The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# ምድር እስከ መቼ አረንጓዴ ሆና ልትቆይ ትችላለች? የአየር ንብረት ሞዴል ክልሎችን ይሰጣል፣ የፍጻሜ ቀንን አይደለም

*29 ሶስት-ልኬት የአየር ንብረት ማስመሰያዎች በምድር photosynthetic biosphere ላይ የተለያዩ ገደቦችን ከአሁን በኋላ በግምት 1.35 እስከ 1.87 ቢሊዮን ዓመት መካከል ያስቀምጣሉ። ዋጋዎቹ ለዓለት weathering፣ ሙቀት እና ተክሎች ሊጠቀሙ ለሚችሉት በጣም ዝቅተኛ የካርቦን-ዳይኦክሳይድ መጠኖች በፈቃድ በተቀለሉ መንገዶች ላይ ይመረኮዛሉ። ሁሉም ተክሎች፣ ሁሉም ሕይወት፣ ሥልጣኔ ወይም ፕላኔቷ መቼ እንደሚያበቁ አይተነብዩም።*

---

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

# ምድር እስከ መቼ አረንጓዴ ሆና ልትቆይ ትችላለች? የአየር ንብረት ሞዴል ክልሎችን ይሰጣል፣ የፍጻሜ ቀንን አይደለም

አንድ ቅጠል በጠባብ ሚዛን ውስጥ ይኖራል። ብርሃን፣ ውሃ፣ ካርቦን ዳይኦክሳይድ እና ኬሚስትሪው ሊቋቋመው የሚችል ሙቀት ያስፈልገዋል። በአንድ የሰው ዕድሜ ውስጥ ፀሐይ የዚህ ሚዛን የማይለወጥ ክፍል ትመስላለች። በአንድ ቢሊዮን ዓመት ግን እንዲህ አይደለም።

ፀሐይ በዋና sequence ላይ እያረጀች ስትሄድ ቀስ በቀስ ይበልጥ ብሩህ ትሆናለች። ብዙ የፀሐይ ብርሃን ምድርን ያሞቃል፣ ግን ፕላኔቷ የረጅም-ጊዜ ምላሽ አላት፡- በዝናብ ውሃ፣ ካርቦን ዳይኦክሳይድና silicate ዓለቶች መካከል ያሉ ምላሾች ካርቦን ዳይኦክሳይድን ከከባቢ አየር ሊያስወግዱ ይችላሉ። ይህ የgreenhouse ተፅእኖን ያዳክማል እና ከሙቀቱ አንዳንዱን ይቃወማል። ፕላኔቷን የሚያቀዘቅዘው ያው ምላሽ በመጨረሻ photosynthetic ፍጥረታት ሕያው ቲሹ ለመገንባት የሚጠቀሙበትን ካርቦን ሊያሳጣቸው ይችላል።

አዲስ Journal of Geophysical Research: Atmospheres ጥናት ከሁለት ገደቦች የትኛው ቀድሞ ሊደርስ እንደሚችል ይጠይቃል፡- በጣም ብዙ ሙቀት ወይስ በጣም ትንሽ ካርቦን ዳይኦክሳይድ? መልሱ ምድር "የምትሞትበት" ቀን አይደለም። በፈቃድ በተቀለሉ ሁለት የወደፊት መንገዶች፣ photosynthetic ሕይወት ላይ የተቀመጡት ገደቦች ከአሁን በኋላ በግምት **1.35 እስከ 1.87 ቢሊዮን ዓመት** መካከል ይወድቃሉ።

ያ ክልል ስለ vegetative biosphere ነው፡- በphotosynthetic ፍጥረታት፣ በተለይም ብርሃንና ካርቦን ዳይኦክሳይድን ወደ ባዮሎጂያዊ ቁስ በሚቀይሩ ተክሎችና ሌሎች ፍጥረታት፣ የሚደገፈው የምድር ሕያው ሥርዓት ክፍል። የእያንዳንዱ ማይክሮብ ትንበያ አይደለም። የሰው ሥልጣኔ የሕይወት ዘመን አይደለም። የፕላኔቷ የሕይወት ዘመንም አይደለም።

# የፕላኔቷ ቴርሞስታት ሁለት እርግጠኛ ያልሆኑ ቅንብሮች አሉት

ዋናው እርግጠኝነት እጥረት **silicate የዐለት መፈራረስ** ነው። ካርቦን ዳይኦክሳይድ በዝናብ ውሃ ይሟሟል፣ ከsilicate ዓለቶች ጋር ይገናኛል፣ በመጨረሻም ወደ ውቅያኖሶችና ደለል ይወሰዳል። በጂኦሎጂያዊ ጊዜ ላይ እሳተ ገሞራዎች ካርቦን ዳይኦክሳይድን ይመልሳሉ። እነዚህ ሂደቶች አብረው carbonate-silicate cycle የሚባለውን፣ ብዙ ጊዜ እንደ የፕላኔት ቴርሞስታት የሚገለጸውን፣ የሂደት ክፍል ይፈጥራሉ።

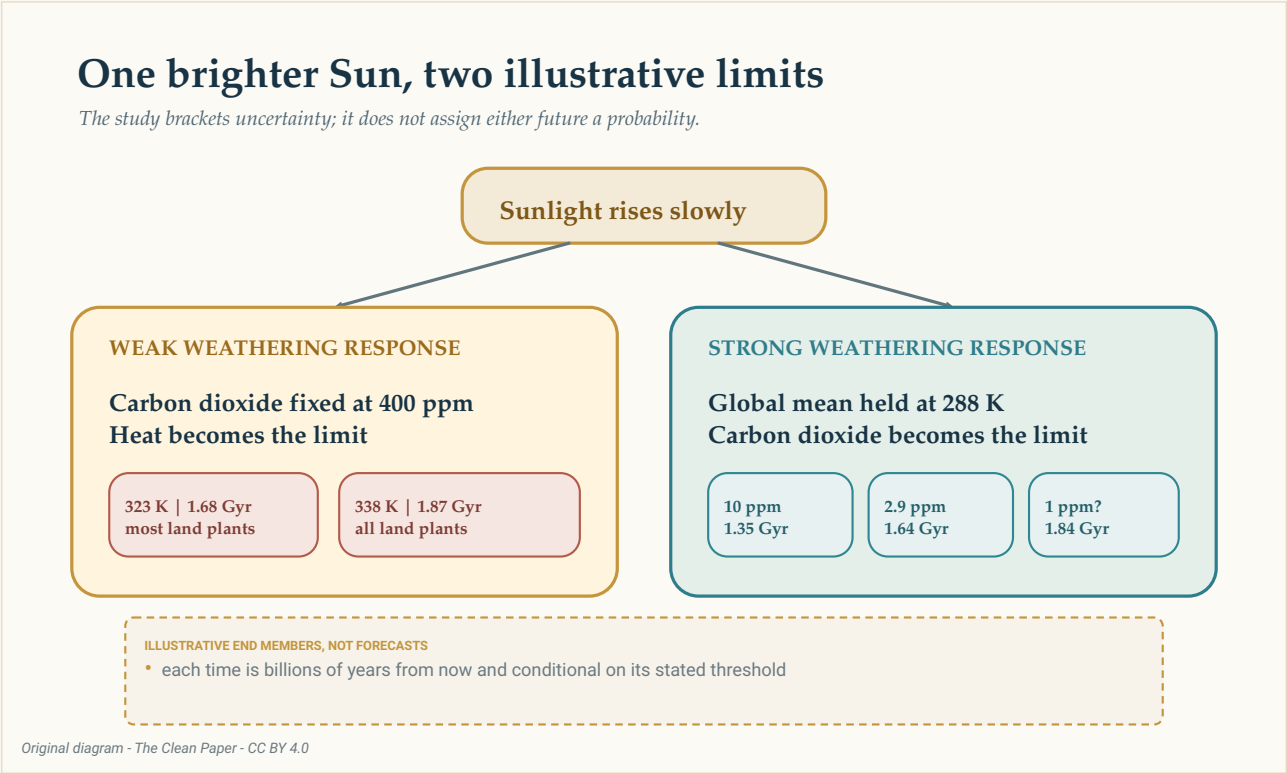
በይበልጥ ሞቃትና እርጥብ ዓለም የዐለት መፈራረስ ሊፋጠን እና ካርቦን ዳይኦክሳይድን በፍጥነት ሊያስወግድ ይችላል። ግን በወደፊት ይበልጥ ብሩህ ፀሐይ ሥር ያ ምላሽ ምድርን ምን ያህል ጠንክሮ እንደሚቆጣጠር ሳይንቲስቶች አያውቁም። Jacob Haqq-Misra እና Eric Wolf ስለዚህ አንድ "ትክክለኛ" ተብሎ የሚገመት መንገድ አልመረጡም። ሁለት **መጨረሻ members** ሞዴል አደረጉ፡- እርግጠኝነት እጥረቱን ለመገደብ በፈቃድ የተመረጡ ጽንፈኛ ሁኔታዎች።

- **በደካማ-የዐለት መፈራረስ መጨረሻ member** ውስጥ፣ የከባቢ አየር ካርቦን ዳይኦክሳይድ በ400 parts per ሚሊዮን ይቆያል፣ እየበራች ያለችው ፀሐይ ሙቀትን ታሳድጋለች።
- **በጠንካራ-የዐለት መፈራረስ መጨረሻ member** ውስጥ፣ የዓለም አማካይ የገጽ ሙቀት በ288 kelvin፣ 15 degrees Celsius ገደማ፣ ይቆያል፣ የፀሐይ ብርሃን ሲጨምር ግን ካርቦን ዳይኦክሳይድ ይቀንሳል።

ሁለቱም ቅርንጫፎች የምድር እውነተኛ የወደፊት ሁኔታ ተብለው አልቀረቡም። የመጀመሪያው ካርቦን ዳይኦክሳይድ ከፍ ብሎ ቢቆይ ሙቀት ምን እንደሚያደርግ ይጠይቃል። ሁለተኛው ደግሞ የዐለት መፈራረስ የዓለም ሙቀትን የዛሬው አማካይ አካባቢ ቢያቆየው የካርቦን እጥረት ምን እንደሚያደርግ ይጠይቃል።

**የዐለት መፈራረስ እንደ ቴርሞስታት እንዴት ሊሠራ ይችላል?**

ምሳሌው ስለ feedback ነው፣ በእውነት ያለ መቆጣጠሪያ ቁልፍ አይደለም። ሞቃት አየር ንብረት ኬሚካላዊ የዐለት መፈራረስን ሲያፋጥን፣ ብዙ የከባቢ አየር ካርቦን ዳይኦክሳይድ ወደ የተሟሟ ቁስ፣ ማዕድናትና ደለል ሊገባ ይችላል። ያንን greenhouse gas ማስወገድ ከመጀመሪያው ሙቀት አንዳንዱን ይቃወማል። በእጅግ ረጅም ጊዜያት፣ የእሳተ ገሞራ ጋዝ መውጣት ካርቦን ዳይኦክሳይድን ይመልሳል።
የእያንዳንዱ ግንኙነት ጥንካሬ በዝናብ፣ በተጋለጠ ዓለት፣ erosion፣ ባዮሎጂ፣ tectonics እና የውቅያኖስ ኬሚስትሪ ላይ ይመረኮዛል። ለዚህ ነው ጥናቱ ቴርሞስታቱን እንደ የታወቀ ማሽን ከመቁጠር ይልቅ ገዳቢ ምላሾችን የሚፈትነው።




ጥናቱ እርግጠኛ ያልሆነውን የወደፊት ሁኔታ በሁለት ምሳሌያዊ መጨረሻ members ይገድባል። የዐለት መፈራረስ ደካማ ምላሽ ካሳየ፣ የሚጨምረው ሙቀት ለመሬት ተክሎች የተቀመጡ ገደቦችን ይደርሳል። ጠንካራ ምላሽ ካሳየ፣ የሚቀንሰው ካርቦን ዳይኦክሳይድ ለphotosynthesis የተቀመጡ ገደቦችን ይደርሳል። እነዚህ በሁኔታ የተገደቡ የሞዴል ቅርንጫፎች ናቸው፣ ዕድሎች ወይም የመቁጠሪያ ቀኖች አይደሉም።

The Clean Paper CC BY 4.0

# 29 የተረጋጉ የሞዴል ዓለሞች፣ አንድ የሁለት-ቢሊዮን-ዓመት ፊልም አይደለም

ተመራማሪዎቹ ExoCAM የተባለ ሶስት-ልኬት ዓለም አቀፍ የአየር ንብረት ሞዴል ተጠቅመው ይበልጥ ጠንካራ የፀሐይ ብርሃንና ዝቅተኛ ካርቦን ዳይኦክሳይድ ጥምረቶች ላይ 29 steady-ሁኔታ climates አስሉ። እያንዳንዱ ጉዳይ ለ70

የሞዴል ዓመታት ተሰራ። እዚህ አንድ የሞዴል ዓመት በቋሚ ሁኔታዎች ሥር አንድ የተስመሰለ ዓመታዊ ዑደት ነው፡- ሰው ሠራሽ አየር ንብረቱ እንዲረጋጋ ለመፍቀድ የሚጠቀሙበት runtime እንጂ የምድር ወደፊትን ዓመት በዓመት በሚተነብይ ሂደት ውስጥ አንድ ደረጃ አይደለም። የተስመሰለው አየር ንብረት ለመረጋጋት ጊዜ ካገኘ በኋላ የመጨረሻዎቹ 20 ዓመታት አማካይ ተወሰደ።

እነዚያ 29 ጉዳዮች የተለያዩ የሞዴል ዓለሞች ናቸው። እያንዳንዱ ሩጫ በግሪድ ላይ አንድ ነጥብ ነው፣ “ይህ የተመረጠ የፀሐይ ብርሃንና ካርቦን ዳይኦክሳይድ ጥምረት ላይ ምን የተረጋጋ አየር ንብረት ይስማማል?” የሚለውን ይመልሳል። ኮምፒውተሩ ከዛሬዋ ምድር ጀምሮ ከባቢ አየሯን፣ ዓለቶቿን፣ ውቅያኖሶቿንና ሕያው ፍጥረታቷን ለቀጣዮቹ ሁለት ቢሊዮን ዓመታት ቀጥታ አላሻሻለም። ደራሲዎቹ በምትኩ ሁለቱን አብነታዊ የዐለት መፈራረስ መንገዶች በእነዚያ ቀድሞ በተሰሉ ነጥቦች በኩል አሳለፉ፤ በነጥቦቹ መካከል ያለው መንገድ ራሱ አልተስመሰለም።

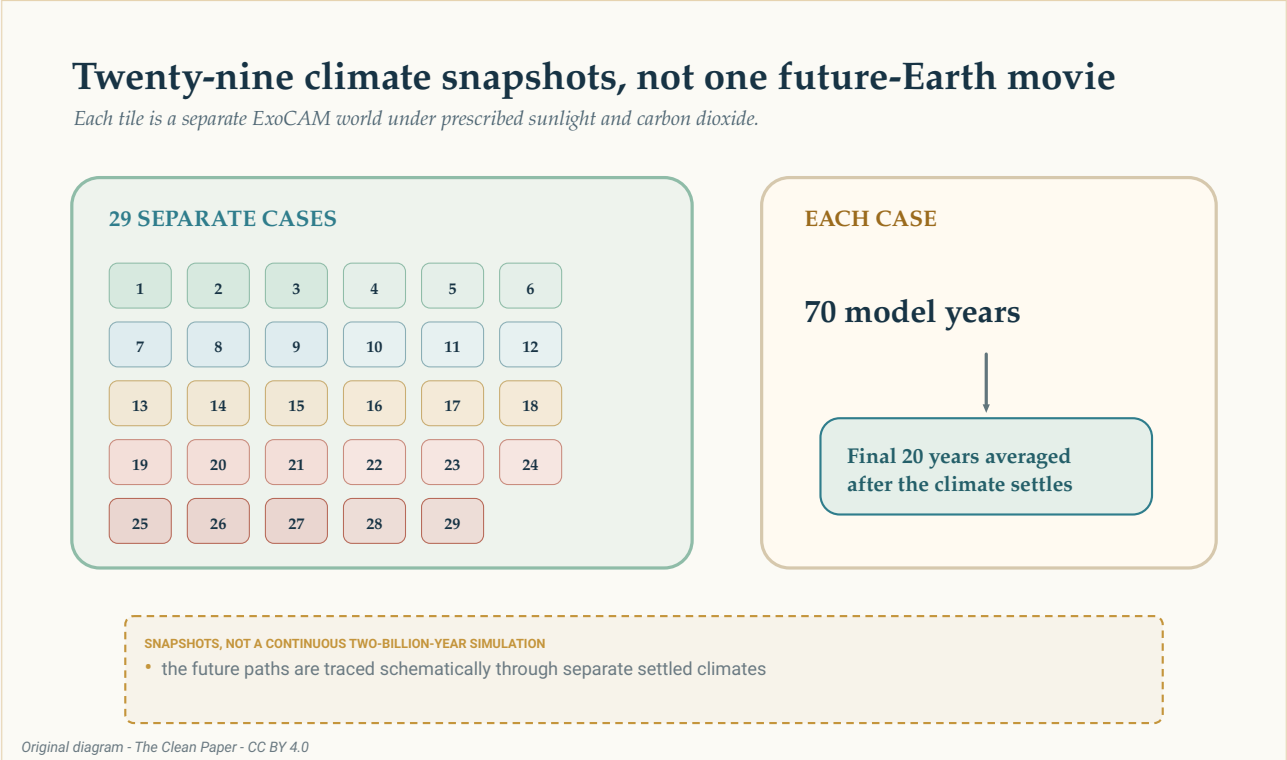
ሰንጠረዡ በኦፊሴላዊው ሞዴል-መረጃ archive ውስጥ ያሉትን የፀሐይ ብርሃንና የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ጥምረቶች ይደግማል። ጉዳይ IDs በarchive ቅደም ተከተል እዚህ የተጨመሩ የንባብ እገዛዎች ናቸው። S/S0 አንጻራዊ solar constant ነው፡- በሞዴሉ የተጠቀመው የሚገባ የፀሐይ ኃይል በዛሬው S0 ዋጋ ተከፍሎ። ስለዚህ 1.2 ማለት ከዛሬ 20 በመቶ ብዙ የሚገባ የፀሐይ ኃይል ማለት ነው። CO2 (ppm) በአንድ ሚሊዮን የከባቢ አየር ሞለኪውሎች ውስጥ ያሉ የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ሞለኪውሎች ድብልቅ መጠን ነው።

| ጉዳይ ID | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0 | 400 |
| 2 | 1.0 | 180 |
| 3 | 1.0 | 11.25 |
| 4 | 1.0 | 1.40625 |
| 5 | 1.044 | 400 |
| 6 | 1.044 | 180 |
| 7 | 1.044 | 135 |
| 8 | 1.044 | 11.25 |
| 9 | 1.044 | 1.40625 |
| 10 | 1.081 | 400 |
| 11 | 1.081 | 180 |
| 12 | 1.081 | 11.25 |
| 13 | 1.081 | 1.40625 |
| 14 | 1.091 | 400 |
| 15 | 1.091 | 180 |
| 16 | 1.091 | 34 |
| 17 | 1.091 | 11.25 |
| 18 | 1.091 | 1.40625 |
| 19 | 1.143 | 400 |
| 20 | 1.143 | 180 |
| 21 | 1.143 | 11.25 |
| 22 | 1.143 | 6 |
| 23 | 1.143 | 1.40625 |
| 24 | 1.2 | 400 |
| 25 | 1.2 | 180 |
| 26 | 1.2 | 11.25 |
| 27 | 1.2 | 1.40625 |
| 28 | 1.2 | 0.45 |

| ጉዳይ ID | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---|---|---|
| 29 | 1.2 | 0 |

የሞዴሉ ምድር የምናውቃት ይመስላል፣ ግን በፈቃድ የተገደበች ናት። የምድር መጠን አላት እና የዛሬውን ጂኦግራፊ ትጠቀማለች። ሙሉ በሙሉ የሚዘዋወር ውቅያኖስ ሳይሆን ቀላል slab ocean፣ በግምት የዛሬውን የምድር ዋጋ የሚመስል የከባቢ አየር ግፊት (አንድ bar) እና ቋሚ methane አላት። ምህዋሯ ፍጹም ክብ (zero eccentricity) ነው፣ የመዞሪያ ዘንግዋም ዘንበል የለውም (zero obliquity)። በግልጽ የተወከሉ soils፣ vegetation ወይም ከሚለወጥ biosphere የሚመጣ feedback የለም። ከሁሉም አስፈላጊ፣ የአየር ንብረት ሞዴሉ ከዐለት-የዐለት መፈራረስ ሞዴል ጋር በdynamic ሁኔታ አልተጣመረም። በሌላ አነጋገር ExoCAM የዐለት መፈራረስን አያሰላም፣ በእሱ መሠረት ካርቦን ዳይኦክሳይድን አያዘምንም እና ቀጣዩን አየር ንብረት በfeedback ውደት አያስኬድም። ተመራማሪዎቹ በምትኩ ሁለቱን ገዳቢ መንገዶች በቅድሚያ አስቀመጡ እና በ29-ጉዳይ የአየር ንብረት ግሪድ ውስጥ አሳለፏቸው።

> **“steady ሁኔታ” በአየር ንብረት ሞዴል ምን ማለት ነው?**
>
> steady-ሁኔታ ጉዳይ በአንድ የተመረጠ ፀሐይና ከባቢ አየር ሥር እንዲረጋጋ ጊዜ የተሰጠው የሞዴል አየር ንብረት ነው። በማስመሰያው ውስጥ የአየር ሁኔታ ከቀን ወደ ቀንና ከዓመት ወደ ዓመት እየተለወጠ ይቀጥላል፣ ግን የረጅም-ጊዜ አማካዮቹ በጣም መንሸራተታቸውን ያቆማሉ።
> ይህ “እነዚህ ሁኔታዎች ላይ ምን ዓይነት አየር ንብረት ይስማማል?” ብሎ ለመጠየቅ ጠቃሚ ነው። እውነተኛዋ ምድር ከአንድ የሁኔታ ስብስብ ወደ ሌላው ትክክለኛውን መንገድ እንዴት እንደምትሄድ ከመተንበይ የተለየ ነው።




እያንዳንዱ tile ለ70 የሞዴል ዓመታት የተካሄደ የተለየ ExoCAM የአየር ንብረት ሩጫ ነው፣ የመጨረሻዎቹ 20 ዓመታት አማካይ ተወስደዋል። ጥናቱ በተቀመጡ የፀሐይ ብርሃንና የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ሁኔታዎች ላይ 29 የተረጋጉ አየር ንብረቶችን ናሙና አድርጓል፤ ለሁለት ቢሊዮን ዓመታት ቀጥታ የሚለወጥ አንድ ምድር አላስመሰለም።

The Clean Paper CC BY 4.0

# መጨረሻ member አንድ፡- በቂ ካርቦን ዳይኦክሳይድ፣ በጣም ብዙ ሙቀት

በደካማ-የዐለት መፈራረስ ቅርንጫፍ፣ ካርቦን ዳይኦክሳይድ በ400 parts per ሚሊዮን ቋሚ ይቆያል። የፀሐይ ግብዓት ሲጨምር ሙቀት ገዳቢው ምክንያት ይሆናል።

ጥናቱ ከቀደምት ሥራዎች የተወሰዱ ሁለት የዓለም አማካይ ሙቀት ገደቦችን ይጠቀማል፡-

- 323 kelvin፣ በዓለም ዓመታዊ አማካይ 50 degrees Celsius ገደማ፣ ሲደርስ ዓለም ለአብዛኛዎቹ የመሬት ተክሎች በጣም ሞቃት ተብላ ትቆጠራለች። ሞዴሉ ይህን ገደብ በግምት 1.68 ቢሊዮን ዓመት ውስጥ ይደርሳል።
- 338 kelvin፣ በዓለም ዓመታዊ አማካይ 65 degrees Celsius ገደማ፣ ሲደርስ ዓለም ለሁሉም የመሬት ተክሎች በጣም ሞቃት ተብላ ትቆጠራለች። ሞዴሉ ይህን ገደብ በግምት 1.87 ቢሊዮን ዓመት ውስጥ ይደርሳል።

እነዚህ የተቀመጡ ባዮሎጂያዊ ገደቦች ናቸው፣ እያንዳንዱ photosynthetic ፍጥረት በግድ የሚያቆምባቸው ዓለም አቀፍ ሙቀቶች አይደሉም። የዓለም አማካይ ትልልቅ የክልል ልዩነቶችንም ይደብቃል። ጥናቱ የሙቀትና የውሃ ጥምረቶች ተስማሚ ሊቆዩ የሚችሉባቸውን ቦታዎች በተለየ ይመለከታል፣ ግን በአየር ንብረት ካርታ ላይ ያለ ምልክት እያንዳንዱን የወደፊት መጠለያ ወይም adaptation ሊዘረዝር አይችልም።

# መጨረሻ member ሁለት፡- ተቋቋሚ ሙቀት፣ በጣም ትንሽ ካርቦን ዳይኦክሳይድ

በጠንካራ-የዐለት መፈራረስ ቅርንጫፍ፣ የዓለም አማካይ ሙቀት በ288 kelvin፣ 15 degrees Celsius ገደማ፣ ቋሚ ይደረጋል፣ የከባቢ አየር ካርቦን ዳይኦክሳይድ ግን ይቀንሳል። እዚህ መልሱ የተለያዩ photosynthetic መንገዶች ምን ያህል ትንሽ ካርቦን ሊጠቀሙ እንደሚችሉ ላይ ይመረኮዛል።

- በተለምዶ የሚጠቀሰው 10 parts per ሚሊዮን ገደብ — በአንድ ሚሊዮን የከባቢ አየር ሞለኪውሎች 10 የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ሞለኪውሎች — ላይ የC4 photosynthesis ገደብ በግምት 1.35 ቢሊዮን ዓመት ውስጥ ይደርሳል። C4 photosynthesis በበቆሎና ሸንኮራ አገዳን ጨምሮ በተክሎች የሚጠቀም ሲሆን፣ ካርቦንን በሚያስይዘው ኢንዛይም ዙሪያ ካርቦን ዳይኦክሳይድን ያሰባስባል።
- በቀደምት ሥራ የተወያየውን አማራጭ 2.9 parts per ሚሊዮን የC4 ገደብ መጠቀም ወደ 1.64 ቢሊዮን ዓመት ያንቀሳቅሰዋል።
- አንዳንድ CAM ተክሎች — crassulacean acid metabolism የሚጠቀሙ፣ የካርቦን-ዳይኦክሳይድ መውሰድን በሌሊት ከቀን አጠቃቀሙ የሚለዩ — ወይም የተሟሟ bicarbonate ሊጠቀሙ የሚችሉ የውሃ ተክሎች ሊቆዩ እንደሚችሉ ጋር የተያያዘ ጊዜያዊ 1 part per ሚሊዮን ገደብ ወደ 1.84 ቢሊዮን ዓመት ያንቀሳቅሰዋል።

የመጨረሻው ቁጥር ትልቁን ባዮሎጂያዊ ጥንቃቄ ይይዛል። ደራሲዎቹ አንድ-part-per-ሚሊዮን ገደቡን በግልጽ "ጊዜያዊ" ብለው ይጠሩታል። በወደፊት-ምድር ሁኔታዎች ሁሉም CAM ተክሎች ወይም የውሃ ተክሎች የሚኖሩበት በሙከራ የተረጋገጠ ገደብ አይደለም።

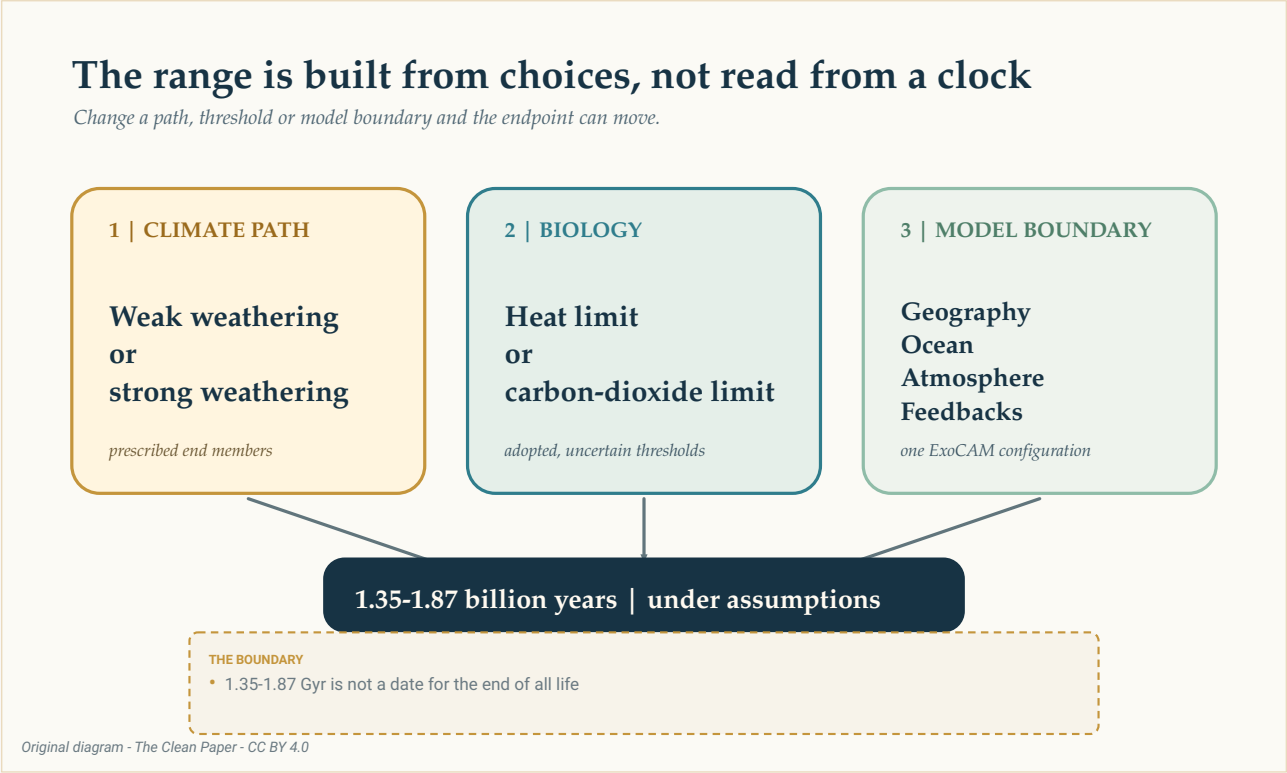
**C3፣ C4 እና CAM ስትራቴጂዎች ናቸው፣ ደረጃ መስላል አይደሉም**

ተክሎች ካርቦንን ለመያዝ የተለያዩ ባዮኬሚካላዊ መንገዶችን ይጠቀማሉ። C3 photosynthesis በጣም የተለመደው ነው። C4 photosynthesis፣ በበቆሎና ሸንኮራ አገዳን ጨምሮ በተክሎች የሚጠቀመው፣ ካርቦንን በሚያስይዘው ኢንዛይም ዙሪያ ካርቦን ዳይኦክሳይድን ያሰባስባል እና ካርቦን ዳይኦክሳይድ ሲያንስ የተሻለ ሊሠራ ይችላል። Crassulacean acid metabolism (CAM) የካርቦን መውሰድንና አጠቃቀሙን በሌሊትና በቀን ይለያል፣ ብዙ ተክሎች ውሃን እንዲቆጥቡ ይረዳል።
እነዚህ በዝርያ ደረጃ ብዙ ልዩነቶች ያሏቸው የስትራቴጂ ቤተሰቦች ናቸው፣ “የተሻሉ” ተክሎች ተከታታይ ደረጃዎች አይደሉም። የጥናቱ በጣም ዝቅተኛ የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ገደቦች ሊኖሩ የሚችሉ ገደቦችን ለመመርመር የተቀመጡ ግምቶች ናቸው፣ የወደፊት ሥነ-ምህዳር እነሱን ለመጠቀም በእርግጥ እንደሚያድግ ዋስትና አይደሉም።

# 1.86 ቢሊዮን ዓመት የማብቂያ ቀን ያልሆነው ለምን ነው?

የጥናቱ ብዙ ጊዜ በርዕስ የሚጠቀሰው **1.86 ቢሊዮን ዓመት** ግምት የሁለቱ ተስፋ ሰጪ ከፍተኛ ጫፎች አማካይ ነው፡- በካርቦን-ዳይኦክሳይድ-የተገደበ ቅርንጫፍ 1.84 ቢሊዮን ዓመት፣ በሙቀት-የተገደበ ቅርንጫፍ 1.87 ቢሊዮን ዓመት። የሁለት የተለያዩ ሁኔታዎች አጭር ማጠቃለያ ነው። በተሻለ ትክክለኛነት ያለ ሶስተኛ የሞዴል ውጤት አይደለም፣ በጣም የሚታመን ቀንም አይደለም።

ሰፊው 1.35-እስከ-1.87-ቢሊዮን-ዓመት ክልል እንኳን አንድ ዕድል አይይዝም። ታችኛውና ላይኛው ዋጋዎች በተለያዩ የዐለት መፈራረስ ግምቶች፣ በተለያዩ ባዮሎጂያዊ ገደቦች እና በአንድ የአየር-ንብረት-ሞዴል ቅንብር ላይ ይመረኮዛሉ። ክልሉ ጊዜን እንደሚለካው ያህል በሙከራው ውስጥ የተደረጉትን ምርጫዎችም ይለካል።




1.35-እስከ-1.87-ቢሊዮን-ዓመት ክልሉ የሚወጣው የዐለት መፈራረስ መንገድ፣ ባዮሎጂያዊ ገደብ እና የሞዴል ድንበር ከተመረጡ

በኋላ ብቻ ነው። የግምቶች ካርታ ነው፣ በሁሉም ሕይወት መጥፋት የሚያበቃ ሰዓት አይደለም።

The Clean Paper CC BY 4.0

# ሌሎች ገደቦች ቀድመው ሊደርሱ ይችላሉ

ረጅሙ የvegetative-biosphere ግምቶች ወደ ሌላ እርግጠኛ ያልሆነ ድንበር ይቀርባሉ፡- ትልቅ የውቅያኖስ መጥፋትን ሊያመጣ የሚችል moist ወይም runaway greenhouse። የአየር ንብረት ሞዴሎች የፀሐይ ብርሃን ሲጨምር እነዚያ ሁኔታዎች መቼ እንደሚጀምሩ፣ በተለይ ከዛሬ ሁኔታዎች በጣም ርቀው ሲሄዱ፣ በከፍተኛ ሁኔታ አይስማሙም። አንዳንድ ግምቶች ከተስፋ ሰጪው የphotosynthesis ገደብ በፊት ያስቀምጧቸዋል።

ይህ ማለት የላይኛው ቅርንጫፍ ምድር ከአሁን በኋላ 1.87 ቢሊዮን ዓመት ድረስ ውቅያኖሶቿን፣ የምናውቃቸውን አህጉራት ወይም መኖሪያ ሊሆኑ የሚችሉ የገጽ ሁኔታዎችን ትጠብቃለች ብሎ እንደ ቃል ኪዳን ሊነበብ አይችልም። ሞዴሉ የወደፊት plate tectonics፣ የመሬት ስፋት ለውጦች፣ እየተለወጡ ያሉ ecosystems ወይም ሙሉ ተለዋዋጭ ውቅያኖስንም አያካትትም። ከባቢ አየሩ ኃይልን እንዴት እንደሚውጥና እንደሚለቅ የሚያሰላውም ወደ ከፍተኛ የፀሐይ ብርሃንና እጅግ ዝቅተኛ ካርቦን ዳይኦክሳይድ ሁኔታዎች እየተገፋ ነው፣ በእነዚህ ሁኔታዎች የተለያዩ ሞዴሎች ይለያያሉ።

Evolutionary adaptation እና ቴክኖሎጂያዊ ጣልቃ ገብነት በጥናቱ ውይይት ውስጥ እንደ አማራጮች ይታያሉ። የ29 የአየር ንብረት ማስመሰያዎች ውጤቶች አይደሉም። ሞዴሉ የወደፊት ፍጥረታት አንድ-part-per-ሚሊዮን photosynthetic መንገድ ሲያዳብሩ አያሳይም፣ አንድ ሥልጣኔም ከባቢ አየርን ለአንድ ቢሊዮን ዓመት ሲቆጣጠር አያሳይም።

# ይህ ስለ ዛሬው የአየር ንብረት ቀውስ የሚናገር ውጤት አይደለም

የፀሐይ መብራት መጨመር በመቶ ሚሊዮኖች እስከ ቢሊዮኖች ዓመታት ላይ ይሠራል። ዘመናዊው በሰው የሚነሳ ሙቀት ግን በአሥርተ ዓመታትና በመቶ ዓመታት ውስጥ በፍጥነት እየጨመሩ ካሉ greenhouse gases ይመጣል። የተለያዩ forcings ናቸው፣ በፍጹም የተለያዩ የጊዜ መጠኖች ላይ፣ የተለያዩ ጥያቄዎችን ይመልሳሉ።

በዚህ ጥናት ውስጥ ያለ ምንም ነገር ስለ ዛሬው የአየር ንብረት ለውጥ ያለውን ማስረጃ አያዳክምም ወይም እርምጃ እንዲዘገይ አይከራከርም። በአንድ ሩቅ የሞዴል ሁኔታ ውስጥ አንዳንድ photosynthetic ሕይወትን ሊያቆይ የሚችል biosphere ዛሬ ያሉ ማህበረሰቦችና ecosystems ደህና ከሚሆኑበት አየር ንብረት ጋር አንድ አይደለም።

ጥናቱ ዋጋ ያለው ሩቅ የሆነ ጥያቄን ይበልጥ ሥርዓተ-ነገር ስለሚያደርገው ነው። የፀሐይ ብርሃን ሲጨምር ካርቦን ዳይኦክሳይድ ቋሚ ሆኖ ሲቆይ ቀደምት፣ ቀላል ሞዴሎች ምናልባት ከልክ በላይ አሞቅተው ሊሆኑ እንደሚችሉ ያሳያል፣ እና photosynthetic ሕይወት አንድ የታወቀ የካርቦን ገደብ ከሚጠቁመው በላይ የመቆያ መንገዶች ሊኖሩት እንደሚችሉ ያሳያል። ተጨማሪ የአንድ ቢሊዮን ዓመት ክፍል እያንዳንዱ ከግምቶች ሰንሰለት ጋር የሚመጣ መሆኑንም ያሳያል።

ቅጠልን የምትመግበው ፀሐይ ቀስ በቀስ እየተለወጠች ነው። ምድር ለተጨማሪ 1.35፣ 1.87 ወይም ሌላ ቁጥር ቢሊዮን ዓመታት አረንጓዴ ሆና ትቆያለች ወይስ አትቆይም የሚለው በዓለቶች፣ ውሃ፣ ከባቢ አየርና ሕይወት በጋራ እንዴት እንደሚመልሱ ይመረኮዛል። ታማኙ ውጤት ቀን አይደለም። የዚያን ሚዛን ይበልጥ ሰፊ እይታ ነው።

# ንጹህ ማጠቃለያ

ሶስት-ልኬት የአየር ንብረት ጥናት ፀሐይ ቀስ በቀስ ይበልጥ ብሩህ ስትሆን የምድር vegetative — photosynthetic — biosphere እስከ መቼ ሊቆይ እንደሚችል ይጠይቃል። ተመራማሪዎቹ 29 የተለያዩ steady-ሁኔታ አየር ንብረቶችን አስልተው ሁለት ምሳሌያዊ መጨረሻ membersን በእነሱ በኩል አሳለፉ። በደካማ የዐለት መፈራረስ እና ካርቦን ዳይኦክሳይድ በ400 parts per ሚሊዮን ቋሚ ሲሆን፣ ለመሬት ተክሎች የተቀመጡ የሙቀት ገደቦች ከአሁን በኋላ በግምት 1.68 እና 1.87 ቢሊዮን ዓመት ላይ ይደርሳሉ። በጠንካራ የዐለት መፈራረስ እና የዓለም አማካይ ሙቀት በ288 kelvin፣ 15 degrees Celsius ገደማ፣ ቋሚ ሲሆን፣ ለphotosynthesis የተቀመጡ የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ገደቦች በግምት 1.35፣ 1.64 እና፣ ጊዜያዊ ገደብ በመጠቀም፣ 1.84 ቢሊዮን ዓመት ላይ ይደርሳሉ። ብዙ ጊዜ የሚጠቀሰው 1.86 ቢሊዮን ዓመት የሁለቱ ተስፋ ሰጪ ከፍተኛ ጫፎች የተጠጋጋ አማካይ ብቻ ነው። እነዚህ በscenario ላይ የሚመረኮዙ የሞዴል ክልሎች ናቸው፣ ምድር፣ ሰው ልጆች ወይም ሁሉም ሕይወት የሚያበቃበት ቀን አይደሉም። ሞዴሉ በቅድሚያ የተቀመጡ መንገዶችን፣ የዛሬውን ጂኦግራፊ፣ slab ocean እና ግልጽ soil–vegetation ወይም climate–የዐለት መፈራረስ coupling የሌለውን ቅንብር ይጠቀማል፣ ረጅሙ ግምቶችም እርግጠኛ ወዳልሆኑ greenhouse እና የውቅያኖስ መጥፋት ገደቦች ይቀርባሉ።

# ያለ ማጋነን ፍተሻ

**ጥናቱ የሚያሳየው፡-** በዚህ ExoCAM ቅንብር፣ ሶስት-ልኬት አየር ንብረቶች የፀሐይ ብርሃን ሲጨምርና ካርቦን ዳይኦክሳይድ ቋሚ ሲሆን በንጽጽር ከተጠቀሙት ቀላል ሞዴሎች በአጠቃላይ ያነሰ ይሞቃሉ። በሁለት በቅድሚያ በተቀመጡ የዐለት መፈራረስ መጨረሻ members እና በተለያዩ የተቀመጡ ባዮሎጂያዊ ገደቦች፣ የvegetative biosphere ገደቦች ከአሁን በኋላ በግምት 1.35 እስከ 1.87 ቢሊዮን ዓመት መካከል ይወድቃሉ።

**ሊሆን የሚችል ነገር ግን ያልተረጋገጠው፡-** አንዳንድ CAM ተክሎች ወይም የተሟሟ bicarbonate የሚጠቀሙ የውሃ ተክሎች በአንድ part per ሚሊዮን የከባቢ አየር ካርቦን ዳይኦክሳይድ አካባቢ photosynthesisን ሊቀጥሉ እንደሚችሉ፤ adaptation ወይም ቴክኖሎጂ photosynthetic ሕይወትን የበለጠ ሊያራዝም እንደሚችል፤ እና እውነተኛው የclimate-የዐለት መፈራረስ መንገድ በሁለቱ የሞዴል መጨረሻ members መካከል እንደሚቆይ።

**የማያሳየው፡-** ለሁሉም ተክሎች፣ ለሁሉም ሕይወት፣ ለሰው ሥልጣኔ፣ ለምድር ውቅያኖሶች ወይም ለፕላኔቷ መጨረሻ ቋሚ ቀን፤ ለቀጣዮቹ ሁለት ቢሊዮን ዓመታት አንድ ቀጥተኛ ማስመሰያ፤ ወይም ዛሬ በሰው የሚነሳውን የአየር ንብረት ለውጥ ለመቀነስ ምንም ምክንያት።

**ዋና ገደቦች፡-** ከአንድ የአየር-ንብረት-ሞዴል ቤተሰብ 29 steady-ሁኔታ ጉዳዮች፤ dynamically coupled ካልሆኑ በቅድሚያ የተቀመጡ የዐለት መፈራረስ መንገዶች፤ የዛሬው ጂኦግራፊ፤ slab ocean፤ ቋሚ methane፤ zero obliquity እና eccentricity፤ ግልጽ soils፣ vegetation ወይም biosphere feedback አለመኖር፤ እርግጠኛ ያልሆኑ የሙቀትና የካርቦን-ዳይኦክሳይድ ገደቦች፤ እና moist እና runaway greenhouse ሁኔታዎች አጠገብ ሰፊ የሞዴል አለመጣጣም።

**አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል?** ጥናቱ ሊሆን የሚችለውን የሞዴል ክልል እንደሚያሰፋ እና የሚቆጣጠሩትን ግምቶች እንደሚለይ ከፍተኛ እምነት። በዚህ ሞዴል ውስጥ የቁጥር ክልሉ ጠቃሚ ድንበር መሆኑ ላይ መካከለኛ እምነት። በማንኛውም ትክክለኛ ቀን ላይ ዝቅተኛ እምነት፣ ምክንያቱም በጣም ሩቅ ያሉት ጫፎች በፈቃድ በተመረጡ ጽንፈኛ የአየር ንብረት መንገዶችና እርግጠኛ ባልሆነ ባዮሎጂ ላይ ይመረኮዛሉ።

# ምንጮች

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870