

## RIFLESSIONI SULL'EFFETTO SERRA

Jacques Villain, Grenoble

Il premio Nobel per la Pace 2007, diviso fra Al Gore ed il Gruppo Intergovernativo sull'Evoluzione del Clima (GIEC) sancisce la grande risonanza del dibattito sull'effetto serra presso l'opinione pubblica. A questo dibattito prendono parte molti esperti, su Internet, sui giornali, pubblicando libri. Ma la meraviglia è che anche i cittadini partecipano. La loro partecipazione è utile, fra l'altro, perché incoraggia gli esperti a spiegare meglio i loro risultati. Il mio intervento in questo dibattito è quello di un cittadino informato.

Il mio primo scopo è di ricordare alcuni meccanismi fisici elementari che sono importanti per determinare il clima della terra. Sebbene la combinazione di questi meccanismi sia soltanto accessibile tramite potenti calcolatori che comunque non forniscono ancora risultati molto precisi, tuttavia il confronto con i principi fisici rende il calcolatore più affidabile.

Un mio secondo scopo è di accennare l'esemplarità di questo dibattito a scala mondiale, unico nella storia, al quale partecipano esperti e governi.

È riconosciuto da quasi tutti<sup>1,2,3,4</sup> che negli ultimi 50 o 100 anni c'è stato un cambiamento climatico (che chiamerò "dell'anno 2000") caratterizzato segnatamente da un aumento della temperatura media. D'altra parte, nello stesso tempo, la quantità di biossido di carbonio presente nell'atmosfera è anch'essa cresciuta<sup>5</sup>. Questa crescita è principalmente dovuta all'uso di combustibili fossili, cioè è causata dalle attività umane. Su queste osservazioni non c'è contestazione. La lite riguarda la relazione fra il cambiamento climatico e il biossido di carbonio. Questo è l'argomento del mio presente contributo, nel quale voglio spiegare perché il problema è difficile, e qual è secondo me la posizione più ragionevole nello stato attuale delle conoscenze.

Per capire la difficoltà del problema, conviene prima ricordare cose ben conosciute<sup>6,7</sup>: la terra riceve l'energia necessaria tramite la luce del sole, soprattutto luce visibile, che attraversa l'atmosfera, viene assorbita dalla terra e la riscalda. Questa terra calda emette luce, ma luce infrarossa che, prima di uscire dall'atmosfera, deve essere assorbita ed emessa molte volte da molte molecole. Fra queste molecole c'è il biossido di carbonio CO<sub>2</sub>. Si capisce dunque che, aumentando la quantità di biossido di carbonio presente nell'atmosfera, l'uomo possa avere un'influenza sul clima, come suggerito da Arrhenius<sup>8</sup> alla fine del diciannovesimo secolo. Questo è conosciuto da quasi tutti. Forse è meno conosciuta la ragione per la quale, fino a poco fa, Arrhenius non fu creduto.

### **Molta acqua, poco biossido di carbonio.**

Nell'atmosfera, c'è un po' di biossido di carbonio, ma molta acqua, sotto forma di vapore o di nuvole. Se si raddoppia la quantità di CO<sub>2</sub>, è sempre una piccola quantità. Perciò, all'inizio del ventesimo secolo, Angström<sup>9</sup> si oppose a Arrhenius e affermò che l'effetto del CO<sub>2</sub> sulla temperatura terrestre doveva essere trascurabile. Questa opinione ebbe il favore dei meteorologi durante almeno 50 anni. Nel *Compendium of Meteorology* dell'American Meteorological Society del 1951 si legge<sup>7</sup>: "the idea that adding CO<sub>2</sub> would change the climate was never widely accepted and was abandoned when it was found that all the long-wave radiation [that would be] absorbed by CO<sub>2</sub> is [already] absorbed by water vapor." Ancora all'inizio del ventesimo secolo, questo è l'opinione di quelli che chiamerò increduli, che non credono che

l'uomo sia responsabile dell'aumento della temperatura, presente e forse futura. « Comment un système si complexe que le climat aurait-il comme seul facteur cardinal le CO2 dont la teneur est 300 parties par million » alors que la vapeur d'eau « qui est de loin le plus important gaz à effet de serre » atteint des concentrations de « 4% en moyenne dans la zone tropicale » ? chiede

il Professor Claude Allègre<sup>2</sup>, geologo di fama mondiale, capo degli increduli francesi ed ex-ministro. È la stessa domanda già fatta un secolo prima da Angström.

Prima di andare più avanti, conviene ricordare che, in questo anno 2007, gli increduli sono diventati una minoranza, ma hanno ancora qualche successo presso qualche decisionista politico ed economico. Esempi sono il Presidente ceco Vaclav Klaus, Mariano Rajoy, capo del Partido Popular spagnolo, e fino al 2006 il Presidente statunitense George Bush. Nella presente nota voglio esaminare alcuni degli argomenti degli increduli.

Riguardo alle proporzioni di acqua e di gas serra (il più importante essendo il biossido di carbonio) si può rispondere quanto segue. 1) Le lunghezze d'onda che sono assorbite dall'acqua e dai gas serra non coincidono esattamente. 2) Un aumento della concentrazione di biossido di carbonio non ha soltanto un effetto diretto sulla temperatura, ma questo aumento di temperatura aumenta la concentrazione di vapore d'acqua e quindi la temperatura aumenta ancora più. Questo effetto di "retroazione" era già presente nel calcolo di Arrhenius. 3) Mentre la concentrazione di biossido di carbonio è molto più bassa della concentrazione di vapore acqueo a bassa altitudine, non è così ad alta altitudine, dove l'aria è molto fredda e il vapore acqueo non c'è. Al di sopra di 6000 metri circa, il biossido di carbonio è più abbondante.

Conviene insistere su quest'ultimo punto, perché non è ovvio il ruolo dei vari strati dell'atmosfera. L'energia emessa dalla terra deve attraversare tutta la troposfera (cioè la parte dell'atmosfera al di sotto dei 10000 o 11000 metri di altezza) prima di raggiungerlo spazio. La fuga finale si fa tramite la luce infrarossa. Ma, come i meteorologi sanno bene, il trasporto dell'energia dalla bassa atmosfera alla tropopausa (cioè il confine della troposfera) si fa in

maggior parte tramite la convezione. È interessante citare alcune righe di Enrico Fermi<sup>10</sup> nelle quali spiega perché fa freddo nelle montagne: "La ragione principale di questa variazione della temperatura con l'altezza sul livello del mare risiede nell'esistenza di correnti di convezione nella troposfera, correnti che trasportano continuamente aria dalle regioni più basse alle più alte e dalle regioni più alte alle più basse. Quando l'aria sale dal livello del mare a regioni superiori di minor pressione, essa si espande. Poiché l'aria è un cattivo conduttore di calore, ben poco calore è scambiato con l'aria circostante da quella che si sta espandendo, così che possiamo ritenere adiabatica l'espansione. Conseguentemente la temperatura dell'aria diminuisce." Può darsi che Fermi abbia sottovalutato il trasporto dell'energia tramite la radiazione. Un esercizio interessante è il calcolo di quanto sarebbe la temperatura terrestre se fosse determinata dalla sola radiazione, cioè nell'assenza di convezione<sup>11</sup>. Si ottiene una temperatura al suolo più

calda di quello che è nella realtà<sup>7</sup> (sono 20 gradi di troppo). Invece, funziona piuttosto bene l'ipotesi dell'"equilibrio adiabatico", cioè l'aria ad altezza  $z$  ha la temperatura  $T(z)$  ottenuta prendendola al suolo a temperatura  $T(0)$  e portandola adiabaticamente all'altezza  $z$ . Si ottiene un gradiente  $dT/dz$  costante, un po' minore di 1 grado Celsius ogni 100 metri. Questo risultato è in accordo qualitativo con l'osservazione<sup>12</sup> di un gradiente medio di 0,007 °C/m, ignorando però forti fluttuazioni locali.

In questa descrizione approssimativa, i gas serra hanno poco effetto sulla differenza fra le temperature al suolo e alla tropopausa, poiché la convezione non dipende da questi gas. Ma un aumento della loro concentrazione a grande altezza aumenta la temperatura negli strati alti della troposfera, e quindi anche al suolo. Si capisce dunque che questo aumento possa essere piuttosto grande, anche se il suo valore preciso può soltanto essere ottenuto tramite potenti calcolatori.

Le correnti di convezione, che sono tanto importanti, possono avere una struttura molto stabile. Tali sono le "celle di Hadley", grandi circuiti che portano il calore dall'equatore a regioni meno

soleggiate. Ma la convezione può anche essere “caotica”, cioè sensibilissima a piccole perturbazioni: alla presenza di una farfalla, come si dice con qualche esagerazione. Questa sensibilità fu dimostrata nel 1963 in modo elegante dal meteorologo Edward Lorenz<sup>13</sup> tramite un modello di convezione molto semplificato fatto di tre equazioni. A causa di questa proprietà della convezione, la previsione meteorologica è impossibile al di là di alcuni giorni.

### **Imprevedibilità meteorologica, prevedibilità climatologica?**

Per gli increduli è un altro motivo di dubbio. Come mai i climatologi possono fare predizioni su 100 anni mentre i meteorologi sbagliano su alcuni giorni?

"Si nadie sabe que tiempo hará mañana en Sevilla ¿Cómo van a decir lo que va a pasar en el mundo dentro de 300 años?" chiede Mariano Rajoy, capo del Partido Popular spagnolo nell'ottobre 2007.

« J'ai peine à croire qu'on puisse prédire avec précision le temps qu'il fera dans un siècle alors qu'on ne peut pas prévoir celui qu'il fera dans une semaine » osserva il Professor Claude Allègre<sup>2</sup>.

A una domanda simile fatta da un incredulo meno illustre, la risposta fu data da tre eminenti climatologi<sup>14</sup>; non su una rivista specializzata, ma su “Le Monde”, cioè un giornale letto da molti cittadini:

« La difficoltà delle previsioni meteorologiche risulta primariamente della sensibilità dei modelli alle condizioni iniziali.... Non c'è niente di simile per il clima medio, che viene determinato a scadenza di dieci o cento anni dal bilancio energetico globale della pianeta e dagli scambi di energia nell'atmosfera e negli oceani.»

Il ruolo della sensibilità alle condizioni iniziali (o a deboli perturbazioni) nella climatologia meriterebbe forse una spiegazione più dettagliata, che adesso proverò ad abbozzare, anche se un climatologo potrebbe farlo con maggiore competenza. È chiaro che la meteorologia deve prevedere eventi precisi, dove e quando capiteranno, mentre lo scopo della climatologia è la previsione di quantità medie e di probabilità. Il meteorologo deve prevedere se piovierà a Milano il prossimo lunedì, il climatologo deve per esempio prevedere la quantità media d'acqua all'anno, e magari la fluttuazione di questa quantità. Nel primo caso, la sensibilità a deboli perturbazioni è estrema. Ciò non è contrario all'esistenza di valori medi e leggi di probabilità poco sensibili a perturbazioni. Questa insensibilità è, se capisco bene, un postulato. Questo postulato può fino a un certo punto essere verificato dai modelli climatologici, che includono (in un modo poco realistico) la convezione e altri movimenti fluidodinamici, che possono essere caotici. Ma non si può escludere che deboli perturbazioni possano avere un'influenza sull'evoluzione irreversibile di fenomeni oceanici come il Gulf Stream o El Niño, che sono componenti importanti del clima. Allo stato presente della scienza climatologica, possibili effetti caotici probabilmente non debbono essere la preoccupazione maggiore che sono per il meteorologo.

### **Gli eventi estremi**

Nel cambiamento climatico dell'anno 2000, non c'è soltanto il riscaldamento, ma anche un aumento degli eventi “estremi” che sono le canicole, i diluvi, le siccità, gli uragani. Anche per questi fatti si sospetta che le attività umane possano avere una responsabilità<sup>15</sup>. La probabilità che sia così è, secondo il GIEC, “*more likely than not*”, cioè fra il 50% e il 66%. Questa prudenza contrasta con la quasi certezza dimostrata dal GIEC quando si tratta del riscaldamento: “Most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is *very likely* due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations”.

Per quanto riguarda il riscaldamento, l'identificazione di meccanismi fisici semplici rende molto plausibile la responsabilità umana. Invece, non c'è nessun fenomeno bene identificato

che possa legare l'attività umana e gli eventi estremi. Avremmo voglia di ricercare qualche meccanismo semplice, magari legando eventi estremi e gradienti di temperatura. Questo argomento compare nel libro di Allègre<sup>16</sup>, che osserva che il riscaldamento dovuto al CO<sub>2</sub> è previsto maggiore ai poli; la differenza fra l'equatore e i poli potrebbe quindi diventare minore, così diminuendo la frequenza delle tempeste. Questa idea è probabilmente troppo semplice, ma non è in contraddizione con certi risultati delle simulazioni al computer. Ad esempio, secondo Bengtsson *et al.*<sup>17</sup> (che, al di là del loro lavoro numerico, propongono qualche spiegazione fisica più sottile del meccanismo di Allègre) i cicloni tropicali potrebbero diventare più rari... ma più violenti.

In assenza di meccanismi fisici identificati, molta speranza è riposta sui computer. Un esempio è l'ondata di caldo dell'estate 2003, simulata con diverse ipotesi tenendo o non tenendo in conto l'effetto delle attività umane<sup>18</sup>. I risultati rafforzano il sospetto sulla responsabilità umana in questo evento.

Probabilmente, in questo anno 2007, siamo all'inizio di un periodo di ricerca dove si raccolgono fatti, calcoli, riflessioni. A tempo debito, questo materiale sarà pronto per una sintesi. Adesso, la situazione è bene riassunta dal giudizio del GIEC secondo il quale la responsabilità umana negli eventi estremi è "more likely than not".

### **Altri problemi, altre difficoltà.**

Una valutazione quantitativa dell'influenza dell'attività umana sul clima dovrà ancora soddisfare alcune condizioni e alcuni test. Tali problemi sono studiati in grande dettaglio nella relazione del GIEC<sup>1</sup>.

Un esempio di difficoltà da sormontare è l'effetto delle nuvole, che non è ancora ben capito. Non è nemmeno chiaro se la retroazione delle nuvole all'aumento della concentrazione in gas serra sia positiva o negativa.

Un esempio di test è la spiegazione del clima del passato. Non capiamo bene il clima degli ultimi 2000 anni, i cui dettagli sono ben noti, almeno per l'Europa. Invece, capiamo bene le glaciazioni, fenomeni più antichi ma di grande ampiezza. La prima intenzione di Arrhenius<sup>8</sup>, quando studiava l'influenza del CO<sub>2</sub>, era di spiegare le glaciazioni. Adesso sappiamo che la prima causa delle glaciazioni si trova invece nelle variazioni periodiche di tre parametri astronomici identificati da Milanković<sup>19</sup> nella prima metà del ventesimo secolo. Arrhenius aveva però in parte ragione, perché la retroazione dovuta al CO<sub>2</sub> aumenta la temperatura durante i periodi interglaciali<sup>20</sup>.

Questi esempi, fra altri, dimostrano che siamo ancora lontani dal capire completamente i meccanismi del clima e la sua interazione con l'uomo, ma che la climatologia ha ottenuto chiari successi che si inseriscono nel quadro di una descrizione coerente nella quale il ruolo dell'uomo non è trascurabile. Per una valutazione quantitativa dell'evoluzione prevedibile del clima (compresa l'incertezza) la sorgente più affidabile è la relazione del GIEC, dalla quale è ricavata la tabella 1. Si vede che le previsioni sono poco precise. Infatti, per un "scenario" definito, cioè un certo grado di sapienza dell'umanità, c'è un rapporto 3 fra la stima più pessimista e quella più ottimista! Questo rapporto è stabile dalla precedente relazione del GIEC nel 2002. Negli ultimi anni, gli esperti hanno soprattutto provato a includere il massimo numero di fenomeni nei modelli, e questa inclusione non ha ridotto la larghezza della distribuzione di probabilità.

Scenario	Aumento della temperatura dal 2000 al 2100		Aumento del livello del mare dal 2000 al 2100
	Media della valutazione	Valori estremi possibili	
Concentrazione di gas serra			

costante dall'anno 2000	0,6°C	0,3 a 0,9°C	non apprezzabile
Scenario B1	1,8°C	1,1 a 2,9°C	0,18 à 0,38 m.
Scenario B2	2,4°C	1,4 a 3,8°C	0,20 à 0,43 m.
Scenario A2	3,4°C	2,0 a 5,4°C	0,23 à 0,51 m.
Scenario A1FI	4,0°C	2,4 a 6,4°C	0,26 à 0,59 m.

Tabella 1. Previsioni di diversi modelli per diversi scenari (secondo la tabella SPM.3 della relazione del GIEC<sup>1</sup>). I diversi scenari corrispondono a diversi gradi plausibili di inquinamento.

## Conclusioni

Abbiamo esaminato qualche aspetto del cambiamento climatico e i fenomeni fisici che possono farlo dipendere dall'attività umana. Non abbiamo discusso le soluzioni al problema, che sono trattate nei volumi II e III della relazione del GIEC.

Abbiamo discusso alcuni argomenti degli "increduli" che negano l'influenza dell'uomo sul clima. La risposta a tali argomenti è forte, quasi una confutazione. Al contrario, gli increduli non sono riusciti a convincere gli esperti che il cambiamento climatico del 2000 possa essere spiegato da cause naturali. Qualche discussione si è persino svolta in diverse adunanze dell'Académie des Sciences di Francia ed è stata riportata in dettaglio da diversi giornali, che conclusero che gli increduli avevano perso la battaglia<sup>21</sup>.

Gli increduli sono però utili, perché frenano le affermazioni troppo frettolose di chi volentieri dimenticherebbe l'enorme incertezza che compare nella tabella 2. Un'occhiata a Internet basta per constatarlo<sup>22</sup>.

Il GIEC fa invece un'analisi equilibrata. Si capisce bene che la collaborazione mondiale di tanti scienziati e responsabili politici non possa portare all'estremismo. La meraviglia è che non ha portato a parole vuote. Ha portato a una valutazione precisa di ciò che sappiamo e non sappiamo. Altra meraviglia è che il dibattito è pubblico. I documenti del GIEC sono in accesso libero su Internet, sono scritti in modo didattico, presentati in uno stile gradevole. Oltre il GIEC, come si vede dall'indice bibliografico, altri esperti di climatologia sono pronti a mettere la loro competenza a disposizione del pubblico, tramite Internet o qualche giornale, o Caffè-Scienza.

Questo dialogo è esemplare. Potrebbe essere un modello per altri dialoghi politico-scientifici, ad esempio sugli organismi geneticamente modificati, argomento di una discussione dove i protagonisti si parlano, ma spesso non si ascoltano. Sul clima c'è anche qualcuno che non ascolta l'altro, ma esistono sorgenti di informazione obiettive che permettono al cittadino di farsi un'opinione. Lo scopo di questo contributo è di aiutarlo.

## Indice bibliografico

1. GIEC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA). Libero accesso per Internet (<http://www.ipcc.ch>)
2. Allègre, C. (2007). *Ma vérité sur la planète* (Plon, Paris)
3. Appello di 21 scienziati italiani (2007): Facciamo chiarezza sui cambiamenti climatici globali ([http://www.conferenzacambiamentoclimatici2007.it:80/site/IT/Archivio/Primo\\_piano/Documenti/facciamochiarezza.html](http://www.conferenzacambiamentoclimatici2007.it:80/site/IT/Archivio/Primo_piano/Documenti/facciamochiarezza.html)).
4. L'evoluzione della temperatura terrestre media dal medio ottocento è data dalla Figura 1.3 del riferimento 1, p. 101.
5. L'evoluzione della concentrazione atmosferica in CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dans l'atmosfera nelli 2000 ultimi anni è data dalla Figura FAQ 2.1 del riferimento 1, p. 135.
6. Navarra, A., Pinchera, A. (2000) *Il clima* (Laterza, Bari).
7. Weart, R.S. (2003). *The Discovery of Global Warming*. (Harvard University Press). [http://www.aip.org/history/climate/co2.htm#N\\_10\\_](http://www.aip.org/history/climate/co2.htm#N_10_)
8. Arrhenius, S. (1896) *On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground*. Philosophical Magazine **41**: 237.
9. Ångström, K. (1900). "Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäures bei der Absorption der Erdatmosphäre." *Annalen der Physik* **4**, 720-32.
10. Fermi, E. (1972) *Termodinamica* (Boringhieri, Torino)
11. La teoria del trasporto dell'energia tramite la radiazione in un mezzo senza convezione è riassunta da Balian, R., Blaizot, J.P. (1999) Stars and statistical physics: A teaching experience, *Am. J. Phys.* **67**, 1189. Se i fotoni hanno un libero cammino  $L$  indipendente della lunghezza d'onda, la corrente di energia è data dalle formule (76, 77, 78) come  $\mathbf{j} = -(4/3)\sigma L T^3 \mathbf{grad} T$ , dove  $\sigma$  è la costante di Stefan e  $T$  la temperatura locale. Questa equazione fornisce una descrizione semplice, ma approssimativa del trasporto dell'energia tramite la radiazione nell'atmosfera nell'assenza di convezione. Il valore di  $L$  dipende dall'altezza, nella bassa atmosfera è dell'ordine di 30 metri per le lunghezze d'onda di facile assorbimento.
12. Pech, P., Régnault, H. (1992) *Géographie physique*, Paris, PUF. [http://crdp.ac-amiens.fr/edd/air/air\\_maj\\_detail\\_p1.htm](http://crdp.ac-amiens.fr/edd/air/air_maj_detail_p1.htm)
13. Lorenz, E.N. (1963) *J. Atmos. Sci.* **20**, 130 ([http://it.wikipedia.org/wiki/Attrattore\\_di\\_Lorenz](http://it.wikipedia.org/wiki/Attrattore_di_Lorenz))
14. Jouzel, J., Talagrand, O., Le Treut, H. (2007) *Le Monde*, 12 février
15. Nell' "appello di 21 scienziati italiani"<sup>3</sup> si legge: "Si attende, con un elevato grado di probabilità un ulteriore aumento della temperatura e dei fenomeni generalmente ascritti ai cambiamenti climatici, ad esempio: variazione del regime delle precipitazioni con un aumento delle intensità di pioggia; aumento di fenomeni quali piene in autunno o inverno, siccità in primavera ed estate, ondate di calore, incendi."
16. Pagina 111 del libro di Allègre <sup>2</sup>.
17. Bengtsson, L., Hodges, K. I. and Esch, M. Keenlyside, N., Kornblueh, L., Luo, J.-J., Yamagata, T. (2007). *How may tropical cyclones change in a warmer climate?* *Tellus* **59A**, 539. Libero accesso su <http://www.blackwell-synergy.com/toc/tea/59/4>
18. Pagina 693 della relazione del GIEC <sup>1</sup>.
19. Milankovitch, M. (1930). "Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Kilimaschwankungen." In *Handbuch der Klimatologie*, edited by W. Köppen and R. Geiger, Vol. **1**, Pt. **A**, pp. 1-176. (Borntraeger, Berlin).
20. Pagina 449 e capitolo 6 della relazione del GIEC <sup>1</sup>.
21. Foucart, S. (2007) *Le Monde*, 15 marzo
22. Un esempio di esagerazione compare nell'appello di 21 scienziati<sup>3</sup> nel quale si legge: *Il recente rapporto dell'IPCC reso noto all'inizio del 2007 non lascia dubbi sul consenso del mondo scientifico circa il ruolo delle responsabilità umane nel provocare i cambiamenti climatici: "L'incremento globale della concentrazione di biossido di carbonio è principalmente dovuto all'uso di combustibili fossili e ai cambiamenti nell'utilizzo dei suoli..."*. È vero che la causa dell'aumento in gas serra è umana... ma le "responsabilità umane nel provocare i cambiamenti climatici" sono soltanto "likely", secondo il GIEC, *alias* IPCC (Tabella SPM2 <sup>a</sup>).

Ringrazio il Dottor Paolo Politi, che mi ha comunicato alcune preziose informazioni.