https://farid.ps/articles/we_live_inside_an_electric_circuit/ar.html

# نعيش داخل دائرة كهربائية

عندما يسمع الناس عبارة **طقس الفضاء**، قد يفكرون في التوهجات الشمسية التي تعطل الأقمار الصناعية أو الشفق القطبي المتلألئ في الليل القطبي. لكن في جوهرها، طقس الفضاء ليس أكثر غرابة من سلوك الجسيمات المشحونة التي تتدفق من الشمس.

الطبقات الخارجية للشمس هي بلازما متأججة: ساخنة لدرجة أن الإلكترونات والبروتونات لم تعد مقيدة في الذرات، بل تتحرك بحرية. مثل خيط هائل في أنبوب مفرغ، تصدر الشمس باستمرار هذا السائل الموصل كهربائيًا يُعرف بـ **الرياح الشمسية**. تتدفق هذه الرياح عبر النظام الشمسي بسرعات تصل إلى مئات الكيلومترات في الثانية، حاملة معها الإلكترونات والبروتونات وجسيمات ألفا والمجالات المغناطيسية المتشابكة.

المركبات الفضائية عند نقطة $L1$ - على بعد مليون كيلومتر من الأرض - تقيس الرياح الشمسية في الوقت الحقيقي. تخبرنا كم عدد الإلكترونات والبروتونات والأيونات الأثقل التي تصل، وبأي سرعة. في الظروف الهادئة، تميل الرياح إلى أن تحمل فائضًا طفيفًا من الإلكترونات، لذا فإن الفضاء بين الكواكب يحمل خلفية شحنة سالبة طفيفة.

عندما ينفجر **انبعاث كتلي إكليلي (CME)** من الشمس، يتغير التوازن. تجتاح فقاعات ضخمة من البلازما والمجال المغناطيسي الفضاء وتصطدم بالدرع المغناطيسي للأرض. عند القطبين، يتدفق بعض هذه الطاقة للأسفل على طول خطوط المجال المغناطيسي، مثيرة ذرات الأكسجين والنيتروجين إلى ستائر متوهجة باللونين الأخضر والأحمر: **الشفق القطبي الشمالي** في النصف الشمالي من الكرة الأرضية، و**الشفق القطبي الجنوبي** في النصف الجنوبي.

لقد كانت الأرض مغمورة في هذه البيئة لمليارات السنين. الأجسام الموصلة المغمورة في البلازما لا تظل محايدة؛ فهي تتراكم الشحنات. على مدى الزمن الجيولوجي، استقرت الأرض في **جهد كهربائي سالب نسبيًا بالنسبة لبيئتها الفضائية**.

هذا الإدراك هو انتقالنا من الفضاء إلى السماء: إذا كانت الأرض سالبة، والفضاء أعلاه مغمور بالإلكترونات والبروتونات، فكيف يتم توازن الشحنة في الغلاف الجوي نفسه؟ الإجابة هي **الأيونوسفير**.

## الأيونوسفير والمجال الجوي الهادئ

يبدأ **الأيونوسفير** على ارتفاع حوالي 50 كيلومترًا ويمتد إلى مئات الكيلومترات. هناك، تقوم الأشعة فوق البنفسجية الشمسية والجسيمات الواردة بفصل الإلكترونات عن الذرات، تاركة غازًا مخففًا من الأيونات. بالنسبة لنا على الأرض، يبدو الهواء كعازل. لكن مع الارتفاع، تزداد الإيونية بسرعة، وترتفع الموصلية بأوامر من حيث الحجم.

تم اكتشاف الأيونوسفير في عشرينيات القرن العشرين، ليس من قبل الفيزيائيين بل من قبل مهندسي الراديو. لاحظ إدوارد أبليتون وزوملاؤه أن موجات الراديو كانت تسافر أحيانًا إلى ما هو أبعد من الأفق. كانت الإشارات ترتد عن طبقة موصلة عالية في السماء - ما نسميه الآن **طبقات E و F** من الأيونوسفير. هذه "المرآة في السماء" جعلت البث العالمي ممكنًا، وحصل أبليتون على جائزة نوبل عن عمله.

لكن الأيونوسفير له أهمية أعمق من الراديو. تخيل الأرض ككرة موصلة تحمل شحنة سالبة، والأيونوسفير كقشرة مشحونة إيجابيًا على ارتفاع عشرات الكيلومترات. بينهما يوجد الغلاف الجوي: ليس فراغًا مثاليًا، ولا عازلًا مثاليًا، بل عازل متسرب. معًا، يشكلون **مكثفًا كرويًا**، مشحونًا بحوالي **+250,000 فولت**.

على الأرض، يظهر هذا الجهد كـ **المجال الكهربائي الجوي الهادئ**: حوالي **+100 إلى +300 فولت لكل متر**، موجه للأسفل. بمعنى آخر، الأيونوسفير الإيجابي يجذب الإلكترونات للأعلى، تاركًا السطح سلبيًا نسبيًا. بما أن الهواء يصبح أكثر موصلية مع الارتفاع، فإن معظم هذا الانخفاض في الجهد يحدث في أدنى 10-15 كيلومترًا - **التروبوسفير**، حيث تقع جميع السحب والطقس.

في الظروف الهادئة، يكون هذا المجال ثابتًا، يتأثر فقط بالإيقاع العالمي لجميع عواصف العالم - دورة يومية تُعرف بـ **منحنى كارنيجي**. ومع ذلك، فإن هذا الأساس الهادئ يمهد الطريق لدراما العواصف الرعدية.

## العواصف الرعدية كآلات كهربائية

داخل سحابة كومولونيمبوس نامية، تتصادم تريليونات من جزيئات الجليد والقطرات. كل منها يحمل أيونات: $H^+$ و$OH^-$ الموجودة باستمرار في الماء. يؤثر المجال الكهربائي المحيط على كيفية تحرك هذه الشحنات. تميل بلورات الجليد الصغيرة إلى اكتساب شحنة إيجابية ويتم حملها للأعلى بواسطة التيارات الصاعدة، بينما تجمع الجرابيل الأثقل شحنة سالبة وتسقط إلى المستويات المتوسطة.

النتيجة هي **هيكل ثلاثي الأقطاب**:

- **منطقة الشحنة السالبة الرئيسية** على ارتفاع 4-7 كيلومترات،
- **منطقة إيجابية** في قمة السحابة (10-12 كيلومترًا)،
- أحيانًا **طبقة إيجابية ثانوية** بالقرب من القاعدة.

يعكس هذا الفصل تجربة شهيرة من القرن التاسع عشر. في عام 1867، بنى **لورد كلفن** - المعروف بمقياس درجة الحرارة الحرارية - جهازًا باستخدام الماء المتساقط والخواتم والدلاء فقط. استغل **قطارة الماء كلفن** عدم التوازن الأيوني الطفيف في القطرات المتساقطة. مع التحريض الذكي، تعززت هذه التقلبات حتى قفزت شرارات بطول آلاف الفولتات من الجهاز.

كان جهاز كلفن المكتبي عاصفة رعدية مصغرة. السحب هي مجرد نسخ أكبر من نفس مصنع الشحنات، مدعوم بالجاذبية والحمل الحراري والتصادمات.

معظم البرق الذي نراه يأتي من المستوى المتوسط السالب يتفرغ إلى الأرض. لكن أحيانًا، تطلق المنطقة الإيجابية العليا شحنتها. هذه **ضربات البرق الإيجابية** أقوى بكثير، تحمل تيارات أكبر وتصل إلى عشرات الكيلومترات جانبيًا - الشهيرة بـ "الصواعق من السماء الصافية". نادرة ولكنها قاتلة، فهي عكس المجال الهادئ: الجزء العلوي الإيجابي للسحابة يتفرغ مباشرة إلى الأرض.

وبالتالي، تعمل كل عاصفة رعدية كـ **مولد**، تضخ الشحنة الإيجابية للأعلى إلى الأيونوسفير والشحنة السالبة للأسفل إلى الأرض. مجتمعة، تحافظ ~2000 عاصفة نشطة على الأرض على الجهد العالمي البالغ 250 كيلوفولت، معيدة ملء ما كان سيتم تسريبه. العواصف الرعدية ليست مجرد أحداث جوية؛ إنها **محطات الطاقة في الدائرة الكهربائية للكوكب**.

## العواصف الرعدية التي تصل إلى الفضاء

لقرون، كان يُعتقد أن البرق محصور تحت قاعدة السحابة. لكن الدائرة تعمل في كلا الاتجاهين. تتفرغ العواصف أيضًا **للأعلى**، إلى الأيونوسفير، وأحيانًا إلى الفضاء القريب.

في التسعينيات، اكتشفت الأقمار الصناعية التي تبحث عن انفجارات أشعة غاما الكونية شيئًا غير متوقع: ومضات أشعة غاما لمدة ميلي ثانية من الأرض نفسها. تُنتج هذه **ومضات أشعة غاما الأرضية (TGFs)** عندما تُسرّع المجالات الكهربائية في قمة العاصفة الإلكترونات إلى سرعات شبه نسبية، مما يصطدم بجزيئات الهواء ويصدر أشعة غاما. تصبح العاصفة الرعدية **مسرع جسيمات طبيعي**، ينافس الآلات التي صنعها الإنسان.

قبل أن تؤكد الأقمار الصناعية هذا، كان الطيارون على ارتفاعات عالية يتحدثون همسًا عن أضواء غريبة: توهجات حمراء، مخروطيات زرقاء، حلقات تشبه الهالة فوق العواصف. ربما كان طيارو U-2 في الخمسينيات من بين الأوائل الذين رأوها، لكن تقاريرهم رُفضت باعتبارها أوهام بصرية. فقط في أواخر القرن العشرين التقطت الكاميرات:

- **السبرايت الحمراء**: تصريفات ضخمة على شكل قنديل البحر تصل إلى 80-90 كيلومترًا.
- **النفاثات الزرقاء**: مخروطيات زرقاء ضيقة من قمم العواصف حتى 50 كيلومترًا.
- **الإلفز**: حلقات حمراء متوسعة على ارتفاع 90 كيلومترًا، ناتجة عن نبضات البرق الكهرومغناطيسية.

معًا، هذه هي **الأحداث الضوئية العابرة (TLEs)** - برق السماء المخفي، يربط العواصف بالأيونوسفير. إنها تثبت أن العواصف الرعدية ليست محلية بل جهات فاعلة عالمية، تحقن الطاقة والجسيمات للأعلى، مضطربة انتشار الراديو، مدارات الأقمار الصناعية، وحتى أحزمة الإشعاع.

بدأنا مع طقس الفضاء كشيء مفروض على الأرض. الآن نرى العكس: **الأرض نفسها تولد طقس الفضاء**، من خلال عمل عواصفها.

## العيش داخل الدائرة

الآن الصورة واضحة: الأرض والأيونوسفير والفضاء مرتبطون في دائرة كهربائية عالمية. ومع ذلك، يقع هذا الموضوع بشكل محرج بين التخصصات.

- **علماء الفلك وفيزيائيو الفضاء** يركزون على العواصف الشمسية والمغناطيسات.
- **علماء الأرصاد الجوية** يدرسون السحب والهطول والبرق على الأرض.
- **علماء الجيوفيزياء** يحققون في الزلازل والبراكين، التي تؤثر أيضًا على المجالات الكهربائية.

النتيجة هي أن الكهرباء الجوية تسقط في الشقوق. تقارير الطقس القياسية تعطي درجة الحرارة، الضغط، الرياح، والرطوبة - لكن ليس **المجال الجوي الثابت**، على الرغم من أنه يمكن قياسه بمطحنة مجال بسيطة.

### لماذا نقيسه؟

لدينا بالفعل نماذج. شبكات البرق (Blitzortung، ALDIS، EUCLID) تظهر نشاط العواصف في الوقت الحقيقي من خلال تتبع **السفيريكس**، نبضات الراديو للبرق. لماذا لا نبني نفس الشيء لـ **المجالات الكهربائية الثابتة**؟

مثل هذه الشبكة يمكن أن:

- تعطي **تحذيرًا مبكرًا من البرق الإيجابي**، الضربات الأكثر خطورة.
- تتبع **تطور العاصفة**: نمو المجال يشير إلى الحمل الحراري؛ انعكاس القطبية يشير إلى التبدد.
- تظهر **الارتباط بطقس الفضاء**، ربط الانبعاثات الكتلية الإكليلية والأشعة الكونية بالمجالات على مستوى الأرض.
- توفر أساسًا علميًا للكثيرين الذين يقولون إنهم يستطيعون "الشعور بالطقس" في أجسادهم.

## الدعوة إلى المراصد

تقيس العديد من المراصد بالفعل الكهرباء الجوية، لكن البيانات مبعثرة ومخفية. تم إطلاق جهد عالمي منسق يسمى **GLOCAEM** (التنسيق العالمي لقياسات الكهرباء الجوية) قبل بضع سنوات فقط، يربط بين ~20-30 محطة من أوروبا وآسيا وإفريقيا والأمريكتين. بعض هذه المواقع - مثل مرصد كونراد في النمسا، لومنيكي شتيت في سلوفاكيا، وإسكدالميور في اسكتلندا - لها تاريخ طويل من مراقبة التدرج المحتمل المستمر.

لكن على عكس شبكات البرق مثل Blitzortung، تظل تدفقات البيانات هذه إلى حد كبير في أيدي الباحثين. توجد رسوم بيانية في الوقت الحقيقي، لكنها ليست معلن عنها على نطاق واسع أو مصممة للاستخدام العام. بالنسبة لمعظم الناس - حتى طلاب الفيزياء - لا يزال المجال الجوي غير مرئي.

هذه هي الفجوة: ليست القياس، بل الوصول. ما يلزم هو **ترجمة الأرشيفات العلمية إلى لوحات تحكم عامة وواجهات برمجية مفتوحة**، بنفس الطريقة التي جعلت بها شبكات السفيريكس نشاط العواصف شيئًا يمكن لأي شخص مشاهدته يتكشف مباشرة. طبقة علم المواطنين فوق شبكات البحث الحالية يمكن أن تغلق الحلقة - تحول الرسوم البيانية المخفية للمراصد إلى متغير طقس "خامس" حي.

## إكمال الصورة

نعيش داخل دائرة كهربائية. الأرض هي اللوحة السالبة، الأيونوسفير هي الإيجابية، والعواصف الرعدية هي المولدات. البرق هو العرض الأكثر وضوحًا فقط. السبرايت، النفاثات، أشعة غاما، والتيارات الهادئة هي الباقي.

إحضار هذا البعد المخفي من الطقس إلى العرض العام - من خلال فتح البيانات وبناء الشبكات - سيُكمل فهمنا للسماء. سيعطينا أدوات تنبؤ أفضل، رؤى جديدة حول المناخ والصحة، ويستعيد شعورًا بالدهشة: الإدراك أن العالم الذي نسير عليه ليس مجرد كوكب يدور في الفضاء، بل يتوهج ويهمهم ويشتعل داخل آلة كهربائية على نطاق كوكبي.