
Cause ed effetti dei cambiamenti climatici

Roberto Battiston

*Dipartimento di Fisica, Università di Trento,
Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA)*

In questo articolo cerco di dare una semplice panoramica sul tema dei cambiamenti climatici. Una corretta informazione di base deve fare parte del bagaglio culturale di ogni persona che voglia essere in grado di discutere di questi temi. Ce n'è davvero bisogno: sono moltissimi, infatti, gli interessi che rallentano le azioni correttive o addirittura contestano l'esistenza del problema. La scienza ha da tempo fatto la sua parte nel chiarire cosa sta succedendo e non saranno mai troppe le persone che siano in grado di passare in modo autorevole e informato questo messaggio nella società.

Listen to science!

I venerdì per il futuro si susseguono coinvolgendo un numero sempre maggiore di ragazzi e adulti, la mobilitazione inizia a coinvolgere istituzioni. In meno di due anni Greta ne ha fatta di strada: dalla protesta solitaria davanti al parlamento svedese alle decine di milioni di persone che si mobilitano in tutto il mondo. Sta cambiando qualcosa, si sta veramente mettendo in moto un movimento che potrà portare ad una azione globale, coerente e tempestiva per fermare la deriva climatica creata dall'uomo ed i devastanti effetti di cui abbiamo fino ad ora avuto un numero crescente di impressionanti, assaggi?

Siamo in moltissimi ad augurarcelo, non solo, ad impegnarci per un cambiamento, anche

culturale, ormai non rimandabile. Cambiamento necessario ma non sufficiente per passare ad una fase operativa: ci sono e ci saranno, infatti, forti opposizioni, che si declinano nei modi più disparati, incluso l'attacco violento, sessista, generazionale nei confronti di Greta e di coloro che la seguono e sostengono le stesse idee. Dove non ci si spinge all'attacco volgare, si argomenta stravolgendo i dati climatici e gridando al complotto.

Come se il clima e il suo cambiamento fosse una questione di opinioni o qualcosa di troppo complesso per essere discusso in modo rigoroso.

O, peggio, una occasione di notorietà per ottenere una intervista o un invito ad un talk-show televisivo; vi sono ormai più esperti in clima in Italia che allenatori di calcio, che è tutto dire.

Greta è però portatrice di un messaggio di una semplicità rivoluzionaria: "listen to science", non ascoltate me, ascoltate la scienza. E allora facciamo due passi per rinfrescare a noi stessi di che cosa stiamo parlando, che cosa ci dice, insomma, la scienza.

Uno sguardo lungo

Se guardiamo un quadro con il naso attaccato alla tela vediamo dei tratti sfuocati. Per avere una visione chiara delle cose, occorre scegliere il giusto punto di vista. Per esempio guardando cosa è successo al clima della Terra nel corso degli ultimi 500 milioni di anni.

Impossibile? No, la scienza ce lo permette.

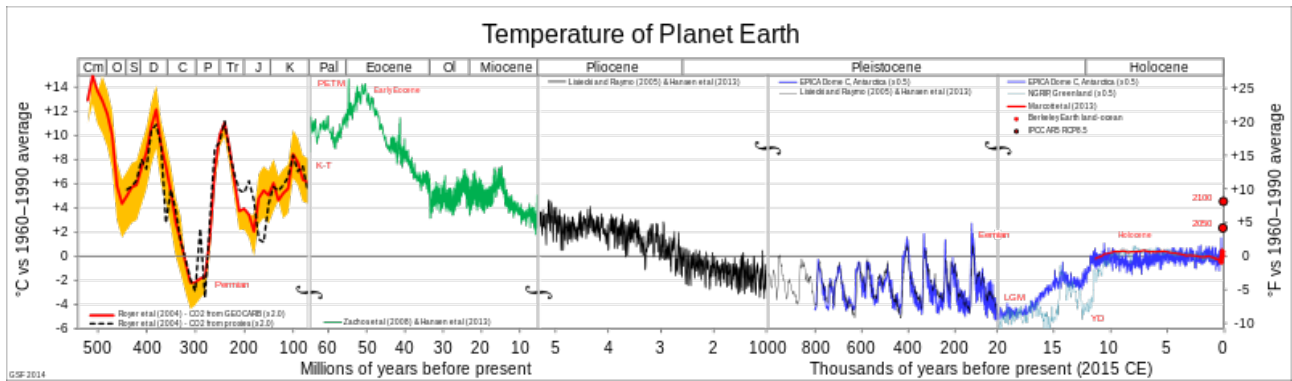


Figura 1: Analisi paleoclimatica dell'andamento della temperatura negli ultimi 500 milioni di anni [1]. La linea orizzontale che definisce lo zero indica la temperatura media della seconda metà del secolo scorso.

La paleoclimatologia è il campo di ricerca che ricostruisce gli elementi del clima, in particolare la temperatura delle epoche passate, usando una grande varietà di tecniche consolidate sviluppate nel corso del tempo. Tra le molte cose si studiano i depositi marini e gli strati del ghiaccio del polo sud, archivi fedeli di quello che è successo al clima migliaia o milioni di anni fa.

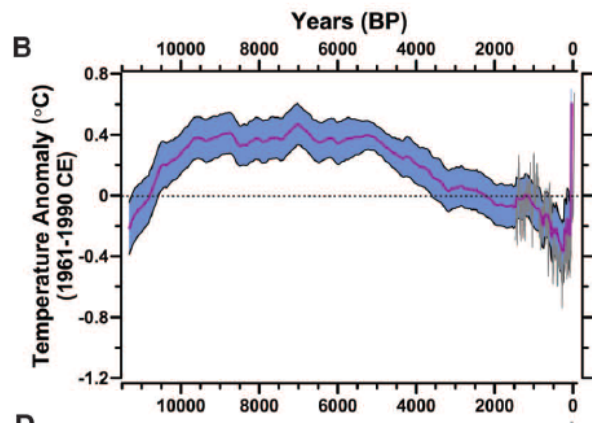


Figura 2: Analisi paleoclimatica dell'andamento della temperatura negli ultimi 11 mila di anni [2].

La Figura 1 riporta la temperatura media globale del pianeta negli ultimi 500 milioni di anni, riportata rispetto alla media della seconda metà del secolo scorso! La scala orizzontale non è lineare, altrimenti sarebbe impossibile avere una visione di insieme: il primo quadrante copre 400 milioni di anni, il secondo 40 milioni di anni, il terzo 4 milioni di anni, il quarto un milione di anni, il quinto 20.000 anni arrivando fino ai giorni nostri. Possiamo notare molte cose nell'andamento della temperatura. In epoche lontane, nel Permiano, la temperatura ha oscillato, più volte, complessivamente di 18 gradi,

nell'ambito di qualche centinaio di milioni di anni. In quel lungo periodo deve essere successo di tutto: estinzioni di massa di piante ed animali, sviluppo di specie diverse, migrazioni massicce, completo scioglimento (e riformazione) di tutti i ghiacci del pianeta, con la variazione di centinaia di metri del livello del mare.

Noi però non c'eravamo.

Dal Pliocene in poi, cioè da quando apparvero gli ominidi, circa 5 milioni di anni fa, la temperatura ha continuato a scendere, partendo da circa 4 gradi sopra i valori attuali, e arrivando a 4 gradi sotto il valore attuale nei periodi più freddi del Pleistocene, l'ultimo milione di anni in cui si è sviluppato l'Homo Erectus. Negli ultimi 60 mila anni, periodo in cui si è affermato l'Homo Sapiens, abbiamo assistito ad un lungo periodo freddo e arido, seguito da una risalita ed un periodo di estrema stabilità (entro più o meno un grado) negli 11 mila anni in cui si sono sviluppate tutte le civiltà storiche. Notiamo nel grafico due puntini rossi all'estrema destra, corrispondenti al 2050 e al 2100, un periodo brevissimo su questa scala, in cui improvvisamente la temperatura potrebbe superare quella che c'era all'inizio del Pliocene, cinque milioni di anni fa quando i mari erano 25 metri più alti di oggi.

Rivediamo i dati su una scala temporale di 11 mila anni, Figura 2: si conferma una variabilità molto modesta entro più o meno 0.5 gradi. La zona in azzurro chiaro dà una idea dell'incertezza sui valori riportati (poco più di un decimo di grado). A destra in fondo c'è il solito piccolo rosso che schizza sopra i 0.4 gradi, crescendo di 0.8 gradi in un intervallo di tempo molto breve.

Concentriamoci ora sugli ultimi 1500 anni, co-

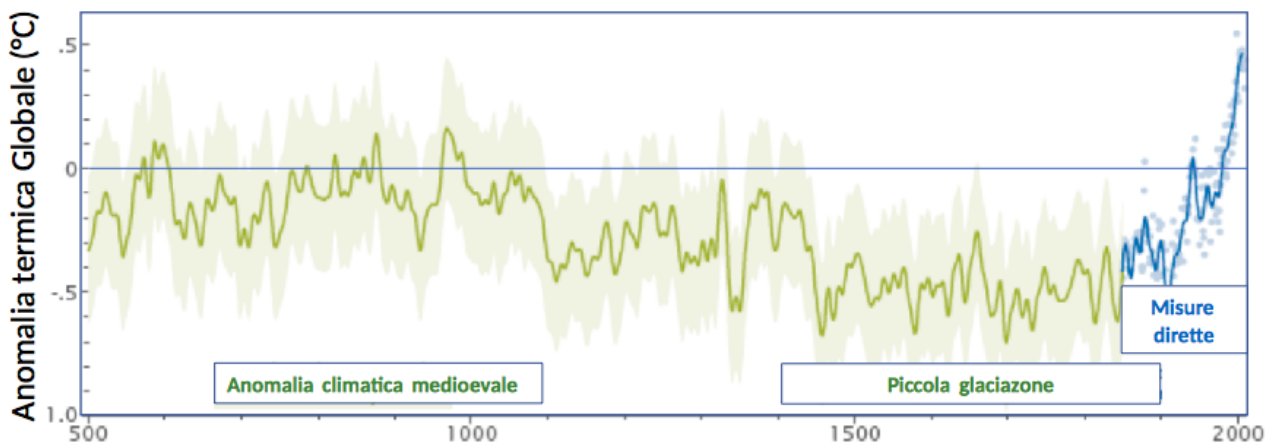


Figura 3: Andamento della temperatura negli ultimi 1500 anni ricavato da dati paleoclimatici (linea verde) confrontato con l'andamento basato su misure strumentali moderne (linea blu). I dati indicano come la temperatura globale sia più alta oggi di quanto non sia stata almeno negli ultimi 15 secoli (adattato da Mann et al. 2008 [3]). La linea dello zero indica la temperatura media degli anni '70 del secolo scorso.

me riportato nel grafico della Figura 3. Le oscillazioni sono contenute all'interno di circa mezzo grado, tranne quando schizzano verso l'alto di quasi un grado nell'ultimo secolo. Notiamo in questo grafico che il periodo caldo fra il 900 d.C. ed il 1300 d.C., chiamato Anomalia Climatica Medioevale, corrisponde ad un valore di un paio di decimi più alto di quello della fine del secolo scorso, ed il periodo freddo corrispondente alla piccola glaciazione avvenuta tra il 1400 ed i 1900, corrisponde a valori di 3-4 decimi di grado sotto il valore di quello della fine del secolo scorso. Si tratta di variazioni piuttosto piccole ma che hanno causato grandi cambiamenti del clima.

Cosa si impara da questi dati?

In primo luogo, la nostra specie si è sviluppata in un contesto particolarmente stabile dal punto di vista climatico.

Poi, che tutte le civiltà esistenti su questo pianeta si sono sviluppate nel corso di 11 mila anni di straordinaria stabilità climatica. Le piccole variazioni della temperatura globale, corrispondenti a meno di mezzo grado, hanno portato a cambiamenti climatici molto importanti, periodi caldi o mini glaciazioni, che hanno influenzato sostanzialmente l'andamento delle civiltà del tempo.

Infine, che non vi è mai stata in tutta la storia del clima, una variazione così rapida come ai giorni nostri! Durante le glaciazioni la temperatura variava di 1 grado ogni mille anni, nell'ul-

timo secolo è salita di 0.8 gradi (8 volte di più), e oggi sta salendo di 0.15-0.20 gradi ogni dieci anni, 20 volte di più!

È un fenomeno che non è mai stato osservato in tutta la storia del pianeta. A cosa è dovuto? Una ipotesi molto ragionevole è che la causa sia la rivoluzione industriale che in meno di due secoli ha moltiplicato enormemente l'impatto dell'uomo sul pianeta (aria, acqua, materie prime, agricoltura). Prima della fine del 1800, l'impatto umano sul clima non poteva che essere molto limitato.

Ma se vogliamo essere rigorosi, gli indizi fino ad ora raccolti non bastano a dimostrare che l'influenza umana sia sufficiente a modificare la temperatura. Vogliamo quindi assicurarci che non siano piuttosto in corso fenomeni naturali, ad esempio dovuti al Sole o a lenti movimenti periodici della rotazione terrestre.

Il nostro amico Sole

Il Sole è la fonte dell'energia del nostro pianeta. Il suo flusso di energia è molto stabile: esso è cresciuto di meno dell'1% in 100 milioni di anni. In un secolo questa lenta variazione ha portato ad una crescita di meno di un milionesimo dell'1%; assolutamente trascurabile. In confronto è molto più grande, ma sempre trascurabile, il cambiamento di circa 1 per mille legato ai cicli solari che si susseguono ogni 11 anni. Insomma

IPCC

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) è il gruppo di lavoro delle Nazioni Unite per coordinare le scienze legate ai cambiamenti climatici. L'IPCC è stato creato per fornire ai politici informazioni affidabili sui cambiamenti climatici, le loro implicazioni e i potenziali futuri rischi, a anche per pianificare azioni di adattamento e attenuazione dei fenomeni.

la nostra stella si comporta benissimo, sulla scala temporale che ci riguarda.

Anche le oscillazioni periodiche delle caratteristiche orbitali della Terra, descritte nella teoria di Milankovitch (modifiche dell'asse di rotazione, assestamenti delle masse liquide o solide) [4] hanno periodi lunghi rispetto al secolo in cui è stato osservato il drastico cambiamento della temperatura.

La risposta della Terra alla radiazione solare varia invece enormemente di più ed in tempi molto brevi: è questa la vera causa dei cambiamenti climatici.

Lo spettro di luce solare che raggiunge la Terra ha il picco nella luce visibile (44%), ma ha un'importante componente infrarossa (53%) e una piccola componente ultravioletta (3%), che invece i nostri sensi non percepiscono. Cosa accade a questa energia una volta raggiunta la Terra? Il 35% dell'energia viene riflesso nello spazio, il 51% assorbito dalla superficie, che ne riemette il 17% nello spazio e il 34% nell'atmosfera, e il 14% assorbito dall'atmosfera, che ne riemette però il 48% nello spazio, dovendo irradiare anche la parte ricevuta dalla superficie.

Qualsiasi fattore modifichi questi numeri anche solo dell'1% ha un impatto sul clima.

Talvolta in senso positivo: l'esplosione del Monte Pinatubo nel 2001 ha inserito nell'alta atmosfera, la troposfera, grandi quantità di biossido di zolfo schermando la Terra dalla luce solare. Di conseguenza la temperatura del pianeta per circa tre anni è tornata ai valori pre-industriali!

Talvolta in senso negativo: nell'ultimo secolo l'aumento della densità dei gas serra nella parte bassa dell'atmosfera è stato molto importante,

+35%, e repentino. Nello stesso, brevissimo periodo di tempo, abbiamo assistito ad un aumento di 0.8 gradi, e ora si va al ritmo di 0.15-0.20 gradi ogni dieci anni. Di questo passo, potrà aumentare di 2-6 gradi entro la fine del XXI secolo con conseguenze disastrose.

La pistola fumante: il ciclo globale del carbonio

Perché parliamo tanto del carbonio quando discutiamo di mutamenti climatici? Il carbonio è un elemento come un altro. È abbondante sulla Terra, anche se non rientra nei primi otto elementi che compongono il nostro pianeta. La maggior parte del carbonio è presente nelle rocce ed è inerte nelle scale temporali di interesse umano, secoli o millenni. Il resto del carbonio è accumulato nella forma di CO₂ (anidride carbonica) nell'atmosfera (2%), nella biomassa e nel suolo (5%), come combustibile fossile in vari giacimenti geologici (8%) e sciolto in forma ionica negli oceani (85%).

Il carbonio che interessa il clima è quello sciolto in forma gassosa.

L'anidride carbonica nell'atmosfera ha infatti un ruolo fondamentale nel determinare la quantità di calore che la Terra riceve dal Sole, nella forma di radiazione scambiata con la nostra stella e con lo spazio profondo. I gas presenti nell'atmosfera, in particolare la CO₂, assorbono l'energia irradiata dalla Terra e la irradiano in tutte le direzioni. L'energia irradiata verso il basso riscalda la superficie della Terra e la bassa atmosfera. Più è grande la quantità di CO₂ più aumenta la quantità di radiazione catturata dall'atmosfera e irradiata verso la Terra; si tratta del cosiddetto effetto serra. Lo stesso accade per il metano, CH₄, un altro gas serra molto importante che fa parte del ciclo globale del carbonio.

Solo nel periodo 2007-2016, l'umanità ha immesso nell'atmosfera, come CO₂, la quantità di 10.7 Gigatonnellate (GtC) ogni anno (una GtC = 10⁹ tonnellate di carbonio = 10¹⁵ grammi). È principalmente il risultato della combustione di fossili primari (~9.4 GtC/yr) e del cambiamento di uso delle superfici (~1.3 GtC/yr). Si stima che l'oceano abbia assorbito il 22% di questo carbonio (~2.4 GtC/yr) e che la biosfera terrestre

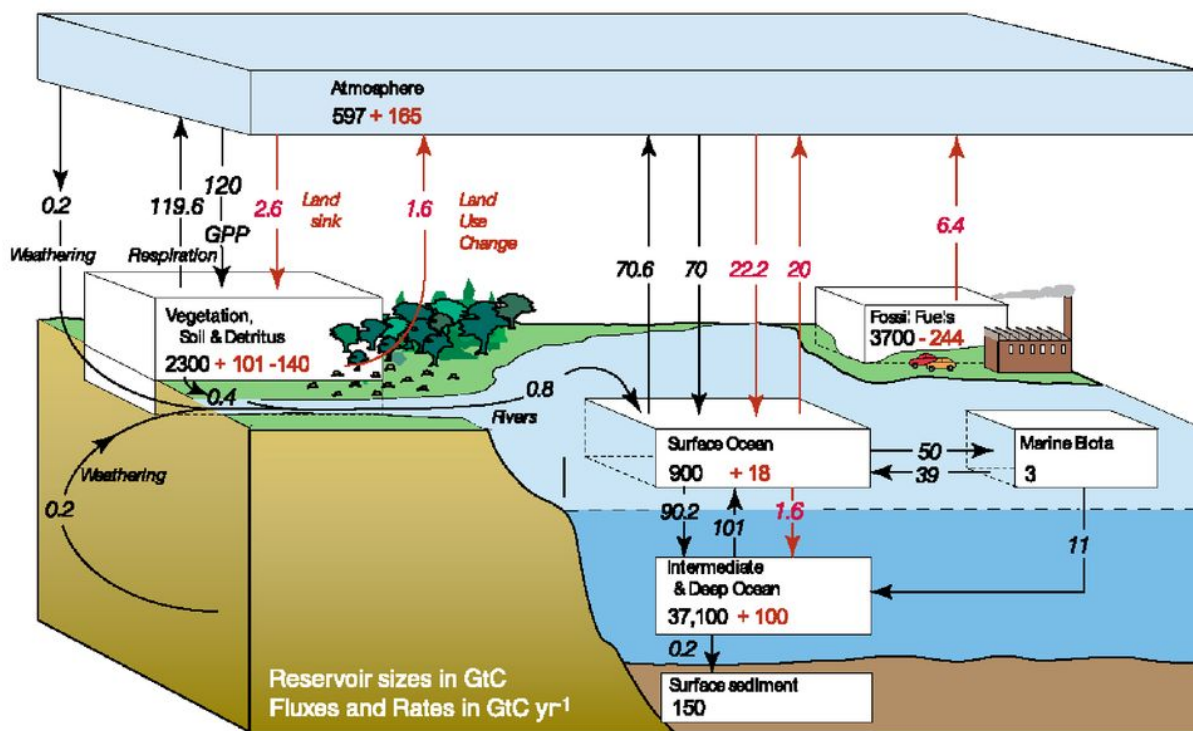


Figura 4: Dall'IPCC AR4 (2007): il ciclo globale del carbonio per gli anni '90, che mostra i principali flussi annuali in GtC/yr: flussi pre-industriali naturali in nero e flussi antropogenici in rosso (modificato da Sarmiento e Gruber, 2006, [6] con variazioni nelle dimensioni del campione da Sabine et al., [7]). I flussi lordi generalmente hanno incertezze superiori a $\pm 20\%$, ma sono stati mantenuti importi frazionari per raggiungere un equilibrio complessivo quando si includono stime in frazioni di GtC/yr per trasporto fluviale, agenti atmosferici, sepoltura in acque profonde, ecc. "GPP" è il lordo annuale (terrestre) della produzione primaria. Il contenuto di carbonio atmosferico e tutti i flussi cumulativi dalla fine del 1750 risalgono alla fine del 1994.

abbia assorbito un altro 28% (~ 3.0 GtC/yr), mentre il 6% delle emissioni finisce in altre forme di assorbimento [5].

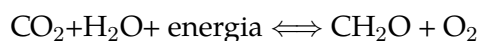
Negli ultimi decenni, quindi, solo $\sim 50\%$ del carbonio emesso è rimasto nell'atmosfera influenzando il riscaldamento globale. Anche se rimangono delle incertezze nel bilancio globale del carbonio, è chiaro che vari processi naturali sono al lavoro per ridurre significativamente il ritmo al cui la quantità di carbonio si accumula nell'atmosfera.

Risulta però altrettanto chiaro che i processi naturali non sono sufficienti a limitare la crescita della CO_2 nell'atmosfera; l'andamento futuro del cambiamento climatico, dipenderà in modo essenziale dal bilancio tra le **sorgenti umane** e l'**accumulo nei depositi naturali** come gli oceani e

la biosfera terrestre.

Prima della rivoluzione industriale il contributo umano era trascurabile rispetto ai processi naturali, che rappresentavano quindi un meccanismo di stabilizzazione importante. Oggi le cose sono cambiate.

La reazione chimica fondamentale che regola questi processi è la seguente:



Se è percorsa verso destra il carbonio viene fissato tramite la fotosintesi, se è percorsa verso sinistra, si tratta dei processi di respirazione o di combustione dove il carbonio viene liberato in forma gassosa. Il ciclo globale del carbonio coinvolge una serie complessa di processi biologici, chimici e fisici. Lo schema mostrato nella Figura

4 (IPCC Report AR4) [6, 7], mostra le principali riserve di carbonio in gigatonnellate di carbonio, GtC e i flussi principali in GtC per anno, GtC/yr. Si tratta delle stime migliori disponibili per gli anni '90: questi valori sono aggiornati annualmente dal Global Carbon Budget project [5] e sono parte integrante dei rapporti IPCC (Cias et al. 2013) [8].

È interessante studiare in dettaglio questo schema. I valori in nero rappresentano i valori preindustriali dello scambio di carbonio. Quelli in rosso sono il contributo addizionale umano. Le frecce danno il segno del flusso, i numeri assoluti, con il loro segno, danno la quantità accumulata.

Ad esempio, all'inizio degli anni '90, l'atmosfera aveva accumulato 165 GtC rispetto al periodo preindustriale e stava accumulando $-2.6 + 1.6 - 22.2 + 20 + 6.4 = +3.2$ GtC/yr all'anno come risultato della somma dei 5 numeri in rosso; notiamo che nel periodo preindustriale lo scambio tra atmosfera e superficie era pari a $-0.2 + 119.6 - 120 + 70.6 - 70 = 0$ GtC/yr, vale a dire in equilibrio.

Allo stesso modo l'oceano aveva accumulato 118 GtC rispetto al periodo preindustriale e stava accumulando $+22.2 - 20 = +2.2$ GtC/yr all'anno come risultato di 2 numeri in rosso; nel periodo preindustriale il flusso verso l'oceano era $+0.8 - 70.6 + 70 = +0.2$ GtC/yr, anch'esso in sostanziale equilibrio, in ogni caso non verso l'atmosfera.

Infine il terzo serbatoio, quello della vegetazione e del suolo, aveva diminuito di 39 GtC il suo contenuto ($+101 - 140 = -39$ GtC) ma stava recuperando accumulando $+2.6 - 1.6 = 1$ GtC/yr. Anch'esso prima della rivoluzione industriale era in equilibrio: $-119.6 - 0.4 + 120 = 0$ GtC/yr.

Il risultato inequivocabile dello studio del ciclo globale del carbonio è quindi che:

1. l'uomo ha cambiato l'equilibrio del ciclo del carbonio inserendo nell'atmosfera una grande quantità di CO₂ e altri gas che producono effetto serra: questo è il nocciolo del problema;
2. metà di questo contributo si accumula nell'atmosfera, questa è la cattiva notizia;
3. metà di questo contributo ritorna negli oceani e nel carbonio accumulato nella biomassa. Questa è la buona notizia anche se non

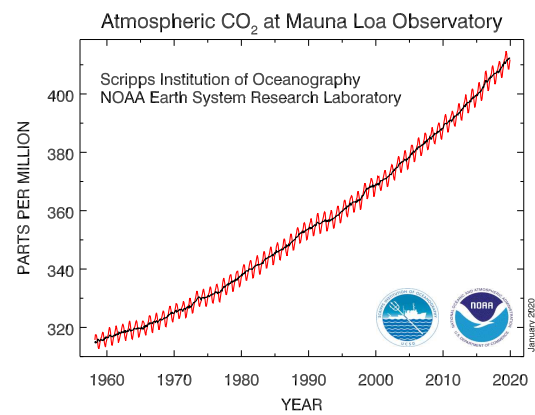


Figura 5: andamento della CO₂ nell'atmosfera [9].

dobbiamo trascurare gli effetti dell'acidificazione della massa oceanica sullo stato di salute della biomassa marina.

L'aumento della CO₂ atmosferica viene monitorato direttamente dagli anni '50. Nella Figura 5, osserviamo sia il ciclo stagionale, legato all'andamento della biosfera nell'emisfero Nord, sia la crescita ininterrotta del valore assoluto [9].

I contributi alla CO₂ nell'atmosfera sono dovuti principalmente alle seguenti sorgenti.

1. *Combustione di combustibili fossili.* Negli anni '90 questa sorgente ha emesso 6.4 GtC/yr, nel decennio 2007-2016, 9.4 GtC/yr. Nel periodo 2000-2009, le emissioni sono aumentate del 3.3% per anno, principalmente a causa della crescita delle emissioni dei paesi in via di sviluppo. Nel periodo 2012-2016, la crescita si è significativamente ridotta, ma rimane consistente con lo scenario peggiore usato nel Report IPCC AR5 (RCP8.5) [10].
2. *Riduzione della superficie ricoperta da foreste per gli scopi dell'agricoltura o dell'aumento delle aree abitate.* Valutare questo processo con precisione non è facile data la differenza delle condizioni a cui esso avviene, ma il risultato è certamente rilevante ai fini del bilancio complessivo.
3. *Modifica delle condizioni dello scambio di CO₂ con gli oceani.* Ad esempio un aumento della temperatura del mare porterebbe ad una diminuzione della capacità di assorbire CO₂.

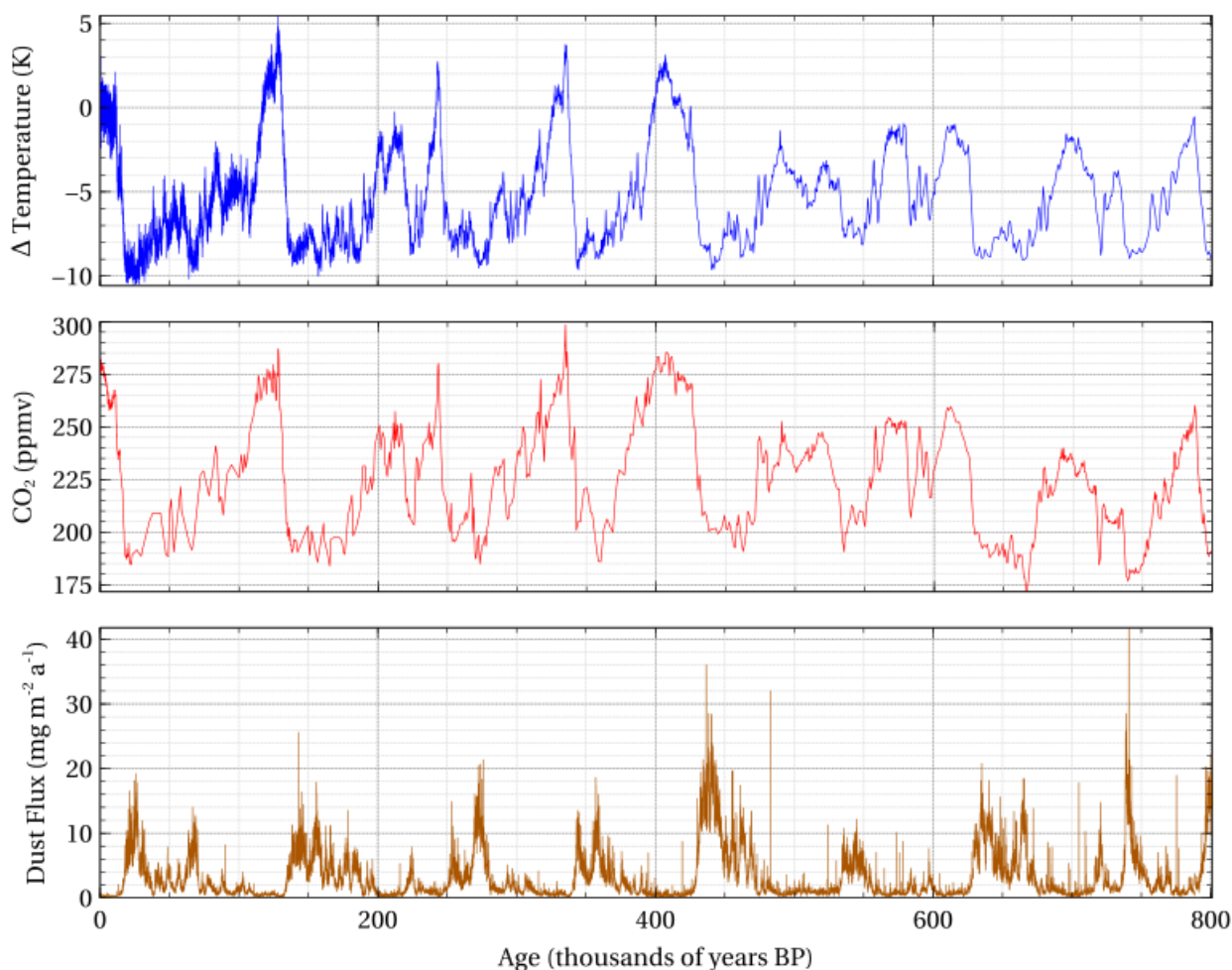


Figura 6: Andamento della temperatura nell'atmosfera (grafico superiore), della CO₂ (grafico centrale) e della densità di polvere (grafico inferiore) negli ultimi 800 mila anni [11, 12].

Appare chiaro che i punti 1 e 2 possono essere influenzati da politiche industriali e sociali tese a contenere il danno ambientale, mentre per il punto 3 è molto più difficile prevedere forme di intervento.

Ma è davvero l'uomo a cambiare le condizioni del clima?

Dopo quello che è stato detto nel paragrafo precedente sembrerebbe ci sia poco da discutere. L'impronta dell'uomo sul clima è dovuta all'immissione di grandi quantità di gas serra nell'atmosfera, con l'effetto di intrappolare negli strati bassi dell'atmosfera una parte del calore che ci giunge dal Sole.

Che la presenza dei gas serra faccia aumentare la temperatura del pianeta lo si desume da un

gran numero di osservazioni. Abbiamo visto in precedenza come la paleoclimatologia ci permetta di ricostruire l'andamento della temperatura e della presenza di gas serra nell'atmosfera nel corso degli ultimi centinaia di migliaia di anni. Nel pannello centrale della Figura 6 vediamo la concentrazione di anidride carbonica (CO₂) nell'atmosfera negli ultimi 400 mila anni. In quello superiore l'andamento della temperatura media nello stesso periodo. Occorre fare attenzione perché la scala dei tempi è rovesciata, lo zero corrisponde ad oggi e via via che si va a destra si va indietro nel tempo. Si può notare la perfetta corrispondenza tra gli aumenti della CO₂ nell'aria e gli aumenti della temperatura. In questa figura, l'aumento della CO₂ e della temperatura nell'ultimo secolo non è visibile a causa della scala supercompressa, ma è evidente nei grafici espansi.

Come abbiamo ricordato, nonostante le molteplici evidenze legate all'immissione dei gas serra nell'atmosfera, negli anni '80-'90 c'è stato chi ha sostenuto che l'immissione di CO₂ nell'atmosfera fosse l'effetto e non la causa del riscaldamento globale.

In linea di principio, infatti, una correlazione tra due quantità non stabilisce quale sia la causa e quale l'effetto: è l'immissione dei gas nell'atmosfera, originata dall'attività umana, la causa dell'aumento della temperatura, oppure è il riscaldamento naturale del pianeta che aumenta la CO₂ nell'atmosfera liberando gas serra intrappolati nel suolo o negli oceani? Visti i numeri presentati nella Figura 4, un piccolo riscaldamento del mare, potrebbe infatti avere l'effetto di immettere nell'atmosfera grandi quantità di CO₂.

È interessante a tal fine ricordare gli studi effettuati negli anni '90 da Benjamin Santer, un climatologo del Lawrence Livermore National Laboratory in California i cui risultati contribuirono in modo decisivo a confermare l'evidenza dell'impronta dell'attività umana sul clima [13].

Santer studiò l'andamento nel tempo della temperatura delle diverse parti della colonna atmosferica. L'idea è piuttosto semplice: se la causa è il riscaldamento del pianeta Terra da parte del Sole e la conseguenza sono i gas serra nell'atmosfera, la colonna atmosferica dovrebbe seguire l'andamento termico del pianeta. Viceversa, se il riscaldamento è dovuto all'inserimento dei gas serra nell'atmosfera creando un sottile velo in grado di intrappolare nella troposfera, la parte bassa dell'atmosfera, parte della radiazione emessa dalla Terra, l'andamento della temperatura della parte alta dell'atmosfera, la stratosfera, dovrebbe essere diverso, in quanto non sarebbe raggiunta da parte dell'emissione termica.

Santer trovò in effetti che negli ultimi cinquant'anni, mentre la temperatura della bassa troposfera cresceva al ritmo della temperatura della Terra (Figura 7c), la temperatura della bassa stratosfera scendeva (Figura 7a), in totale controtendenza con il riscaldamento del pianeta. I grafici della Figura 7 sono stati aggiornati fino al 2012: si nota la presenza di alcuni picchi nel grafico della stratosfera, corrispondenti ad eruzioni vulcaniche che immettono polveri nella stratosfera causando un rapido, ma temporaneo, aumento

della temperatura della stratosfera per un effetto schermante analogo al quello della CO₂.

Questo studio fece scalpore negli anni '90, perché le sue implicazioni erano chiarissime: esiste un'impronta nell'andamento della temperatura nell'ultimo secolo della colonna atmosferica che dimostra che la causa del riscaldamento del pianeta è dovuta all'immissione dell'atmosfera dei gas serra da parte dell'uomo e non viceversa.

Inutile dire che Santer fu violentemente attaccato per questi risultati, che però furono rapidamente accettati dalla stragrande maggioranza della comunità scientifica internazionale. Per i suoi meriti scientifici Santer fu nominato presidente del gruppo di lavoro che nel 1995 scrisse l'ottavo capitolo del secondo rapporto IPCC, che si concludeva con l'affermazione che è riconoscibile un effetto dell'attività umana sul clima.

Più di vent'anni fa la scienza aveva già fatto la sua parte nel riconoscere e denunciare cosa stava accadendo al clima a causa della presenza delle attività umane.

I numeri dell'economia dei cambiamenti climatici

Il cambiamento climatico è probabilmente la più grande sfida che l'umanità abbia dovuto affrontare, con effetti profondi e drammatici su persone, ambiente ed economia.

È necessario capire di cosa stiamo parlando anche da un punto di vista sociale ed economico. Ecco esempi di quello che accadrà senza azioni correttive e di adattamento:

- l'agricoltura potrebbe perdere il 30% del suo valore entro il 2050. 500 milioni di piccole imprese agricole ne pagherebbero le gravi conseguenze;
- il numero di persone a cui mancherà l'acqua almeno un mese all'anno salirà da 3,6 miliardi a 5 miliardi nel 2050;
- la crescita del livello del mare e l'aumento di violente tempeste, forzerà lo spostamento di centinaia di milioni di persone verso l'interno, con costo stimato in più di 1000 miliardi di dollari ogni anno, solo per il periodo da oggi fino al 2050;

Atmospheric Temperature Changes in CMIP-5 Simulations

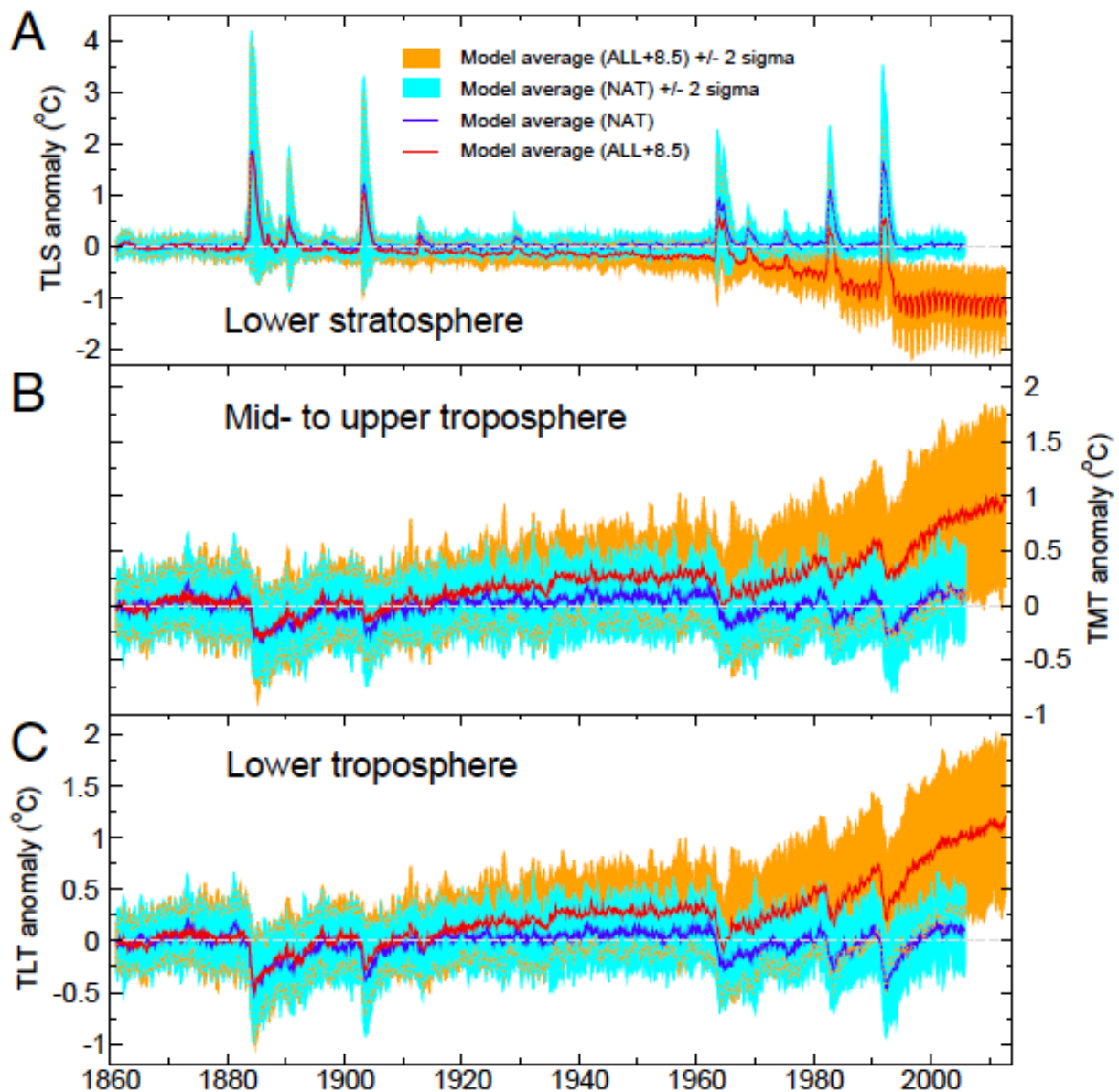


Figura 7: Serie temporali nella bassa stratosfera (A) e nella troposfera superiore (B) e inferiore (C), confrontati con i modelli che includono (colore arancione) o escludono (colore azzurro) le forzanti di origine umana. L'opposto andamento della temperatura nella bassa (B e C) e alta (A) atmosfera, corrisponde alle osservazioni e rappresenta l'impronta che dimostra che il meccanismo che porta al riscaldamento corrisponde al filtro dovuto ai gas serra, che trattiene il calore nella bassa atmosfera [13, 14, 15].

- più di 100 milioni di persone scenderanno sotto il livello di povertà già entro il 2030.

Affrontare queste grandi sfide può però diventare una opportunità sociale ed economica. Una Commissione internazionale dell'ONU che ha affrontato questo problema, ha evidenziato come il ritorno sull'investimento vari da 2:1 a 10:1, con un beneficio che supera di gran lunga i costi indotti dalla gestione dei danni dovuti ai

cambiamenti climatici.

Come discutere dei cambiamenti

Non c'è dubbio che per affrontare e risolvere la questione dei cambiamenti climatici occorra ascoltare la scienza e agire di conseguenza.

Ma non è così facile. Cambiare mentalità e abitudini è una delle cose più difficili per la nostra

specie, senza contare gli enormi interessi economici e politici che si intrecciano attorno a questi temi. D'altra parte non possiamo aspettare gli effetti del ricambio generazionale; non c'è tempo, dobbiamo organizzarci ed agire.

Per questo motivo è importante comunicare, comunicare molto, comunicare bene. Occorre essere preparati per ribattere agli argomenti capziosi, alle fake news, alle posizioni di parte. Qui il tema si sposta dalla scienza, ad un dibattito di importanza vitale, in cui non si può lasciare il campo a chi provoca, a chi alza la voce, a chi ha una agenda nascosta ed è interessato a fare perdere a tutti tempo e risorse sempre più preziose.

Questi sono solo alcuni esempi di botta e risposta che è necessario essere preparati a sostenere in un dibattito pubblico, a tavola o al bar:

Il clima è sempre cambiato! → Certo, ma ora è l'uomo l'elemento dominante

Non c'è consenso. → Il 97% degli esperti concorda che l'uomo è la causa del riscaldamento globale

I modelli non sono affidabili → I modelli riproducono con successo l'andamento della temperatura dal 1900, globalmente, a Terra, nell'atmosfera e negli oceani

Animali e piante possono adattarsi → I cambiamenti climatici causeranno l'estinzione di massa di specie che non possono adattarsi su tempi scala così brevi.

Più di 200 esempi di questi scambi si possono trovare sul sito

<https://skepticalscience.com/argument.php>.

Ne consiglio caldamente la consultazione. Una corretta comunicazione sui temi del cambiamento climatico è altrettanto importante dell'attivazione della raccolta differenziata o della riduzione dell'uso della plastica non riciclabile; è necessario rendere questi temi onnipresenti nella discussione politica e nel dibattito pubblico a tutti i livelli, partendo dalla scuola.

Come acrobati sul filo

Abbiamo visto come sia complessa l'interazione tra le parti che costituiscono il nostro pianeta

e tra il nostro pianeta e la nostra stella, il Sole. Noi esistiamo e siamo giunti all'attuale livello di sviluppo perché la scala dei tempi dei cambiamenti sono sempre stati lenti e siamo sempre rimasti nelle vicinanze dell'equilibrio: nell'ultimo secolo, l'impatto dell'uomo sul clima li ha enormemente accelerati e ci sta portando fuori dal delicato equilibrio che ha caratterizzato le ultime migliaia di anni.

L'esistenza della nostra specie assomiglia a quella del funambolo che sale su un altro funambolo, che a sua volta è seduto su una sedia appoggiata sopra un filo teso nel vuoto. Questo miracolo di equilibrio può funzionare, certo, ma solo se gli acrobati sono allenati, pienamente coscienti degli effetti delle loro azioni. Saremo in grado di essere bravi come loro?

Così come gli acrobati sul filo si sono esercitati a lungo e sanno bene quali sono le forze in gioco che determinano il loro equilibrio anche noi dobbiamo imparare a ascoltare la scienza e agire di conseguenza.

Ha ragione Greta: non c'è più tempo da perdere, occorre passare all'azione!



- [1] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.svg
- [2] S. A. Marcott, J. D. Shakun, P. U. Clark, A. C. Mix: "A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years", *Science* **339** (2013) 1198.
- [3] M.E. Mann, Z. Zhang, M.K. Hughes, R. S. Bradley, S. K. Miller, S. Rutherford: "Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia", *Proc. Natl. Acad. Sci.* **105** (2008) 13252-13257.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles
- [5] C. Le Quere et al.: "Global Carbon Budget 2017", *Earth Syst. Sci. Data* **10** (2018) 405.
- [6] J. L. Sarmiento and N. Gruber: *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press, Princeton, Woodstock (2006).
- [7] C. Sabine: "The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂", *Science* **305** (2004) 367.
- [8] P. Ciais et al.: "Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system", *Biogeosciences* **11** (2014) 3547.
- [9] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- [10] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- [11] J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J. M. Barnola: "Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the past 800,000 Years", *Science* **317** (2007) 793.
- [12] D. Lüthi, M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, Jean, H. Fischer: "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present", *Nature* **453** (2008) 379.
- [13] B. D. Santer, J. F. Painter, C. Bonfils, C. A. Mears, S. Solomon, T. M. Wigley, . . . F. J. Wentz: "Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere", *Proc. Nat. Acad. Sc.* **110** (2013) 17235.
- [14] F. Lambert, B. Delmonte, J. R. Petit, M. Bigler, P. R. Kaufmann, M. A. Hutterli, T.F. Stocker, U. Ruth, J. P. Steffensen: "Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core", *Nature* **452** (2008) 616.
- [15] F. Lambert, M. Bigler, J. P. Steffensen, M. Hutterli, H. Fischer: "Centennial mineral dust variability in high-resolution ice core data from Dome C, Antarctica", *Climate of the Past* **8** (2012) 609.



Roberto Battiston: è stato presidente dell’Agenzia spaziale italiana (ASI) dal 2014 al 2018. Fisico sperimentale, specializzato nel campo della fisica fondamentale e delle particelle elementari, è uno dei maggiori esperti di raggi cosmici. Ha coordinato assieme al premio Nobel Samuel C. C. Ting la realizzazione dello spettrometro magnetico alfa (AMS), operante sulla Stazione spaziale internazionale dal 2011 e dedicato alla ricerca dell’antimateria e della materia oscura. Ha pubblicato circa 500 articoli scientifici sulle più importanti riviste internazionali. Editorialista della Stampa, Repubblica e dell’Adige svolge una intensa attività come saggista e divulgatore. Ha pubblicato di recente *Fare Spazio* (2019, La Nave di Teseo) e *La prima alba del Cosmo* (2019, Rizzoli).

