **תחנות הכוח של המעגל החשמלי של כדור הארץ**.

סופות רעמים המגיעות לחלל

במשך מאות שנים חשבו שברקים מוגבלים מתחת לבסיס הענן. אך המעגל פועל בשני הכיוונים. סערות מתפרקות גם **כלפי מעלה**, ליונספירה, ולעיתים עד לחלל הקרוב.

בשנות ה-90, לוויינים שחיפשו התפרצויות קרני גמא קוסמיות גילו משהו לא צפוי: הבזקי קרני גמא של מילישניות מכדור הארץ עצמו. **הבזקי קרני גמא יבשתיים (TGFs)** אלה מופקים כאשר שדות חשמליים בראשי הסערות מאיצים אלקטרונים למהירויות כמעט יחסיות, ומשתטחים על מולקולות אוויר ופולטים קרני גמא. סופת רעמים הופכת ל**מאיץ חלקיקים טבעי**, המתחרה במכונות מעשה ידי אדם.

זמן רב לפני שהלוויינים אישרו זאת, טייסים בגובה רב לחשו על אורות מוזרים: זוהרים אדומים, חרוטים כחולים, טבעות דמויות הילה מעל סערות. טייסי U-2 בשנות ה-50 עשויים היו להיות בין הראשונים שראו אותם, אך דיווחיהם נדחו כהזיות אופטיות. רק בסוף המאה ה-20 מצלמות לכדו אותם:

- **ספרייטים אדומים:** פריקות ענקיות בצורת מדוזה המגיעות ל-80-90 ק"מ.
- **ג'טים כחולים:** חרוטים כחולים צרים מראשי הסערות עד 50 ק"מ.
- **אלפים:** טבעות אדומות מתרחבות בגובה 90 ק"מ, הנגרמות על ידי דופקים אלקטרומגנטיים של ברקים.

יחד, אלה הם **אירועי אור חולפים (TLEs)** – הברקים הנסתרים של השמיים, המחברים סערות ליונוספירה. הם מוכיחים שסופות רעמים אינן מקומיות, אלא שחקנים גלובליים, מזריקים אנרגיה וחלקיקים כלפי מעלה, מפריעים להתפשטות הרדיו, מסלולי לוויינים ואפילו חגורות קרינה.

התחלנו עם מזג אוויר חללי כמשהו המוטל על כדור הארץ. כעת אנו רואים את ההפך: **כדור הארץ עצמו מייצר מזג אוויר חללי**, באמצעות עבודת הסערות שלו.

לחיות בתוך המעגל

כעת המתאר ברור: כדור הארץ, היונוספירה והחלל קשורים במעגל חשמלי גלובלי. עם זאת, נושא זה נופל באופן מביך בין דיסציפלינות.

- **אסטרונומים ופיזיקאים חלליים** מתמקדים בסערות שמש ומגנטוספירות.
- **מטאורולוגים** חוקרים עננים, משקעים וברקים על הקרקע.
- **גיאופיזיקאים** חוקרים רעידות אדמה והרי געש, המשבשים גם הם שדות חשמליים.

התוצאה היא שחשמל אטמוספרי מחליק דרך הסדקים. דוחות מזג אוויר סטנדרטיים נותנים טמפרטורה, לחץ, רוח ולחות – אך לא את **השדה האטמוספרי הסטטי**, למרות שניתן למדוד אותו עם מטחנת שדה פשוטה.

מדוע למדוד אותו?

כבר יש לנו מודלים. רשתות ברקים (Blitzortung, ALDIS, EUCLID) מראות פעילות סערות בזמן אמת על ידי מעקב אחר **ספריקים**, הדופקים הרדיו של הברקים. מדוע לא לבנות אותו דבר עבור **שדות חשמליים סטטיים**?

רשת כזו יכולה:

- לתת **אזהרות מוקדמות של ברקים חיוביים**, המכות המסוכנות ביותר.
- לעקוב אחר **התפתחות סערות**: צמיחת השדה מסמנת הסעה; היפוכי קוטביות מסמנים התפוגגות.
- להראות **צימוד עם מזג אוויר חללי**, מקשר בין CMEs וקרניים קוסמיות לשדות ברמת הקרקע.
- לספק בסיס מדעי לרבים האומרים שהם יכולים "להרגיש את מזג האוויר" בגופם.

הקריאה למצפים

מצפים רבים כבר מודדים חשמל אטמוספרי, אך הנתונים מפוזרים ומוסתרים. מאמץ גלובלי מתואם בשם **GLOCAEM** (תיאום גלובלי של מדידות חשמל אטמוספרי) הושק לפני כמה שנים בלבד, ומקשר כ-20-30 תחנות מאירופה, אסיה, אפריקה ואמריקה. חלק מהאתרים הללו – כמו מצפה קונרד באוסטריה, לומניצקי

שטיט בסלובקיה ואסקדלמיר בסקוטלנד – בעלי היסטוריה ארוכה של ניטור רציף של גרדיאנט הפוטנציאל.

אך בניגוד לרשתות ברקים כמו Blitzortung, זרמי הנתונים הללו נשארים ברובם בידי חוקרים. גרפים בזמן אמת קיימים, אך הם אינם מפורסמים בהרחבה או מתוכננים לשימוש ציבורי. עבור רוב האנשים – אפילו סטודנטים לפיזיקה – השדה האטמוספרי עדיין בלתי נראה.

זו הפער: לא המדידה, אלא הנגישות. מה שנדרש הוא **תרגום של ארכיונים מדעיים ללוחות מחוונים ציבוריים ו-API פתוחים**, באותו אופן שבו רשתות ספריקים הפכו את פעילות הסערות למשהו שכל אחד יכול לצפות בו מתפתח בזמן אמת. שכבה של מדע אזרחי מעל רשתות המחקר הקיימות יכולה לסגור את הלולאה – להפוך גרפים מוסתרים של מצפים למשתנה מזג אוויר "חמישי" חי.

השלמת התמונה

אנו חיים בתוך מעגל חשמלי. כדור הארץ הוא הצלחת השלילית, היונוספירה היא החיובית, וסופות הרעמים הן הגנרטורים. ברקים הם רק הסימפטום הבולט ביותר. ספרייטים, ג'טים, קרני גמא וזרמי מזג אוויר שקט הם השאר.

הבאת ממד נסתר זה של מזג האוויר לנוף הציבורי – על ידי פתיחת נתונים ובניית רשתות – תשלים את הבנתנו את השמיים. זה ייתן לנו כלי חיזוי טובים יותר, תובנות חדשות לגבי אקלים ובריאות, וישיב תחושת פליאה: ההבנה שהעולם שבו אנו הולכים אינו רק מסתובב בחלל, אלא זוהר, מזמזם ומנצנץ בתוך מכונה חשמלית בקנה מידה פלנטרי.