

### FATTORI NATURALI E ANTROPICI DEL RISCALDAMENTO GLOBALE

Salvatore Mazzullo

SCI task force ESPERA:

Etica e Scienza per l'Ambiente

[turi.mazzullo@libero.it](mailto:turi.mazzullo@libero.it)



*Viene presentata una ipotesi di ricostruzione della temperatura media della Terra per mezzo di un modello matematico paleo-climatico. Il calcolo della temperatura si basa su un'equazione di bilancio dell'energia solare, mutuata dalla scala paleo-climatica di Milankovitch, che tiene conto dell'energia solare incidente, dell'inclinazione dell'asse terrestre e dell'eccentricità dell'orbita. Il profilo moderno di temperatura della Terra (1880-2015) viene calcolato come perturbazione di tre parametri del modello che descrivono gli effetti, rispettivamente, della variazione secolare della costante solare, del vapor d'acqua atmosferico assieme ai gas serra e degli aerosol atmosferici*



#### Natural and Anthropogenic Factors of Global Warming

This paper proposes a reconstruction of the Earth's average temperature by means of a mathematical paleo-climatic model. The temperature calculation is based on an equation of balance of solar energy, borrowed from the paleo-climatic Milankovitch-scale, which takes into account the incident solar energy and the inclination and eccentricity of the Earth's orbit. The modern profile of Earth's temperature (1880-2015) is calculated as a perturbation of three model parameters which describe the effects, respectively, of the secular variation of the solar constant, water vapor along with greenhouse gases and atmospheric aerosols.

#### Introduzione

L'immagine di copertina rimanda allo stupore dell'uomo medievale, che affacciandosi attraverso la sfera celeste, scopre l'armonia dell'universo che circonda la Terra. Con uno stupore non dissimile, in questo articolo viene presentata una ricerca che descrive il riscaldamento globale del pianeta come effetto di tre fattori potenzialmente responsabili del fenomeno. Lo strumento utilizzato per questa indagine è un modello matematico paleo-climatico, di cui, e questa è la caratteristica distintiva della ricerca, è stata costruita la soluzione analitica. Recentemente, il noto climatologo J.E. Hansen [1] ha sottolineato che a tutt'oggi manca una soddisfacente valutazione degli effetti paleo-climatici dei parametri orbitali della Terra, quali, inclinazione dell'asse terrestre, eccentricità dell'orbita e cicli di precessione. La presente investigazione si colloca in questo ambito, cercando di fornire una risposta di tipo analitico al quesito di Hansen. Il dibattito sul riscaldamento globale del pianeta Terra ha risvolti scientifici di particolare difficoltà di indagine. D'altra parte, l'argomento fa ormai parte dell'immaginario collettivo a un punto tale che, si può dire, non esista ambito culturale, sociale o politico che non abbia prodotto studi, promosso dibattiti e acceso polemiche sulla questione, per certi versi ideologizzandola e condizionando, in tal modo, anche l'ambiente scientifico. Forse, sino ad ora, è mancato, al vasto pubblico interessato all'argomento, un punto di vista più pacato quale è quello che può offrire la Matematica, con le caratteristiche che le sono proprie: il rigore logico-deduttivo delle formulazioni analitiche e la potenza del calcolo numerico, presentate in maniera piana e accessibile a un pubblico colto. Vogliamo allora offrire, in questo lavoro, una prospettiva che si basi su ipotesi chiare e condivisibili, dalle quali dedurre, con un opportuno modello matematico paleo-climatico della Terra, le conseguenze calcolabili sulla temperatura media annuale della Terra. Le ipotesi saranno i punti di partenza, accettati i quali poi tutto procederà speditamente, con logica deduttiva. Un modello matematico è una creazione intellettuale e, come tale, è il risultato di due azioni consapevoli: scelta e interpretazione. In questo caso, scelta e interpretazione dei fenomeni che si ritiene possano descrivere, senza esaurirla, la complessa tematica del riscaldamento globale del nostro pianeta. Un modello non pretende di essere vero ma di descrivere

adeguatamente la realtà, almeno sino all'emergere di fatti sperimentali che non ne contraddicano le previsioni. In una realtà complessa e di difficile interpretazione, un modello costituisce una guida per esaminare i fatti e identificarne il nocciolo deterministico, separandolo dall'aleatorietà delle variazioni statistiche che ne disturbano la lettura razionale.

Come anticipato all'inizio, questo lavoro costituisce un contributo originale di carattere scientifico, che valuta quantitativamente gli effetti di tre fattori potenzialmente responsabili delle variazioni della temperatura media della Terra: la variazione secolare della costante solare; la variazione di concentrazione dei gas serra e degli aerosol atmosferici. Da subito, si pone la necessità di precisare l'unità di tempo e l'unità di luogo in cui si colloca la corretta lettura dei risultati del modello. Il carattere paleo-climatico del modello ci fornisce la risposta relativa all'unità di tempo: poiché un ciclo di 360 gradi di precessione si completa in circa 26000 anni, l'unità di tempo sarà almeno 72 anni, cioè il tempo necessario a percorrere l'angolo di precessione di un grado. Ciò significa che il violento dettaglio statistico di variazione climatica annuale viene perso, a vantaggio della messa in luce di un valore medio di comportamento secolare che può ben essere descritto su basi deterministiche. Per quanto attiene all'unità di spazio, per la costruzione del modello ci poniamo dal punto di vista astronomico di un osservatore lontano, che vede la Terra come una piccola sfera, sostanzialmente azzurra per la prevalenza dell'acqua che la ricopre, circondata da una tenue e sottile atmosfera gassosa. La Terra viene, pertanto, vista come un punto materiale le cui proprietà chimico-fisiche medie si riferiscono alla latitudine di circa 33° Nord, per l'emisfero boreale.

### Elementi costitutivi del modello paleo-climatico

L'obiettivo del modello è la ricostruzione della serie storica dei dati di temperatura media della Terra di Fig. 1, per il periodo 1880-2015, resa pubblica e periodicamente aggiornata dall'ente americano NOAA/NASA e qui riportata senza alcuna rielaborazione. L'anomalia di temperatura dell'emisfero boreale si riferisce alla temperatura media annuale di 14,0 °C che compete al periodo 1951-1980. Sommando l'anomalia al valore di riferimento si ottiene la temperatura media effettiva della Terra.

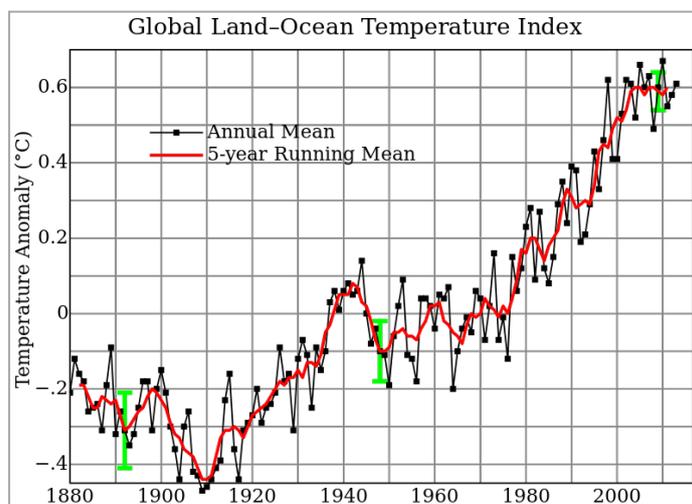


Fig. 1

*Anomalia della temperatura globale negli ultimi 100 anni  
(fonte: [http://data.giss.nasa.gov/qistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/qistemp/graphs_v3/))*

Il modello di calcolo della temperatura si basa su un'equazione di bilancio dell'energia solare, mutuata dalla scala paleo-climatica di Milankovitch, che tiene conto dell'energia solare incidente, dell'inclinazione dell'asse terrestre e dell'eccentricità dell'orbita. La soluzione analitica del modello paleo-climatico [2], fornisce la temperatura media della Terra e si scrive come prodotto di un insieme di fattori accidentali, ( $F_0, U, f_2$ ) e un insieme di fattori strettamente astronomici, ( $\alpha, \beta, P$ ):

$$T = T_0 + \underbrace{\frac{F_0 f_2}{2a_0 U}}_{\text{fattori accidentali}} \cdot \underbrace{\{1 + \Phi(\alpha, \beta, P)\}}_{\text{fattori astronomici}} \quad (1)$$

Nell'intervallo di anni (1880-2015), il fattore astronomico  $\phi(\alpha,\beta,P)$  è praticamente costante al variare dell'angolo di rivoluzione  $\alpha$  e dell'angolo di precessione  $\beta$ , di conseguenza, la ricostruzione del profilo moderno di temperatura della Terra (1880-2015) è stata ottenuta come perturbazione dei tre parametri del modello: ( $F_0, U, f_2$ ), rispettivamente, la costante solare, la trasmittanza termica dell'atmosfera e il fattore di attenuazione della luce solare.

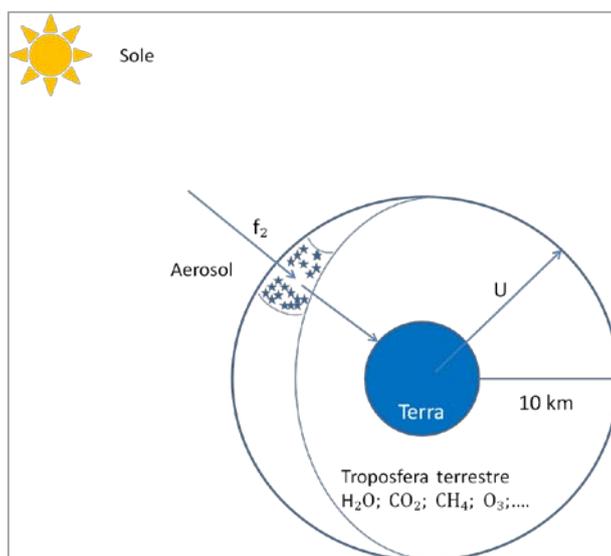


Fig. 2

Modello geometrico del sistema Terra/Atmosfera

Facendo riferimento allo schema di Fig. 2, i primi due parametri si riferiscono alla radiazione solare in ingresso nell'atmosfera: la costante solare rappresenta il flusso totale entrante alla distanza media orbitale della Terra dal Sole, mentre il parametro  $f_2$  racchiude cumulativamente in sé l'effetto combinato della variazione di spessore e composizione dei gas serra e degli aerosol di alta quota. La trasmittanza  $U$  si riferisce, invece, alla radiazione in uscita, riflessa dalla Terra verso l'esterno e descrive l'effetto serra. La temperatura media della Terra è direttamente proporzionale alla variazione della costante solare  $F_0$  e del fattore di attenuazione  $f_2$  mentre è inversamente proporzionale alla variazione della trasmittanza  $U$ . Per ognuno di questi tre parametri diamo, di seguito, una sintetica descrizione e valutazione degli effetti.

### **Perturbazione della costante solare**

La costante solare rappresenta il flusso totale di calore del Sole alla distanza media orbitale della Terra dal Sole, cioè a una unità astronomica. All'inizio del XX secolo lo Smithsonian Astrophysical Observatory (APO) promosse un vasto programma di misurazioni dal 1902 sino al 1962 [3] per stabilire se la costante solare fosse realmente costante oppure variabile nel tempo, cioè, se la denominazione "costante solare" fosse un termine improprio. Circa 60 anni di misurazioni, da vari punti della superficie terrestre, non sono stati sufficienti per dirimere la questione. Le conclusioni del programma APO furono che la costante solare sembrava essere effettivamente costante, con una variabilità inferiore allo 0,1% limitatamente al periodo 1923-1954, cioè sulla scala di alcune decadi, senza peraltro escludere una eventuale variabilità su scala secolare. Si nota, nel rapporto conclusivo, una certa riluttanza a dichiarare quale fosse questo valore costante: esso infatti non appare nel sommario, ma nel corpo del testo, dal quale si ricava che, riferito al 1923, tale valore è di circa  $1358,35 \text{ W/m}^2$ . La controversia sulla variabilità della costante solare non si è ancora placata. Fra i sostenitori contemporanei della scarsa variabilità, oltre agli scienziati appartenenti al celebre IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change and Control), menzioniamo in particolare, J. Lean e coll. [4, 5], che hanno pubblicato una ricostruzione secolare della costante solare, nella quale hanno optato per una sua sostanziale invariabilità, conformemente alla conclusione APO ma estendendola a tutto il periodo di tempo esaminato, cioè dal 1713 al 1996. Fra i sostenitori della variabilità della costante solare, ci limitiamo a una recente ricerca dell'autore [6] dove viene sviluppata una nuova ipotesi di ricostruzione a favore della sua variabilità *su scala secolare*. Secondo questa nuova ricostruzione, il suo valore massimo moderno è di  $(1366 \pm 1) \text{ W/m}^2$  mentre il valore minimo, assunto in corrispondenza del minimo di

Maunder (1645-1715) è di  $1349 \text{ W/m}^2$ . Questa nuova ricostruzione, riportata in Fig. 3, è in grado di riconciliare i dati stazionari APO (1923-1954) sino al 1935 con i dati satellitari (1975-2005).

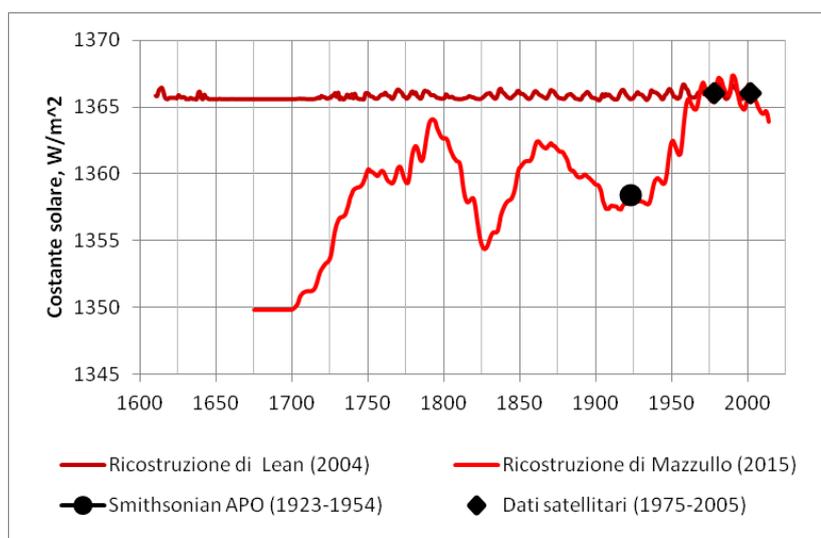


Fig. 3

*Due alternative ipotesi di ricostruzione della costante solare*

Possiamo riassumere schematicamente i risultati di questa sezione come segue. Il punto di vista di J. Lean è che, Fig. 3, la costante solare è praticamente costante su scala secolare e il suo valor medio coincide col valore satellitare attuale di  $(1366 \pm 1) \text{ W/m}^2$ . Le fluttuazioni del valor medio seguono esattamente l'andamento delle macchie solari. Il valore della costante determinato da APO non viene preso in considerazione.

Secondo il punto di vista alternativo [6] adottato in questo lavoro, la costante solare varia, invece, su scala secolare. L'andamento della variazione secolare coincide con quello della media mobile, su un periodo di 33 anni, delle macchie solari. La ricostruzione effettuata su questa base soddisfa sia il dato satellitare oscillante di  $(1366 \pm 1) \text{ W/m}^2$  per gli anni (1975-2005) che il dato stazionario a terra dello Smithsonian APO (1923-1954) di  $1358,35 \text{ W/m}^2$  che si mantiene praticamente costante dal 1905 sino al 1935, coerentemente con le conclusioni APO [3]. Notiamo che nel periodo di anni (1880-2015) la costante solare  $F_0$  presenta un minimo assoluto nel 1907 pari a  $1357,38 \text{ W/m}^2$  e un massimo assoluto nel 1975, pari a  $1366 \text{ W/m}^2$ . La variazione percentuale fra i due punti è poco più di 0,6%, coerentemente con l'assunto che stiamo operando su una perturbazione del parametro. Il tasso di variazione della temperatura rispetto a  $F_0$  risulta pari a  $\partial T / \partial F_0 = (T - T_0) / F_0 \cong 0,1 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ . La temperatura è quindi molto sensibile, rispetto a piccole variazioni della costante solare, dell'ordine di grandezza di appena  $1 \text{ W/m}^2$ , cioè della fluttuazione della costante solare in un ciclo di undici anni delle macchie solari. L'effetto della

variazione secolare della costante solare sulla temperatura della Terra si determina, agevolmente, calcolando la temperatura media annuale delle quattro stagioni per mezzo del modello paleo-climatico e confrontandolo col valore osservato, Fig. 4.

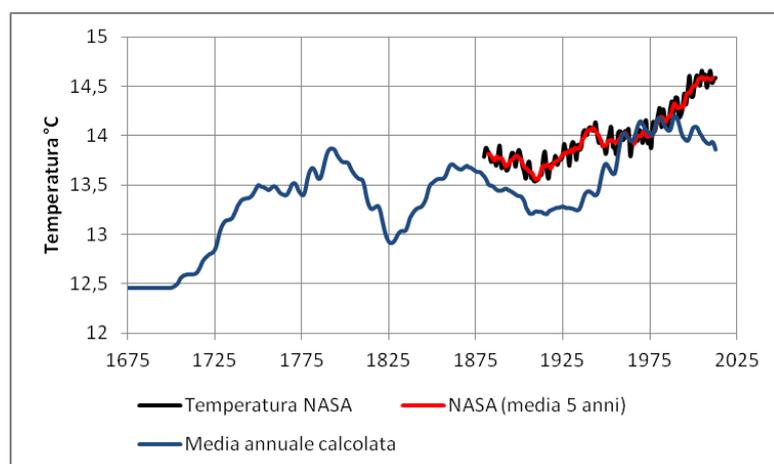


Fig. 4

*Confronto fra la temperatura osservata e la temperatura calcolata come effetto della sola variazione secolare della costante solare*

Si noti che Il modello paleo-climatico è stato reso coerente con il dato sperimentale di temperatura media annuale di  $14,0 \text{ } ^\circ\text{C}$  che compete al periodo 1951-1980. La più macroscopica osservazione riguarda l'andamento generale della temperatura calcolata: essa è mediamente in aumento dal 1600 a oggi, ovvero, è in corso un fenomeno di riscaldamento medio globale ad opera dell'aumento medio secolare della costante solare. Secondo

questa ricostruzione, dal minimo assoluto, in corrispondenza del minimo di Maunder (1645-1715) al massimo contemporaneo (1975-2005) l'aumento medio di temperatura della Terra è stato di circa +1,5°C.

Osserviamo inoltre che la curva sperimentale e la curva teorica presentano entrambe un minimo relativo in corrispondenza dell'anno 1910; questo fatto costituisce un punto a favore del modello paleo-climatico e delle sue capacità predittive.

Se la variazione di temperatura della Terra fosse dovuta solamente alla variazione secolare della costante solare, allora, la temperatura osservata coinciderebbe con la temperatura calcolata. Dalla Fig. 4 si osserva chiaramente che così non è. Più precisamente, si nota che la temperatura teorica è costantemente inferiore o uguale alla temperatura media osservata della Terra. Si può subito concludere che la variazione secolare della costante solare non è sufficiente a descrivere compiutamente i dati sperimentali di temperatura, ma è necessario invocare la presenza di altri fenomeni per completare la descrizione dei valori sperimentali osservati.

### ***Perturbazione della trasmittanza termica***

L'effetto serra è dovuto, principalmente, al vapor d'acqua atmosferico H<sub>2</sub>O e, in via accessoria, ai gas serra CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + O<sub>3</sub> +... Il modello paleo-climatico descrive l'effetto di questi componenti dell'atmosfera attraverso un parametro fisico intensivo: la trasmittanza termica U, che descrive il flusso di calore in uscita, attraverso l'atmosfera, e, in questo senso, descrive l'effetto serra. La trasmittanza è definita esplicitamente come prodotto di cinque fattori, tutti fisicamente ben definiti, (vedi Appendice) e fra questi, in particolare, la massa specifica  $\rho$  dell'atmosfera secca, comprendente i gas serra e il suo contenuto medio di acqua h. Il vapor d'acqua è un componente molto variabile dell'atmosfera: il suo contenuto varia da un minimo di 0,5÷2,0% sino a un massimo di 4÷5% legato ai naturali processi climatici stagionali della Terra. Oggi possediamo dati storici di concentrazione di background dell'anidride carbonica e del metano, che possiamo, convenientemente, esaminare alla luce del modello paleo climatico. È stato lo scienziato americano C.D. Keeling (+2005) che attraverso la sistematica registrazione della concentrazione in atmosfera di CO<sub>2</sub> all'osservatorio di Mauna Loa, a partire dal 1958, ha, per primo, allertato il mondo scientifico circa la possibilità che la variazione di concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica possa fornire un contributo antropogenico all'effetto serra e al riscaldamento globale.

I dati di CO<sub>2</sub> della Fig. 5 hanno diversa origine [7, 8] e sono stati oggetto di parecchie controversie, non rilevanti, tuttavia, ai fini dell'analisi che segue: essi, infatti, soddisfano al requisito di congruenza con l'unità di spazio definita nell'introduzione, essendo dati medi globali e tanto basta per l'analisi che segue. Il legame esistente fra la variazione di concentrazione dei gas serra e la variazione di concentrazione del vapor d'acqua si ottiene mediante il principio di conservazione della massa media atmosferica: di conseguenza, la concentrazione di background dell'acqua varia con segno opposto rispetto alla variazione di concentrazione di background dei gas serra.

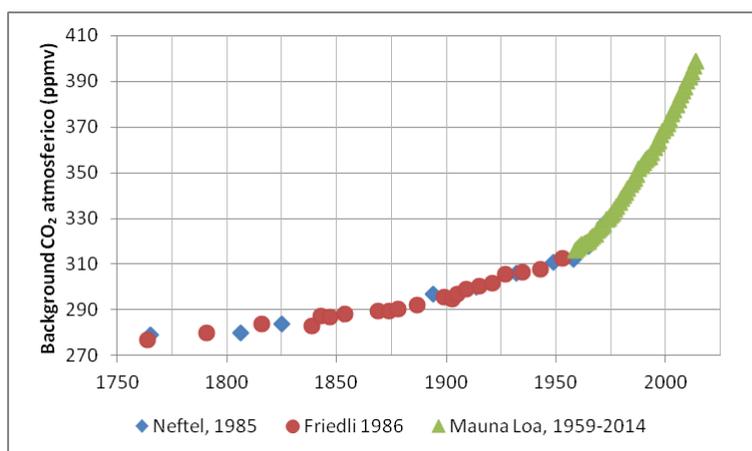


Fig. 5

*Background di concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica (1750-1970) ottenuta da carote di ghiaccio estratte nella stazione antartica di Siple [7] e misure dirette (1959-2014) all'osservatorio di Mauna Loa [8]*

Dalla definizione della trasmittanza si deduce, immediatamente, che all'aumentare della concentrazione dei soli gas serra, la trasmittanza U diminuisce e attraverso la soluzione analitica del modello paleo-climatico si conclude che la temperatura T aumenta, conformemente alle attese. Tuttavia, la contemporanea variazione della costante

solare e dell'effetto serra non è sufficiente a riprodurre l'andamento osservato della temperatura media della Terra, Fig. 6, anzi, permane e si amplia la distanza fra temperatura calcolata e temperatura osservata. D'altra parte, ciò era prevedibile, a priori, poiché l'andamento della concentrazione di CO<sub>2</sub> nel tempo è monotona crescente, Fig. 5, mentre la temperatura osservata della Terra, nel periodo 1880-2015 presenta minimi e massimi relativi, Fig. 1. Per colmare la distanza fra le due temperature è necessario invocare un fenomeno sino ad ora nascosto. Data la forma della soluzione analitica, tale fenomeno è descritto dal fattore  $f_2$  di attenuazione della luce solare.

Il tasso di variazione della temperatura rispetto all'anidride carbonica, è  $\partial T/\partial \text{CO}_2 = (T-T_0)/U \cdot \partial U/\partial \text{CO}_2 \cong 0,47 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/ppm}$  ovvero 0,47 °C per ogni 100 ppm di variazione di concentrazione della CO<sub>2</sub>. Nel periodo di tempo (1880-2015) è proprio questo l'ordine di grandezza di variazione della concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica.

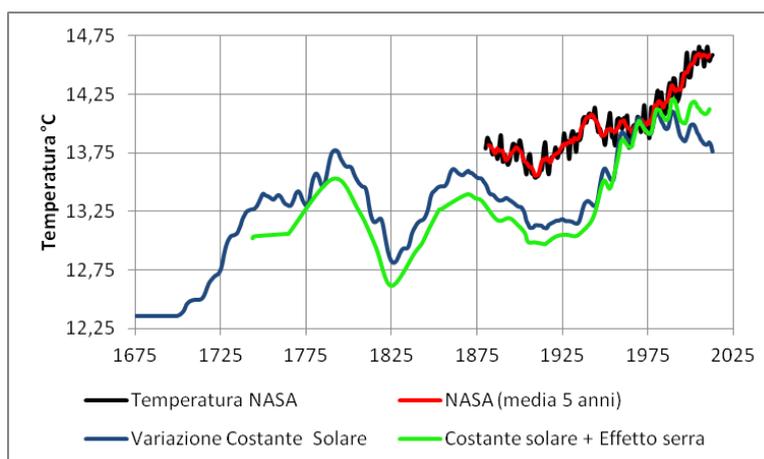


Fig. 6

*Confronto fra la temperatura osservata e la temperatura calcolata  
come effetto della simultanea variazione secolare  
della costante solare e della trasmittanza atmosferica*

### **Perturbazione del fattore di attenuazione**

Nell'attraversamento dell'atmosfera la radiazione solare incidente subisce una complessa serie di trasformazioni e attenuazioni. La radiazione che giunge al suolo non è più uguale a quella in arrivo al bordo esterno dell'atmosfera, né per intensità né per natura. Il parametro  $f_2$  racchiude cumulativamente in sé l'effetto combinato della variazione di spessore e composizione dei gas serra, del particolato sospeso e degli aerosol. Ricordiamo che con il termine aerosol si indicano quelle sostanze, acqua esclusa, presenti in atmosfera in forma liquida o solida, di dimensioni superiori a quelle molecolari, aventi una velocità terminale di caduta trascurabile. Il valore di questo parametro è stato stimato pari a  $f_2 \cong 0,633$  nel 1975 [9]. Per quanto concerne la forma esplicita assunta dal fattore di attenuazione  $f_2$  facciamo l'ipotesi che sia descrivibile da una relazione lineare decrescente della massa  $m$  atmosferica. Questa ipotesi è coerente con le evidenze sperimentali: all'aumentare dell'umidità atmosferica il fattore di attenuazione della luce solare diminuisce. In aggiunta, però, il fattore è influenzato anche dagli aerosol presenti nell'atmosfera che agiscono nella stessa direzione della massa  $m$  dei gas atmosferici. Di conseguenza, se  $\sigma$  è la sezione offerta dagli aerosol alla luce incidente, allora  $(1-\sigma)$  è la sezione libera attraversata dalla luce e l'equazione che descrive  $f_2$  si può fattorizzare come segue:

$$f_2 = (1 - \sigma) - \gamma \cdot m \cong \underbrace{[1 - \gamma \cdot m]}_{\text{gas serra}} \cdot \underbrace{[1 - \sigma]}_{\text{aerosol}} \quad (2)$$

Se, come già ipotizzato, il fattore dei gas serra  $(1-\gamma \cdot m)$  è costante, allora la funzione  $f_2$  ha, essenzialmente, l'andamento della sezione libera  $(1-\sigma)$  incontrata dalla luce solare nell'attraversamento dell'atmosfera. Non facciamo altre ipotesi su quale sia l'andamento nel tempo della funzione  $f_2$  ma lo determiniamo come funzione residua fra la temperatura osservata e la temperatura calcolata, dopo avere introdotto nella soluzione analitica sia la variazione della costante solare che la variazione della trasmittanza. L'andamento temporale della funzione  $f_2$  calcolato in tal modo è rappresentato dalla Fig. 7. Essa presenta un massimo, ( $f_2=0,6375$ ) e un minimo, ( $f_2=0,6325$ ). La variazione percentuale fra i due punti è poco meno dello 0,8%, coerentemente con l'assunto che

stiamo operando su una perturbazione del parametro  $f_2$ . Il tasso medio di variazione della temperatura è  $\partial T/\partial f_2 = (T-T_0)/f_2 \cong 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/ppm}$  ovvero  $0,21 \text{ }^\circ\text{C}$  per ogni 1000 ppm di variazione del fattore di attenuazione  $f_2$ .

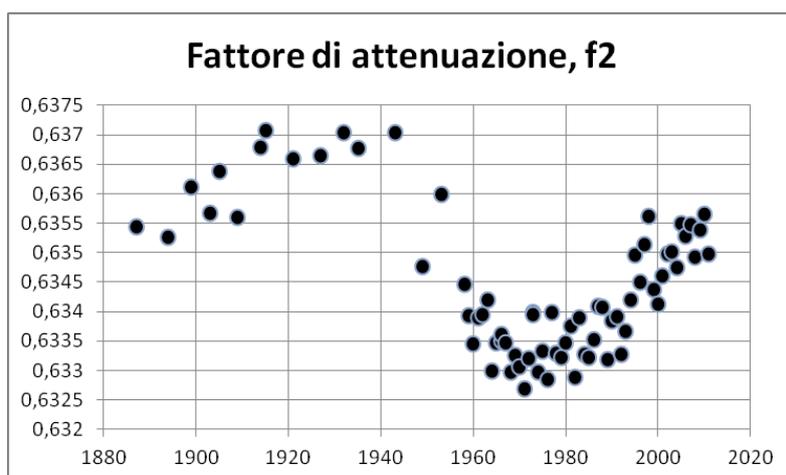


Fig. 7

*Ricostruzione del fattore di attenuazione  $f_2$  della luce solare*

Il diagramma di Fig. 7 è straordinario: ci dice che sin da prima della metà del 1800 il pianeta Terra è stato, verosimilmente, interessato dal fenomeno delle polveri sottili e degli aerosol, con un significativo e regolare aumento del fattore di attenuazione della luce solare, cioè con un aumento della trasparenza atmosferica. Questo fenomeno è continuato sino all'inizio della seconda guerra mondiale. Dal 1940 al 1980 è avvenuta una repentina caduta del fattore di attenuazione con un minimo raggiunto negli anni 1970-1980. Dopo (1980-2014) il fattore ha ricominciato a crescere. Poiché si è ipotizzato che il fattore di attenuazione dovuto ai gas serra ( $1-\gamma \cdot m$ ) è costante, allora la variazione dell'attenuazione è dovuta, essenzialmente, alla variazione della sezione libera ( $1-\sigma$ ) attraversata dalla luce solare, il cui andamento temporale calcolato, è rappresentato dalla Fig. 7. Possiamo approfondire meglio il significato della sezione libera ( $1-\sigma$ ) se ci riferiamo alla sezione d'urto  $\sigma$ : è più intuitivo, infatti, il carattere di ostacolo al passaggio della luce provocato da particelle solide e aerosol di diametro tale da interferire con la lunghezza d'onda della luce incidente (come è il caso dei nuclei di Aitken del diametro medio inferiore a  $0,4 \mu\text{m}$ ). Come si può notare dalla Fig. 8, nel periodo 1880-1945 la sezione d'urto è diminuita, dal valore iniziale di 0,4% del 1875 al valore finale di 0,1% del 1940. Quindi, ha ripreso a crescere nel periodo bellico (1940-1945) e post bellico sino alla prima crisi petrolifera (1975), raggiungendo il valore massimo relativo di 0,7%. Da quel momento in avanti è ricominciato un nuovo declino della sezione d'urto che oggi si attesta sul valore medio di 0,3%.

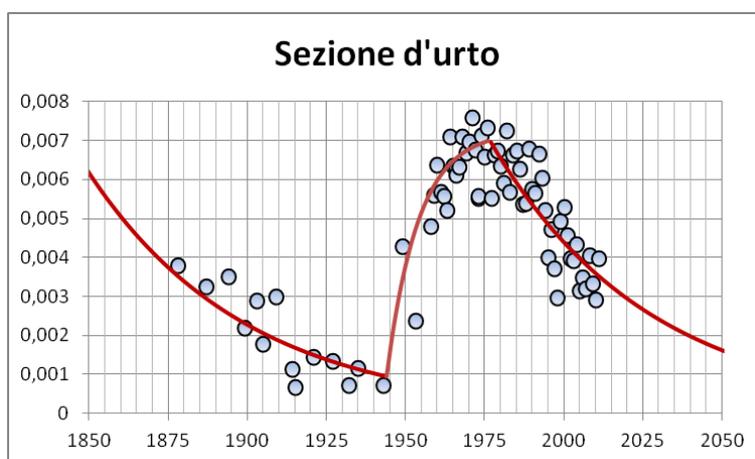


Fig. 8

*Sezione d'urto, offerta dagli aerosol atmosferici alla luce solare (la linea continua è l'approssimazione analitica dei valori puntuali)*

È la prima volta, in assoluto, che si possiedono dati di questo genere. In particolare, l'approssimazione analitica dei dati permette di ricavare la costante di tempo del fenomeno. I due periodi nei quali la sezione d'urto diminuisce possono essere interpretati come la fase di sedimentazione, mentre il periodo in cui la sezione d'urto aumenta rappresenta la fase di immissione. La costante di tempo di sedimentazione è  $\tau_0 \cong 50$  anni, mentre quella di immissione  $\tau_1 \cong 10$  anni. Un tempo di sedimentazione così lungo implica che gli aerosol che causano l'effetto di attenuazione della luce solare, devono trovarsi ad alta quota, in modo da non essere soggetti alla variabilità degli eventi meteorologici. È presumibile quindi che queste sostanze siano situate oltre la tropopausa (quota media di 10 km) o più generalmente, nella stratosfera.

### Ricostruzione del profilo di temperatura della Terra

L'effetto combinato della simultanea variazione secolare della costante solare  $F_0$  della trasmittanza atmosferica  $U$  e del fattore di attenuazione  $f_2$  è tale da riprodurre completamente i dati osservati della temperatura media annuale della Terra, come si può notare dalla Fig. 9.

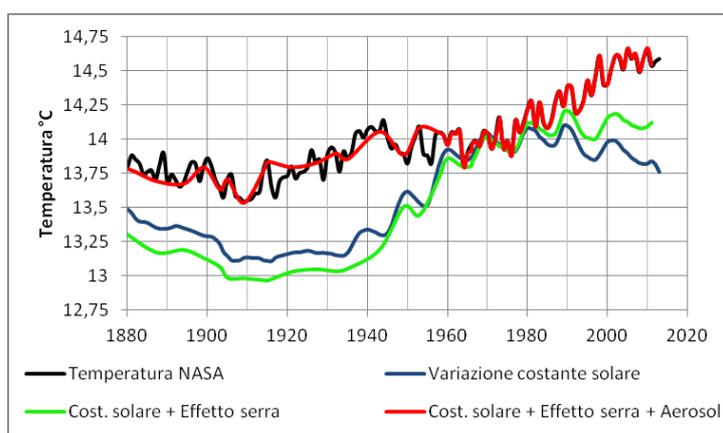


Fig. 9

*Confronto fra la temperatura osservata e la temperatura calcolata come effetto della simultanea variazione secolare della costante solare, della trasmittanza atmosferica e del fattore di attenuazione*

Possiamo analizzare lo stesso diagramma in termini di anomalia della temperatura, per esempio, rispetto all'anno di riferimento 1975. La Fig. 10 mostra la ricostruzione dell'anomalia di temperatura della Terra nel 2011 con il contributo dei tre fattori. La variazione della costante solare produce un contributo negativo di  $-0,13$  °C mentre l'effetto serra contribuisce positivamente con  $+0,29$  °C e l'effetto aerosol con  $+0,42$  °C per una variazione positiva totale di  $+0,58$  °C dell'anomalia.

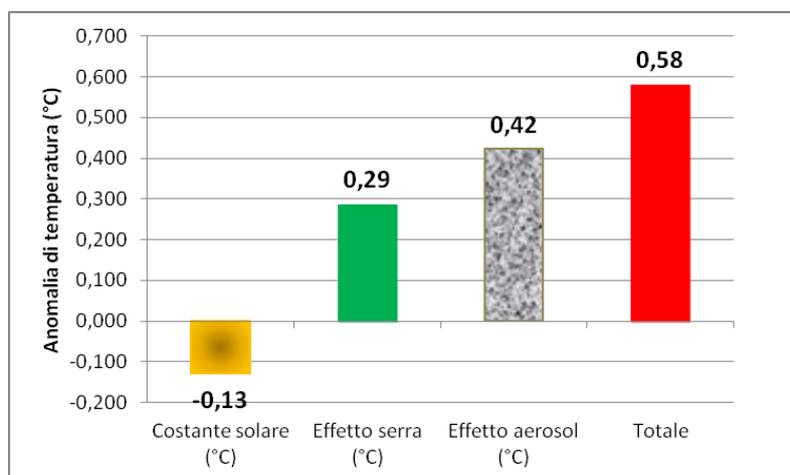


Fig. 10

*Bilancio dell'anomalia di temperatura della Terra nel 2011 come effetto della variazione della costante solare, della trasmittanza (effetto serra) e dall'attenuazione atmosferica (effetto aerosol)*

### Conclusioni

L'obiettivo di questa ricerca è la ricostruzione della serie storica dei dati di temperatura media della Terra di Fig. 1, per il periodo 1880-2015. La ricostruzione è stata ottenuta mediante il calcolo della soluzione analitica di un modello paleo-climatico [2] come perturbazione di tre parametri ( $F_0$ ,  $U$ ,  $f_2$ ) che descrivono rispettivamente, la costante solare, la trasmittanza termica dell'atmosfera (effetto serra) e il fattore di attenuazione della luce solare (effetto aerosol nell'atmosfera).

Coerentemente con l'unità di tempo, precisata nell'introduzione, anche il dato di temperatura osservata della Terra deve essere preso in considerazione attraverso una media, almeno trentennale. Non ha senso fare ragionamenti sul dato annuale di temperatura. La grande variabilità del contenuto di acqua atmosferica, giustifica ulteriormente, a posteriori, la necessità di considerare i risultati del modello paleo-climatico come rappresentativi di una media sufficientemente lunga di anni e non come dato puntuale.

I risultati di questa investigazione sono una naturale conseguenza del fatto di possedere la soluzione analitica del modello paleo-climatico. Il modello incorpora molti fenomeni caratterizzati da scale di tempi che differiscono fra loro per diversi ordini di grandezza, da quelli strettamente paleo-climatici aventi la scala di migliaia di anni a quelli stagionali e annuali aventi la scala delle decine e centinaia di anni. Questo carattere multi-scala della temperatura della Terra è gestibile agevolmente attraverso la soluzione analitica.

La controversia riguardante la variabilità o meno della costante solare è un argomento dibattuto da oltre un secolo. In questo lavoro è stata accolta una nuova ipotesi a favore della sua variabilità *su scala secolare* [6] che possiamo formulare come segue: "La costante solare è proporzionale alla media mobile, su un periodo di 33 anni, dell'andamento temporale delle macchie solari". A supporto di questa ipotesi sono state date [6] delle giustificazioni *a priori* di carattere fenomenologico e delle giustificazioni *a posteriori* di tipo topologico (previsione del minimo del 1910), climatico (previsione della piccola glaciazione associata al minimo di Maunder) analitico/numerico (solo questa media, fra le tante possibili, possiede le caratteristiche idonee per la riconciliazione dei dati stazionari terrestri dello Smithsonian APO (1923-1954) e dei dati satellitari (1975-2005) oscillanti). Secondo questa nuova ipotesi di ricostruzione della costante solare, il suo valore massimo moderno è di  $(1366 \pm 1) \text{ W/m}^2$  mentre il valore minimo, assunto in corrispondenza del minimo di Maunder (1645-1715) è di  $1349 \text{ W/m}^2$ . Si stima, pertanto, che durante questi quattrocento anni di osservazioni delle macchie solari, a partire dal minimo di Maunder sino al massimo moderno, la variazione della costante solare sia stata di  $17 \text{ W/m}^2$  pari a +1,25%. L'effetto prevalente della variazione della costante solare, determinato per mezzo di un modello paleo-climatico è stato quello di provocare (Fig. 4) un riscaldamento medio del pianeta di circa  $+1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  in 400 anni ed è sufficiente per affermare che, su scala secolare, il clima è scandito, prevalentemente anche se non esclusivamente, dal volgere del ciclo delle macchie solari.

La controversia riguardante l'anidride carbonica è anch'essa un problema aperto. In questo lavoro è stata accolta l'ipotesi che l'effetto serra è dovuto principalmente al vapor d'acqua atmosferico  $\text{H}_2\text{O}$  e, in via accessoria, ai gas serra  $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{O}_3 + \dots$ . Il modello paleo-climatico descrive l'effetto di questi componenti dell'atmosfera attraverso un parametro fisico intensivo: la trasmittanza termica  $U$ . Esso rappresenta il flusso di calore in uscita, attraverso l'atmosfera, e, in questo senso, descrive l'effetto serra. Il legame esistente fra la variazione di concentrazione dei gas serra e la variazione di concentrazione del vapor d'acqua è stato ottenuto mediante il principio di conservazione della massa media atmosferica: di conseguenza, la concentrazione di background dell'acqua varia con segno opposto alla variazione di concentrazione di background dei gas serra. Dalla definizione della trasmittanza si deduce, immediatamente, che all'aumentare della concentrazione dei soli gas serra, la trasmittanza  $U$  diminuisce e attraverso la soluzione analitica del modello paleo-climatico si conclude che la temperatura  $T$  aumenta, conformemente alle attese. Tuttavia, la contemporanea variazione della costante solare e dell'effetto serra non è sufficiente a riprodurre l'andamento osservato della temperatura media della Terra, Fig. 6, anzi, permane e si amplia la distanza fra temperatura calcolata e temperatura osservata.

È necessario invocare l'effetto di un ulteriore fenomeno, riconducibile alla variazione di attenuazione della luce solare provocato dagli aerosol atmosferici per ottenere la riconciliazione dei dati osservati con i dati calcolati, come si evince dalla Fig. 9. Nasce spontanea la domanda di quale possa essere l'origine di queste sostanze dell'alta atmosfera. L'andamento nel tempo della sezione d'urto degli aerosol, di cui alla Fig. 8, suggerisce per il periodo di anni 1880-1940 una origine naturale. Infatti, il lungo tempo di sedimentazione di circa 50 anni, implica che gli aerosol che causano l'effetto di attenuazione della luce solare, devono trovarsi ad alta quota, in modo da non essere soggetti alla variabilità degli eventi meteorologici. L'esistenza di questi fenomeni da prima del 1840 depone a favore di una origine naturale degli aerosol stratosferici, verosimilmente generati dall'eruzione di

vulcani situati nella fascia equatoriale e spostati in quota dalla circolazione delle masse di aria provocate dalle celle di circolazione globale di Hadley-Ferrel. Le catastrofiche eruzioni del vulcano Tambora (5-15 aprile 2015), in Indonesia, furono tali che il 1816 venne ricordato come l'anno senza estate. I cieli offuscati vennero magistralmente dipinti dal pittore J.M. Turner nei suoi celebri tramonti. Le ricadute di composti solforati nei ghiacci della Groenlandia corrispondono per il 1816 all'eruzione del vulcano Tambora [10]. Una recente indagine sperimentale, effettuata mediante aerei di linea intercontinentali [11] ha evidenziato la presenza di aerosol alla quota di 9-11 km. In termini di composizione chimica degli aerosol, lo zolfo (S) è risultato l'elemento chimico più abbondante con una concentrazione di  $\gamma=16 \text{ ng/Nm}^3$ . Il secondo e il terzo elemento più abbondanti sono stati il potassio (K) e il ferro (Fe), con concentrazioni medie di circa 50 volte inferiori a quella dello zolfo. Gli autori di



questa ricerca, in considerazione della coincidenza con i gradienti in latitudine di concentrazioni di particolato di zolfo e con sorgenti di emissione a terra, suggeriscono che la combustione di combustibili fossili possa essere una fonte importante di aerosol nell'alta troposfera e nella stratosfera più bassa. Tuttavia, non sembra che si possa escludere del tutto la possibilità di un'origine extraterrestre di aerosol stratosferico [12].

Fig. 11  
Eruzione in fase pliniana del vulcano Calbuco (Cile)  
22-23 aprile 2015

La recente eruzione del vulcano Calbuco in Cile (23-24 aprile 2015) ha immesso in atmosfera non meno di 200 milioni di tonnellate di ceneri, con una colonna di fumo e ceneri che si innalzava per oltre 11 km, Fig. 11. L'immissione di materia è avvenuta alla quota della tropopausa e la massa totale immessa è tale da poter modificare la sezione d'urto attuale degli aerosol atmosferici. Fortunatamente il vulcano si trova a  $42^\circ$  di latitudine Sud e non in zona equatoriale, pertanto la circolazione anticiclonica della cella di Ferrel che compete a quella latitudine tende a spostare verso terra le ceneri, vanificando la formazione di aerosol stratosferici.

Invece, il successivo periodo 1940-1975-2015 è ragionevolmente attribuibile ad attività antropica e più specificamente all'iper-produzione di particolato dell'attività bellica della seconda guerra mondiale agli esperimenti nucleari in atmosfera degli anni Sessanta e alla frenetica attività industriale della successiva ricostruzione.

Il risultato di questa ricerca è sconcertante e per certi versi paradossale: L'aumento della concentrazione di background dell'anidride carbonica, non è sufficiente a descrivere il fenomeno di riscaldamento globale che stiamo osservando. La variazione di concentrazione degli aerosol presenti nell'atmosfera ha un effetto altrettanto rilevante di quello provocato dall'aumento di anidride carbonica. Verosimilmente l'accelerazione in aumento della temperatura osservata dal 1975 sino a oggi è paradossalmente dovuto al miglioramento della qualità dell'aria dell'alta atmosfera. In questo contesto di stupore non è inopportuno concludere anche, con una punta di ironia, con le parole di Primo Levi, al capitolo "Carbonio" del Sistema Periodico [13]: *... "L'anidride carbonica, cioè la forma aerea del carbonio di cui finora abbiamo parlato: questo gas che costituisce la materia prima della Vita, la scorta permanente a cui tutto ciò che cresce attinge, il destino ultimo di ogni carne, non è uno dei componenti principale dell'aria, bensì un rimasuglio ridicolo, "un'impurezza", trenta volte meno abbondante dell'argon di cui nessuno si accorge. L'aria ne contiene lo 0,03%: se l'Italia fosse l'aria, i soli italiani abilitati ad edificare la Vita sarebbero, ad esempio, i 15000 abitanti di Milazzo, in provincia di Messina. Questo, in scala umana, è un'acrobazia ironica, uno scherzo da giocoliere, una incomprensibile ostentazione di onnipotenza-prepotenza, poiché da questa sempre rinnovata impurezza dell'aria veniamo tutti noi"...*

### APPENDICE

#### Correlazione fra CO<sub>2</sub> e trasmittanza termica atmosferica

L'effetto serra è dovuto, principalmente, al vapor d'acqua atmosferico H<sub>2</sub>O e, in via accessoria, ai gas serra CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + O<sub>3</sub> +... Il modello paleo-climatico,[2], descrive l'effetto di questi componenti dell'atmosfera attraverso un parametro fisico intensivo: la trasmittanza termica U, definito esplicitamente come prodotto di cinque fattori, tutti fisicamente ben definiti:

$$U = \rho \cdot C_p \cdot h \cdot \omega \cdot P \quad A1$$

Da questa relazione si nota, in particolare, che la trasmittanza è direttamente proporzionale alla massa specifica per unità di superficie dell'atmosfera secca,  $\rho = m/(4\pi R^2)$  e al contenuto di acqua, h. A sottolineatura della bontà del modello paleo-climatico, si noti che il valore numerico del parametro  $h \cong 2,90\%$  non è stato imposto ma è stato ottenuto attraverso il procedimento matematico di identificazione dei parametri liberi del modello a partire dalle temperature isoterme di gennaio e di luglio della Terra. Poiché esiste un unico componente dell'atmosfera che può possedere tale valore di composizione ed è il vapore d'acqua, ne consegue che il modello ci sta guidando a soffermarci sugli effetti termici del vapor d'acqua atmosferico. Allo scopo di stabilire il legame esistente fra la variazione di concentrazione di background dei gas serra e la variazione di concentrazione di background del vapor d'acqua, facciamo l'ipotesi di conservazione della massa media atmosferica:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad A2$$

In particolare, poiché abbiamo ammesso la variabilità dei gas serra e del vapor d'acqua, l'equazione di conservazione si riduce a:

$$\frac{d([H_2O] + [CO_2 + CH_4 + O_3 + \dots])}{dt} = 0 \quad A3$$

Da qui deduciamo immediatamente, limitandoci all'anidride carbonica e trascurando gli altri gas serra:

$$[H_2O] + [CO_2] = costante \quad A4$$

Facendo coincidere la costante di integrazione con la somma delle concentrazioni di background alla data del 1975,  $[H_2O]^* + [CO_2]^*$ , possiamo scrivere:

$$[H_2O] = [H_2O]^* - ([CO_2] - [CO_2]^*) \quad A5$$

Questa equazione ci dice, molto semplicemente, che la concentrazione di background dell'acqua [H<sub>2</sub>O] varia con segno opposto alla variazione di concentrazione dell'anidride carbonica  $\varepsilon = [CO_2] - [CO_2]^*$  ovvero, più compattamente:

$$h = h^* - \varepsilon \quad A6$$

Analogamente, la massa dell'atmosfera secca si scrive:

$$m = m^*(1 + \varepsilon) \quad A7$$

Inserendo nella definizione, eq. (A1), queste espressioni variate di (m,h) deduciamo quindi l'espressione variata della trasmittanza, in funzione della variazione  $\varepsilon$  di concentrazione dell'anidride carbonica:

$$U \cong U^*(1 - \varepsilon/h^*) \quad A8$$

dove si è posto:

$$U^* = \frac{m^*}{4\pi R_T^2} \cdot C_p \cdot h^* \cdot \omega \cdot P \quad A9$$

La trasmittanza U è linearmente dipendente dalla variazione  $\varepsilon$  di concentrazione di anidride carbonica e varia in opposizione ad essa: all'aumentare di  $\varepsilon$  diminuisce U e viceversa.

### BIBLIOGRAFIA

- <sup>1</sup> J.E. Hansen, M. Sato, "Paleoclimate implications for human-made climate change"; *3.1 Milankovitch climate oscillations*, p.6; arxiv.org/pdf/1105.0968; July 2011.
- <sup>2</sup> S. Mazzullo, *Chimica e Industria*, 2012, **94**(5), 75.
- <sup>3</sup> D.V. Hoyt, *Reviews of geophysics and space physics*, 1979, **17**(3), 427.
- <sup>4</sup> J. Lean, "Solar Irradiance Reconstruction", IGBP Pages/World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series #2004-035. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA, 2004.
- <sup>5</sup> Y.-M. Wang, J.L. Lean, N.R. Sheeley Jr, *The Astrophysical Journal*, 2005, **625**(20), 522.
- <sup>6</sup> S. Mazzullo, *La Chimica e l'Industria Web*, 2015, **2**(6), giugno, ISSN 2283-5458.
- <sup>7</sup> A. Neftel et al., "Historical CO<sub>2</sub> record from the Siple Station ice core. In Trends: A Compendium of Data on Global Change". C D I A C, Oak Ridge National Lab., U.S. Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA, 1994.

- <sup>8</sup>P. Tans, R. Keeling, *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*: NOAA/ESRL <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> and Scripps Institution of Oceanography <https://scripps.ucsd.edu/>.
- <sup>9</sup>W.T. Norton, Gli esperimenti facili. Energia solare; Cap. 2.4 Insolazione; pp. 128-132, Muzzio Ed., 1980.
- <sup>10</sup>J. Dai, E. Mosley-Thompson, L.G. Thompson, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 1991, **96**(D9), 17361.
- <sup>11</sup>G. Papaspiropoulos *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D23), 4671, DOI: 10.1029/2002jd002344.
- <sup>12</sup>J.M. Rosen, *Journal of Geophysical Research*, 1964, **69**(21), November 1.
- <sup>13</sup>P. Levi, Il sistema periodico; *Carbonio*; p.233; Einaudi Ed., Torino, 1994.