שלום.
תודה רבה שבאתם.

אני איתי הלוי ואני גיאוכימאי

מהמחלקה למדעי כדור הארץ
וכוכבי הלכת במכון ויצמן.

אני בעצם חוקר את ההיסטוריה
ארוכת הטווח של התהליכים ששולטים

בהרכב הכימי של האטמוספרה
והאוקיינוסים,

כל האינטראקציה של התהליכים האלה
עם יצורים חיים בעצם, עם הביוספרה,

ואיך כל הדברים האלה ביחד
משפיעים על האקלים של כדור הארץ.

מה שנדבר עליו היום זה בעצם
מחזור הפחמן הארוך,

זה סוג של שם קוד לאוסף התהליכים
ששולטים במחזור הפחמן

בטווחי זמן גיאולוגיים, שהם טווחי זמן
של מאות אלפי עד מיליוני שנים.

אז מחזור הפחמן
זה בעצם הדרך שבה אנחנו מתארים

את מאזן הפחמן באוקיינוסים
ובאטמוספרה,

וכדי להבין מה הכוונה במאזן הפחמן,
בואו נחשוב על מאזן אחר,

האמבטיה הזאת.

בעצם מה קובע את מפלס המים

או את כמות המים באמבטיה?

יש לנו ברז שממנו נכנסים מים,

אנחנו קוראים לזה "השטף הנכנס".

השטף הנכנס הזה יכניס מים,

ומפלס המים יעלה ויעלה

עד שהוא יגיע לשפת האמבטיה,

וכשהוא יגיע לשפת האמבטיה,
המים יתחילו להישפך החוצה,

ואנחנו נגיע למצב שבו בעצם
מה שנשפך החוצה מהאמבטיה

שווה בדיוק למה שנכנס.

אם אנחנו נגביר את הזרם בברז הזה,
יישפכו עוד מים החוצה.

ואז בעצם שפת האמבטיה תקבע את
מפלס המים או את כמות המים באמבטיה.

אם אנחנו נעשה חור
איפה שהוא באמצע האמבטיה,

אז כשהמים יגיעו לחור הזה,

הם יתחילו להישפך החוצה,

אבל אם החור הוא קטן מספיק,

אז השטף שיצא

לא ישתווה לשטף הנכנס,

המים כמובן ימשיכו לעלות
ויישפכו משפת האמבטיה.

ומה קורה אם עכשיו
אנחנו נגיד מוסיפים

עוד חור?

או עוד מספר חורים?

באיזשהו שלב סכום השטפים היוצאים

שיוצאים מהחורים הקטנים האלה באמבטיה,

ישתוו לשטף הנכנס,

ומפלס המים יתייצב לנו

באיזשהו גובה שהוא לא שפת האמבטיה,

אלא איפה שהוא יותר נמוך.

אוקיי? אז זה בעצם מאזן
של מה שנכנס ומה שיוצא,

וזה קובע לנו את כמות המים באמבטיה
או את המפלס, במקרה הזה.

אז מה הקשר בין כל זה
לבין מחזור הפחמן?

כמו האמבטיה, גם מחזור הפחמן

נשלט על ידי מאזני מסה.

מה שמעניין במאזני המסה האלה

זה שהם מתרחשים על פני טווחי זמן

מאוד מאוד שונים.

מאזני המסה ששולטים בעצם

בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה

בפרקי הזמן הקצרים ביותר, העונתיים,

הם מאזנים בין פוטוסינתזה לבין נשימה.

הם בעצם שטפים של פחמן דו-חמצני

בין האטמוספרה לבין הביוספרה,

שהיא מערכת החיים,

ובאופן יותר ספציפי, הצמחים.

אז מה הכוונה?

אפשר לראות את ההשפעה של השטפים האלה
בין האטמוספרה לבין הביוספרה

אם מסתכלים על המחזור השנתי
בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה.

מה שאתם יכולים לראות כאן

זה ריכוז הפחמן הדו-חמצני על ציר ה-Y

בחלקים למיליון,

ועל ציר ה-X אנחנו בעצם רואים

את עונות השנה,

הקיץ כאן, החורף כאן.

הנקודות השחורות זה מדידות אינדיבידואליות.

הקווים האדומים זה ממוצעים שבועיים

והקווים הכחולים זה ממוצעים חודשיים.

מה שאנחנו יכולים לראות זה שבמהלך הקיץ

יש לנו ירידה בריכוז הפחמן הדו-חמצני

ועלייה במהלך החורף.

כשבעצם ריכוז הפחמן הדו-חמצני

נמצא בשיא בסוף החורף,

סוף החורף של 2021 כאן ו-2020 כאן,

ונמצא בשפל בסוף הקיץ,

בספטמבר-אוקטובר.

מה קורה פה בעצם?

במהלך כל השנה

צמחים עושים פוטוסינתזה,

הם בעצם לוקחים פחמן דו-חמצני
מהאטמוספרה

ומקבעים אותו
ומייצרים ממנו סוכר,

מהסוכרים האלה הם מייצרים אחר כך
חומרים אורגניים יותר מורכבים,

ומשתמשים בזה גם לאנרגיה,
בעצם בתהליך הנשימה,

שהוא תהליך הפוך
לתהליך הפוטוסינתזה,

שבו בעצם גם הצמחים,
אבל גם יצורים

שניזונים מהם ונמצאים מעליהם
בשרשרת המזון,

בעצם משתמשים בחמצן
כדי לשרוף את הסוכר הזה,

להפיק ממנו אנרגיה,

ובעצם התהליך הזה הם פולטים
פחמן דו-חמצני בחזרה לאטמוספרה.

אז מה שקורה באביב,

מתחיל באביב ונמשך כל הקיץ,

זה בעצם שהעצים מלבלבים,

מגדלים עלים וענפים חדשים,

ועושים בעצם יותר פוטוסינתזה

מכפי שהם עושים נשימה,

זאת אומרת, הם צורכים יותר
פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה

מכפי שהם משחררים בחזרה
לאטמוספרה בתהליך הנשימה.

ולכן ריכוז הפחמן הדו-חמצני
במהלך האביב והקיץ יורד.

בחורף העלים נושרים,

העצים עומדים בשלכת

וגם צמחים שלא עומדים בשלכת

עושים פוטוסינתזה יותר לאט,

ומה שקורה זה שלמשך כמה חודשים

קצב הנשימה על ידי הצמחים עצמם

ועל ידי האורגניזמים האחרים
שנמצאים בסביבה,

עולה על קצב הפוטוסינתזה,

ואז בעצם משתחרר פחמן דו-חמצני
לאטמוספרה בקצב מהיר יותר

מכפי שהוא נצרך
על ידי פוטוסינתזה

וריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה עולה.

אנחנו יכולים לראות את הדפוס המשונן הזה

גם אם אנחנו מסתכלים

על ריכוז הפחמן הדו-חמצני על פני...

לא על פני שנה אחת, אלא על פני עשורים,

אנחנו יכולים לראות כאן את הריכוזים

מ-1960 ועד היום.

זה נמדד בעצם

על הר הגעש מאונה לואה שבהוואי,

אז אנחנו רואים את הדפוס המשונן העונתי הזה,

ועליו אנחנו רואים גם בצורה מאוד ברורה

עלייה מתמדת בריכוזי הפחמן הדו-חמצני,

מאז שהתחילו המדידות,

בערך מ-315 חלקי מיליון

עד 415 חלקי מיליון,

והסיבה שזה קורה,

זה כי המין האנושי פולט
פחמן דו-חמצני בקצב כזה

שהמחזור העונתי של הצמחים,
של הוצאה באביב ובקיץ

והכנסה בחזרה בסתיו ובחורף,

לא מצליח לאזן את מחזור הפחמן,
ולכן הריכוז ממשיך ועולה.

יש תהליכים נוספים,
חוץ מהתהליך שדיברנו עליו עכשיו,

של חילופי גזים בעצם,
חילופי פחמן דו-חמצני

בין האטמוספרה לביוספרה,

שמזיזים פחמן בין המערכות השונות
בכדור הארץ.

התהליך הבא שאנחנו נדבר עליו

הוא בעצם שטפים של פחמן

בין האטמוספרה לבין ההידרוספרה,

שהיא מערכת המים.

לצורך העניין, זה בעיקר האוקיינוסים.

החילופים האלה

בין ההידרוספרה לבין האטמוספרה

מתרחשים על פני טווחי זמן של אלפי שנים,

ומה הכוונה?

חילופים של פחמן דו-חמצני,

שטפים נכנסים ויוצאים מהאטמוספרה

לאוקיינוס הרדוד, בעצם מגיעים לשיווי משקל

בפרקי זמן של שנים.

זה די מהר.

העניין הוא שהאוקיינוס הרדוד,
החלק העליון של האוקיינוס

מכיל כמות פחמן בערך דומה
לכמות הפחמן שיש באטמוספרה,

זה לא מאגר ענק של פחמן.

לעומת האוקיינוס הרדוד, האוקיינוס העמוק
מכיל פי ארבעים יותר פחמן

מכפי שמכילים האוקיינוס הרדוד
והאטמוספרה ביחד.

זאת אומרת, זה מאגר מאוד גדול
של פחמן דו-חמצני

שגם יכול לגדול, לצורך העניין.

והקצב שבו האוקיינוס הרדוד

מחליף פחמן דו-חמצני עם האוקיינוס העמוק,

הוא הרבה יותר איטי,

זה משהו שלוקח למעלה מאלף שנים

כדי להגיע לשיווי משקל

בין האוקיינוס העמוק לאוקיינוס הרדוד

לאטמוספרה.

אז בעצם בהינתן אלפי שנים,

חלק ניכר מהפחמן הדו-חמצני
שאנחנו פולטים לאטמוספרה כרגע,

יימצא בתוך האוקיינוס העמוק,

אבל כמו התהליכים שראינו קודם,

של חילופי גז בין האטמוספרה
לבין הביוספרה,

גם התהליכים האלה
הם הרבה יותר איטיים

מהקצב שבו אנחנו פולטים
פחמן דו-חמצני לאטמוספרה

ולכן הריכוז ממשיך לעלות.

בטווחי הזמן הכי ארוכים במחזור הפחמן,

שהם טווחי זמן גיאולוגיים

של מאה אלף שנים עד מיליוני שנים,

יש תהליכים שמסוגלים בעצם להוציא

כמויות בלתי מוגבלות של פחמן מהאטמוספרה.

בעצם אינטראקציה בין האטמוספרה

לבין הגיאוספרה,
שהיא מערכת הסלעים,

יכולה להוציא כמויות בלתי מוגבלות

של פחמן מהאטמוספרה,

ואנחנו נראה עוד רגע למה
אפילו היכולת הזאת

לא בהכרח עוזרת לנו להיפטר
מהפחמן הדו-חמצני שאנחנו פולטים.

אז איך זה עובד בעצם?

אז פחמן דו-חמצני נפלט לאטמוספרה
לא רק מתהליכים מלאכותיים,

לא רק משרפת דלקים,
אלא גם מתהליכים טבעיים,

כמו למשל מפליטות מהרי געש.

ה-CO2 הזה מצטבר באטמוספרה,
שם הוא מתמוסס במי גשם,

ובעצם פחמן דו-חמצני מומס
הוא חומצה פחמתית.

אותה חומצה פחמתית
יורדת בגשם על סלעים

ומאיצה את תהליך ההתמוססות שלהם,

היא בעצם מפרקת אותם ליסודות
שמהם הם מורכבים,

וממוצקים הם הופכים
למומסים בתמיסה.

לא כל סלע הוא רלוונטי, הסלעים העיקריים
שרלוונטיים הם סלעים מגמטיים,

שהם סלעים שנוצרו מהתקררות
והתמצקות של מגמה

ממעמקי כדור הארץ,

והסיבה שהם הסלעים הרלוונטיים
זה שהם לא מכילים פחמן,

ואנחנו נחזור עוד מעט
ללמה זה חשוב שהם לא מכילים פחמן.

הם בעצם בנויים מסיליקון
ומיסודות אחרים,

והסיליקון והיסודות האחרים האלה,
סידן, מגנזיום,

בעצם נשטפים בנהרות לתוך הים
ומצטברים בים,

כשיורד גשם עם חומצה פחמתית
שמאיץ את קצב בליית הסלעים.

אז בעצם המומסים האלה
מצטברים בים,

ובים חיים יצורים ימיים
שבונים את השלדים שלהם,

שהם בעצם שלדים חיצוניים,
הם בונים את הקונכיות שלהם

מסידן ומפחמן.

אותו סידן שהגיע
מבליית הסלעים המגמטיים

ואותו פחמן שהגיע
מהפחמן הדו-חמצני מהאטמוספרה,

אז הם מייצרים שלד גירני,

וכשהאורגניזמים האלה מתים
ושוקעים לקרקעית האוקיינוס,

הקונכיות האלה מצטברות

וכעבור עשרות ומאות אלפי שנים,

הן בעצם הופכות למרכיבים העיקריים
בסלעים גירניים.

הסלעים הגירניים האלה מורכבים
כאמור מסידן ומפחמן,

זאת אומרת,
קיבלנו סלע שמכיל פחמן,

כשהתחלנו בעצם מסלע
שלא מכיל פחמן,

אז בעצם זה התהליך שעל פני פרקי זמן
גיאולוגיים מוציא פחמן

מהמערכת של האוקיינוס
והאטמוספרה ביחד.

אוסף התהליכים הזה
נקרא מחזור הסיליקט-קרבונט,

סיליקט על שם הסלעים המגמטיים,
שמכילים סיליקון,

וקרבונט על שם
סלעי הגיר הפחמימניים

שמכילים בעצם את הפחמן
שהגיע מהאטמוספרה.

ומחזור הסיליקט-קרבונט,
כמו שראינו,

הוא תהליך שצורך פחמן דו-חמצני,

ומה שמעניין לגביו זה שהוא לא סתם
תהליך שצורך פחמן דו-חמצני,

אלא הוא סוג של וסת
לפחמן הדו-חמצני באטמוספרה.

הוא לא סתם חור באמבטיה,

הוא חור באמבטיה שהגודל שלו
יכול להשתנות.

וככה הוא יכול להוציא
יותר או פחות מים,

ובעצם לאזן את ריכוז המים,

או את מפלס המים,
אם אנחנו מדברים על האמבטיה,

אבל את ריכוז הפחמן הדו-חמצני,
אם אנחנו מדברים על האטמוספרה.

אז איך זה עובד?

בעצם אם עולה שטף אספקת הפחמן,

מה שיקרה זה שריכוזי
הפחמן הדו-חמצני באטמוספרה יעלו,

אנחנו העלנו את האספקה,

אז מתחילים מזה שהריכוז עולה.

עכשיו, פחמן דו-חמצני
הוא גז חממה,

ולכן כשעולה הריכוז שלו,
האקלים מתחמם,

הטמפרטורה עולה,

ומכיוון שתגובות בליית הסלעים המגמטיים,

בעצם בליית הסיליקטים,

כמו תגובות כימיות רבות אחרות,
תלויות בטמפרטורה,

גם הקצב שלהן יעלה.

עכשיו, הן לא רק תלוית בטמפרטורה,

הן גם תלויות בקצב
אספקת המים,

שגם הוא עולה
כשהטמפרטורה עולה,

כשהאקלים מתחמם,
יש האצה של המחזור ההידרולוגי,

יורד יותר גשם ובעצם גם
דרך הטמפרטורה וגם דרך הגשם,

אנחנו מאיצים
את בליית הסלעים המגמטיים.

מכיוון שהסלעים המגמטיים הם המקור
למומסים שבסופו של דבר

היצורים יוצרי השלד משתמשים בהם
כדי לייצר את השלדים הגירניים שלהם,

כשהעלינו את קצב
בליית הסלעים המגמטיים,

העלינו את קצב יצירת סלעי הגיר,

ומכיוון שיצירה וקבורה של סלעי גיר

זה תהליך שמוציא
פחמן דו-חמצני מהאטמוספרה,

ברגע שעשינו את זה,

זה יוביל לירידה או לייצוב

של ריכוזי הפחמן הדו-חמצני,

וכל התהליך הזה גם עובד הפוך.

אם שטף האספקה לא עולה,
אלא יורד,

שוב יהיה לנו כאן משוב שלילי
שבסופו של דבר

ייצב את ריכוזי הפחמן הדו-חמצני
בדיוק איפה שהם צריכים להיות,

כדי ששטף האספקה הוולקני יתאזן
בדיוק על ידי שטף הקבורה של סלעי גיר.

זה לא רק משוב שלילי
במחזור הפחמן,

שוב, מכיוון שפחמן דו-חמצני
הוא גז חממה,

אז בליית סלעים היא בעצם
משוב מייצב במערכת האקלים.

זה משהו שמייצב את הטמפרטורה
של כדור הארץ,

זה בעצם סוג של תרמוסטט
של כדור הארץ.

וכמו שאמרתי קודם,

אוסף התהליכים הזה לוקח

מאות אלפי עד כדי מיליוני שנים

כדי לייצב את ריכוז הפחמן באטמוספרה.

אמרתי לכם שהתהליכים האלה
מסוגלים להוציא, לצורך העניין,

כמויות בלתי מוגבלויות של פחמן
מהאטמוספרה,

אז בעצם אפשר לשאול את השאלה:

למה שלא ניתן פשוט
לתהליכים הטבעיים האלה

לייצב את ריכוז הפחמן הדו-חמצני
לאיפה שהוא היה

לפני שהמין האנושי התחיל לפלוט
פחמן דו-חמצני לאטמוספרה?

והסיבה היא בעצם נעוצה
בקצב האיטי של התהליכים האלה

ביחס לתהליך הפליטה האנושית
לאטמוספרה.

אם ראינו את אותם שטפים
בין הביוספרה לאטמוספרה

ובין ההידרוספרה לאטמוספרה,
שהם איטיים ביחס לקצב הפליטה,

התהליכים האלה איטיים

בסדרי גודל יותר מהקצב

שבו אנחנו מוסיפים פחמן דו-חמצני

לאטמוספרה.

אז אם אנחנו נפסיק לפלוט
פחמן דו-חמצני לאטמוספרה היום,

ייקח מאות אלפי שנים
עד שריכוז הפחמן הדו-חמצני

ירד לאן שהוא צריך לרדת,

והשאלה היא בעצם:
האם אנחנו רוצים לחכות שזה יקרה?

אז בעצם, אם אנחנו מסכמים,

הריכוזים של הפחמן הדו-חמצני

באוקיינוס ובאטמוספרה נקבעים על ידי מאזני מסה,

כמו מפלס המים באמבטיה שהתחלנו בה.

ראינו שמאזני המסה האלה

הם קורים בטווחי זמן שונים,

שעל פני טווחי הזמן הארוכים ביותר,

על פני מיליוני שנים,

ריכוז הפחמן הדו-חמצני

בעצם נקבע על ידי אספקה

מפעילות וולקנית

וצריכה ביצירה וקבורה של סלעי גיר.

מכיוון שקצב הבליה,

בליית הסלעים שמספקים את החומרים

שבסופו של דבר מייצרים את הגיר,

היא תלויה בטמפרטורה,

אז יש לנו כאן בעצם משוב אקלימי מייצב.

בהינתן המשוב האקלימי המייצב הזה,

ריכוזי הפחמן הדו-חמצני והטמפרטורה ירדו

בחזרה לאיפה שהם היו

לפני שהתחילה הפעילות האנושית,

אבל זה יקרה רק מאות אלפי שנים

אחרי שאנחנו נפסיק לפלוט
פחמן דו-חמצני.