



Guido Barone
Dipartimento di Chimica
Università di Napoli "Federico II"
baroneg@unina.it

I FATTORI CHE REGOLANO IL CLIMA SEGUONO DIFFERENTI SCALE TEMPORALI

Tra i parametri che hanno determinato il clima terrestre e le sue variazioni durante l'ultimo milione di anni, alcuni sono prevalenti alla scala delle centinaia di migliaia di anni (fattori astronomici: oscillazioni dell'orbita e dell'asse terrestre), altri alla scala delle centinaia o migliaia di anni (oscillazioni dell'attività solare e variazioni dell'effetto serra). L'insieme di questi fattori provoca una sostanziale bistabilità del clima terrestre. D'altra parte il recente contributo di origine antropica all'effetto serra sta forzando le oscillazioni climatiche attuali.

I fattori astronomici

Oggi sono disponibili dati diretti o informazioni deducibili da varie fonti scientifiche (geologiche, biologiche e astrofisiche, oltre che chimiche) abbastanza affidabili che consentono con buona approssimazione di combinare modelli e teorie fino a circa un milione di anni fa.

Milankovich [1] aveva ipotizzato che fossero 3 i fattori astronomici che regolano con cadenze di circa 110 mila anni i cicli glaciali. Le orbite e gli altri moti dei pianeti del sistema solare hanno raggiunto nel corso dei primi miliardi di anni una stabilità prevalente, con delle oscillazioni quasi periodiche che, nel caso della Terra sono riassumibili:

- 1) nella variazione dell'eccentricità dell'orbita nel piano dell'eclittica (0,00-0,060; attualmente 0,017). Periodo circa 100 mila anni;
- 2) nell'oscillazione dell'inclinazione dell'asse terrestre (22,1°-24,5° attualmente è 23,345°; Eratostene aveva utilizzato 23,5° per calcolare il meridiano terrestre). Periodo circa 40 mila anni;
- 3) nella precessione degli equinozi (moto a trottola dell'asse terrestre). Periodo circa 22 mila anni.

Nella Fig. 1 sono visualizzati questi tre moti e i loro periodi. Le informazioni strumentali sulle variazioni della composizione nei principali gas serra (anidride carbonica e metano) si possono ricostruire fino a 890 mila anni fa dalle bollicine di aria intrappolate nelle carote estratte dai ghiacci antartici. Questi dati sono correlabili alle temperature medie attraverso l'analisi isotopica dell'ossigeno degli stessi ghiacci e dell'acqua di idratazione dei sedimenti oceanici [2-7]. L'analisi proveniente dal sito di Vostok, fino a 420 mila anni fa, è riportata da Petit *et al.* [4]. In Fig. 2 sono presentate le concentrazioni di CO₂ e CH₄ fino a 650 mila anni fa, correlate con le variazioni del rapporto isotopico ¹⁸O/¹⁶O nella neve caduta in quegli anni sul sito di Dome F e poi compattatisi e sprofondate sotto il peso degli strati accumulatisi nei secoli seguenti [5]. Si assume che nei periodi più freddi si depositi preferenzialmente neve contenente ¹⁸O e ciò dà una misura della T. Corrispondentemente l'acqua di idratazione nei sedimenti risulta più povera di ¹⁸O. Il progetto EPICA ha effettuato carotaggi nel sito Dome C dal 1996 ad oggi (dal 2005 vi opera la base italo-francese di Concordia). Qui sono state estratte carote di ghiaccio fino a 890 mila anni fa [6]. Risulta che mai la CO₂ ha superato 280-300

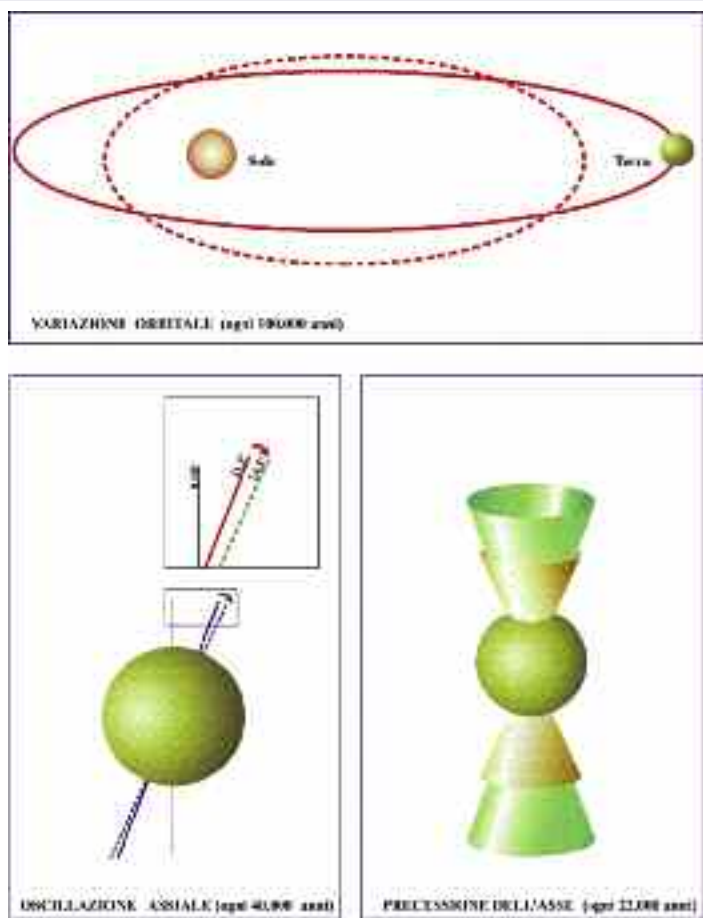


Fig. 1 - Le oscillazioni dei parametri astronomici che determinano l'alternarsi del clima tra i periodi glaciali e interglaciali

ppm, mentre oggi ha già superato la quota di 385 ppm (erano 280 alla fine del 1800, 315 nel 1957). Così il metano non ha mai superato 0,80 ppm mentre oggi ha superato 1,70 ppm. Il progetto ANDRILL sta estraendo sedimenti antichi di 20 milioni di anni dalla piattaforma conti-

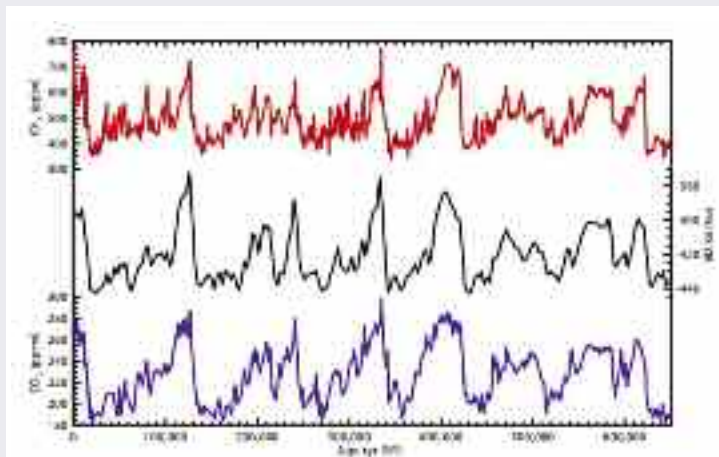


Fig. 2 - Valori delle concentrazioni di CO₂ e CH₄ all'interno delle bollicine di aria racchiuse nelle carote di ghiaccio estratte nel sito di Concordia in Antartide, risalente a 650 mila anni fa e paragonate alla stima delle variazioni del rapporto isotopico dell'ossigeno negli stessi ghiacci [5]

nentale sotto il mare di Ross [7]. Dalle indagini meteorologiche e geofisiche condotte dalle varie stazioni si sta infine chiarendo che l'Antartide si sta riscaldando, anche se con velocità differenti nelle varie aree.

La bistabilità a lungo termine del clima terrestre

Il clima terrestre può quindi essere rappresentato come un insieme di processi non lineari che combinati fra loro portano ad una sostanziale bistabilità, come già ipotizzato da Prigogine [8], e che questa scala dei tempi è regolata principalmente dai cicli di Milankovich. I meccanismi che innescano il passaggio da una fase all'altra sono in parte da chiarire. Un'ipotesi riguarda alcune combinazioni dei tre moti che portano ad una serie di stagioni estive con l'emisfero settentrionale all'afelio, quando l'insolazione alle alte latitudini Nord è relativamente modesta. In tal caso, nelle successive stagioni invernali, i ghiacci progrediscono sia dalla zona artica che dai ghiacciai continentali. Questi avvenimenti accadono periodicamente, ma quando i tre moti sono "in fase" inizierebbe un'era glaciale. L'Antartide può avere un ruolo importante, ma gli avvenimenti climatici dell'emisfero Sud spesso giocano in controtendenza. I processi si svilupperebbero con retroazione positiva: una volta avviatosi un periodo di stagioni fredde l'effetto si esalterebbe, bloccando il clima per decine di migliaia di anni. Quando invece si susseguono una serie di stagioni estive nell'emisfero boreale, con la Terra al perielio, si avrebbe la massima insolazione estiva e i ghiacci comincerebbero a regredire [3-9]. Anche in questo caso si avrebbe lo sviluppo di processi autoesaltanti: durante gli inverni la CO₂ di origine biologica o vulcanica non esplosiva si accumulerebbe in atmosfera e nella stagione successiva non verrebbe assorbita a sufficienza dalla fotosintesi. Inoltre al culmine delle glaciazioni l'accumulo di acqua nei ghiacciai terrestri lascerebbe scoperte parte delle piattaforme continentali. La diminuzione della pressione idrostatica potrebbe destabilizzare gli idrati sottostanti le piattaforme stesse, liberando il metano [10]. Si ricorda che per l'effetto serra il metano è 25 volte più efficiente della CO₂. Così si inizierebbe un periodo interglaciale (circa 18 mila anni). La sequenza è schematizzata in Fig. 3.

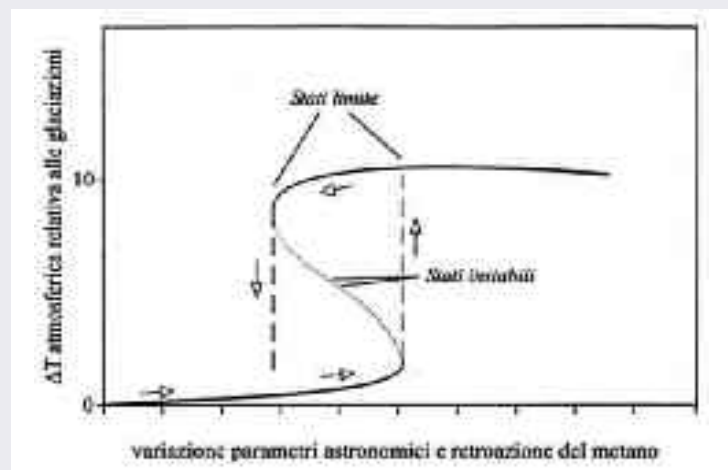


Fig. 3 - Bistabilità climatica

L'attività solare e il clima degli ultimi millenni

I fattori che hanno regolato il clima alla scala dei tempi storici, all'interno dell'attuale periodo interglaciale, sono invece legati all'attività solare di breve periodo. Essa interferisce anche con il clima attuale, ma negli ultimi 150 anni le variazioni dell'effetto serra, di origine essenzialmente antropica, sono diventate il fattore predominante, come cercheremo di dimostrare nel seguito. In realtà l'attività solare è caratterizzata da due gruppi diversi di fenomeni, cioè le emissioni elettromagnetiche "di corpo nero", pressoché costanti, e le emissioni di plasma ("vento solare") con andamento circa periodico. Lo spettro di emissione della radiazione solare obbedisce alla legge di Wien, che collega la lunghezza d'onda del massimo dell'intensità della radiazione emessa da un corpo λ_{max} con la temperatura T , con la velocità della luce c e con le costanti universali di Planck h e di Boltzmann k : $T\lambda_{max} = hc/5k$ e alla legge di Stefan-Boltzmann che lega la densità di potenza totale emessa W alla quarta potenza della temperatura T^4 : $W = \sigma T^4$ dove $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} (\text{K})^{-4}$. Poiché la T della fotosfera solare è di circa 5.600-5.700 K, il massimo di $W(\lambda)$ corrisponde ad una lunghezza d'onda λ_{max} del visibile (Fig. 4). La radiazione solare non penetra in modo uniforme nell'atmosfera terrestre: raggi γ , X e UV ad altissima frequenza sono riflessi o assorbiti dall'atmosfera terrestre e quindi "termalizzati" dalle molecole eccitate o ionizzate. Gas serra, vapor d'acqua, anidride carbonica, metano e altri, nonché in parte le nubi, formano le fasce opache che assorbono la radiazione infrarossa e in parte la riemettono verso lo spazio esterno. Questa stessa fascia di nuvole e gas non consente alla radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre di fuoriuscire, intrappolandone la maggior parte nella troposfera con la conseguente turbolenza dovuta all'energia cinetica accu-

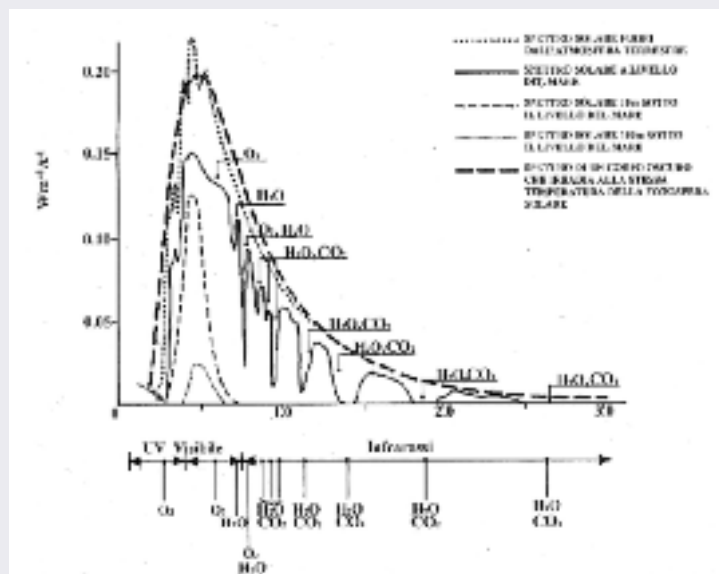


Fig. 4 - Viene riportata l'intensità dello spettro di emissione di un corpo nero, in funzione della lunghezza d'onda in μm , che si trovi alla temperatura della fotosfera solare, del reale spettro solare in un determinato periodo, della intensità della radiazione che perviene realmente sulla superficie terrestre a livello del mare, inoltre quella che penetra a 10 m e a 100 m sotto la superficie dell'acqua [2]

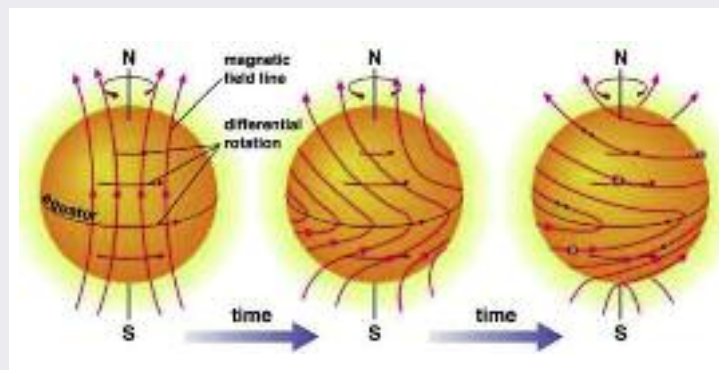


Fig. 5 - Rotazione differenziale [15]

mulatasi: è questo l'effetto serra. Esso ha consentito alla Terra di mantenersi ben lontano dall'equilibrio termico con lo spazio interplanetario: senza l'atmosfera la temperatura media della superficie sarebbe di soli 255 K. Ma oggi l'incremento dell'effetto serra, provoca il riscaldamento globale e una maggiore instabilità meteorologica.

Macchie solari e attività parossistica del Sole

Da Galileo in poi le macchie solari sono state studiate con i telescopi, ma esse erano già note ai Cinesi dal 500 a.C. Solo nel 1800 con gli studi di Wolf (1818-1893) e altri, si è catalogata la periodicità della loro apparizione e il loro movimento lungo il disco solare [11]. Risalendo fino al 1794, dai dati dell'Osservatorio di Zurigo, Wolf propose l'indice empirico $R = k(10g + f)$ dove f indica il numero totale di macchie presenti e g il numero di raggruppamenti di macchie vicine, mentre k è un fattore di normalizzazione. Fu così possibile individuare l'esistenza di un ciclo di circa 11 anni nell'attività solare, sia pure con qualche eccezione (8-17 anni) [12]. Questi cicli sono stati messi in relazione con le variazioni circa undecinali della temperatura media globale registrate negli ultimi 150 anni e con il periodo di freddo intensissimo 1640-1715, quando quasi tutte le macchie erano scomparse (minimo di Maunder). Le macchie solari appaiono oscure per contrasto, in quanto la loro temperatura è di 4.000-4.500 K, più bassa quindi di quella della cromosfera (5.600-5.700 K) che irradia la maggior parte della

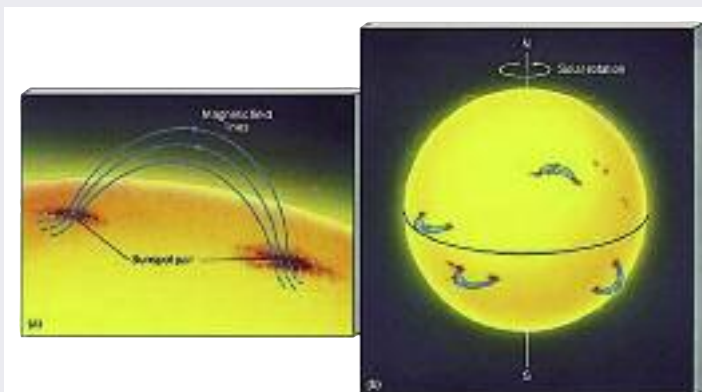


Fig. 6 - Formazione dei campi magnetici corrispondenti a una coppia di macchie solari [15]

radiazione visibile, IR e UV. L'assenza delle macchie testimonia un periodo di scarsa turbolenze della superficie solare e ciò comporterebbe aumenti negli stessi periodi della temperatura media della superficie terrestre dovuti alla sola emissione di corpo nero del Sole.

Parker e altri hanno collegato il fenomeno delle macchie a quello dei brillamenti, fenomeni parossistici di origine magnetica, con formazione di colonne di materia ad alta temperatura espulse a gran velocità. Il movimento delle macchie è legato alla rotazione differenziale della massa gassosa del Sole sul proprio asse (Fig. 5) [13]. Il movimento delle macchie, spesso magneticamente appaiate con il polo N che precede il S nell'emisfero settentrionale, è accompagnato dallo scorrere di questi intensi campi magnetici locali (migliaia di Gauss) paralleli all'equatore, per gli 11 anni di un ciclo (Fig. 6). Dopo circa 11 anni, si ha una convergenza e un rimescolamento totale con inversione delle polarità magnetiche nei due emisferi. Il ciclo completo dura quindi 22 anni, il doppio dell'indice di Wolf, ma la consuetudine è rimasta. I cicli si numerano così a partire dal primo (1749-1760). Ora è in corso il 24° e durante il 23° si sono avuti massimi di attività nel 2000 e nel 2003 [14].

Oggi, utilizzando alcune sonde spaziali dedicate (come la SOHO e la Ulysses) [15, 16], si stanno studiando le *onde di Alfvén* (perturbazioni meccanico-sonore all'origine delle attività parossistiche) estese a interi emisferi. Le linee di forza dei campi magnetici locali fuoriescono perpendicolarmente dalla superficie con risalita dalla cromosfera verso la corona di grandi flussi di plasma (protoni e altri nuclei ionizzati e elettroni accelerati) (Fig. 7). Queste "Eiezioni Coronali di Massa" (ECM o CME) si incurvano a formare grandi archi che intrappolano plasma a molti milioni di gradi Kelvin (Fig. 8). La riconnessione fra i campi magnetici di polarità opposta al culmine degli archi o anelli porterebbe



Fig. 7 - Formazione di un brillamento [15]

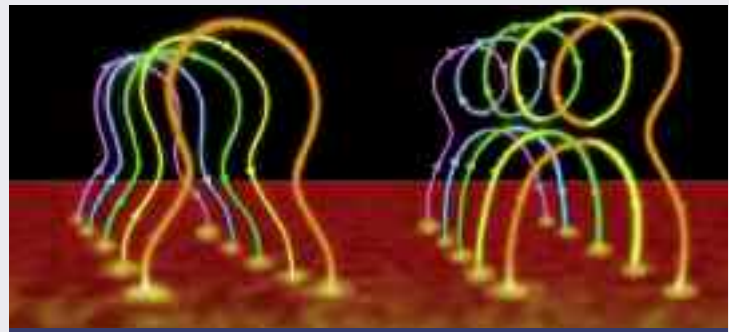


Fig. 8 - Riconnessione magnetica con emissione di bolle di plasma [18]

al loro reciproco annichilimento con liberazione di grandissime quantità di energia [17-19]. Spesso però "bolle" di plasma vengono proiettate nello spazio assieme a raggi X e UV ad altissima frequenza, che procedono per impulsi di onde sferiche dalla zona di emissione, mentre il plasma accelerato si muove prevalentemente in direzioni perpendicolari alla superficie solare. Per fortuna il "vento solare" non colpisce frequentemente l'atmosfera terrestre, data la direzionalità dell'emissione. Negli episodi meno intensi il sia pur debole campo magnetico terrestre devia gran parte delle particelle cariche oltre le fasce di Van Allen. La "bolla" di plasma si perde così nello spazio. Il vero pericolo si presenta nelle zone polari e di alta latitudine, dove le linee di forza del campo magnetico terrestre divergono, consentendo l'ingresso del vento solare sin quasi in superficie, dando luogo alle aurore boreali e a disturbi nelle comunicazioni. Lo schiacciamento delle fasce di Van Allen e la penetrazione del vento solare nell'alta atmosfera sono frequenti negli episodi più gravi di impatto. La magnetosfera terrestre viene compressa, la magnetopausa si può abbassare fino a 7.000 km e le fasce di Van Allen spazzate via. A loro volta l'alta atmosfera e la stratosfera assorbono, trasformano e ritrasmettono verso lo spazio le radiazioni più pericolose. Ma una buona parte dell'energia viene convertita in energia cinetica della molecole, ioni e radicali atmosferici. È attraverso questi meccanismi che si carica di energia l'alta e di seguito la bassa atmosfera e quindi la temperatura media si può innalzare di alcuni decimi di grado. Inoltre se le particelle di plasma emesso sono polarizzate con lo spin opposto a quello del campo magnetico terrestre, si hanno dei fenomeni di "riconnessione magnetica" dei campi, sia frontalmente all'atmosfera sia alle spalle della Terra. In tal caso si hanno grandi emissioni di energia magnetica che accelerano le particelle ionizzate e si hanno correnti indotte di ritorno nell'atmosfera, con formazione di aurore persino nelle zone intertropicali [18].

Dagli archivi cinesi ed estremo orientali è possibile ricostruire fino a circa l'anno 1000 la presenza o meno di grandi macchie solari [12]. Spörer poté così individuare un altro minimo tra il 1400 e il 1510, mentre tra il 1100 e il 1300 vi è stato un infittirsi delle manifestazioni solari, in un periodo in cui certamente vi fu un aumento di temperatura (il massimo medioevale). Il contenuto in ^{14}C negli anelli di accrescimento degli alberi, consente di avere non solo un'idea del clima anno per anno (testimoniato dalle dimensioni degli anelli stessi), ma anche della intensità della attività solare totale. De Vries e altri hanno ricondotto la

maggior concentrazione del ^{14}C nei minimi di Maunder e Spörer ad un mancato effetto protettivo, per l'assenza del vento solare, nei confronti dei raggi cosmici, responsabili della formazione del ^{14}C in alta atmosfera (vi è un ritardo di circa 40 anni tra la formazione del ^{14}C sotto forma di CO_2 in alta quota e la sua inclusione attraverso la fotosintesi clorofilliana nei tronchi arborei) [12]. Incrociando questi dati e utilizzando l'analisi condotta su alberi estremamente longevi si è potuto risalire almeno fino a 5.000 anni fa: sono stati individuati ben 12 periodi di 50-100 anni con massimi di concentrazione del ^{14}C riconducibili a minimi nell'attività parossistica del Sole. Questi episodi spiegherebbero alcuni dei periodi "freddi" che si sono alternati ai periodi "caldi" (corrispondenti all'epoca romana e prima ancora agli anni 2700-1500 a.C. e 5800-4000 a.C. gli "optimum climatici" dell'olocene). Purtroppo questo raffronto oggi non è possibile perché i valori della concentrazione del ^{14}C nell'atmosfera sono inficiati dalla diluizione rappresentata dalla immissione di grandi quantità di CO_2 da combustione carbone e olii fossili, poveri di ^{14}C (effetto Suess) [12].

Combinando le variazioni dell'attività solare, dell'effetto serra e altri fattori

Durante il ritiro dei ghiacci nordamericani (11 mila anni fa) si ebbe l'episodio del Dryas recente: l'acqua di fusione non venne più drenata dal Lago Agassiz, che le convogliava nel sistema Mississippi-Missouri, ma si aprì lo sbocco verso Est del San Lorenzo. L'afflusso improvviso e massiccio di acque fredde e dolci ridusse la salinità e la densità delle acque nord atlantiche impedendone l'affondamento. Il "nastro trasportatore atlantico" si bloccò e la corrente calda del Golfo deviò a Sud verso le coste africane. Tutte le regioni intorno al Nord Atlantico subirono un forte raffreddamento. I ghiacci avanzarono nuovamente fino al Mediterraneo. Nella Fig. 9 la coltre di ghiacci di ritorno è mostrata tratteggiata [3]. Un possibile rallentamento della corrente del Golfo potrebbe portare nuovamente ad una piccola glaciazione.

Venendo a tempi più recenti, si può osservare, dall'andamento delle temperature medie globali ottenute da registrazioni estese e affidabili



Fig. 9 - Il ritorno dei ghiacci sulle regioni Nord Atlantiche durante l'episodio del Dryas recente [3]

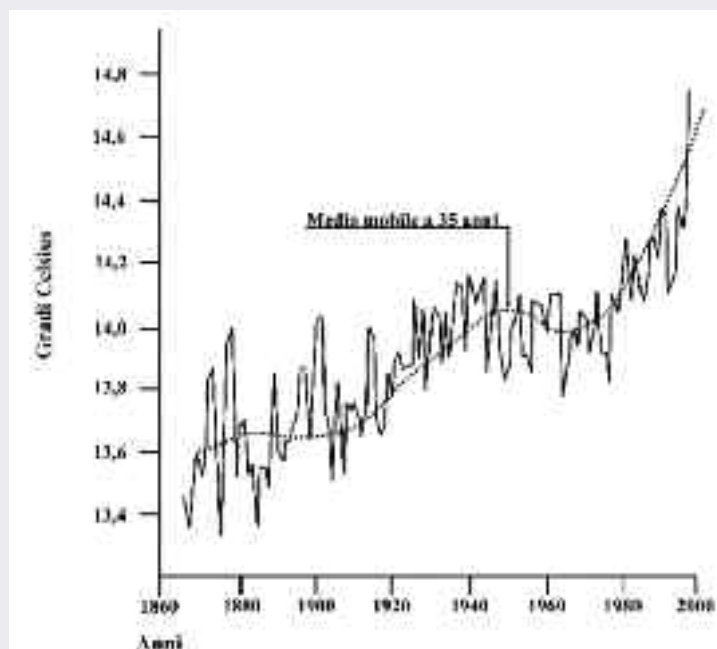


Fig. 10 - Variazione della temperatura media terrestre, riadattata da [30]

a partire dal 1860, che vi è una crescita della temperatura media negli ultimi 150 anni di oltre $1\text{ }^\circ\text{C}$, anche se oscillante in corrispondenza dei cicli circa undecimali dell'emissione solare totale. I dati sono stati depurati dall'effetto delle isole di calore delle città in espansione [20, 21]. Con un'interpolazione a media mobile a 35 anni (Fig. 10) mostriamo che è possibile separare l'effetto dell'attività solare dal riscaldamento progressivo e individuare alcuni brevi periodi di apparente decrescita della temperatura corrispondenti a fenomeni di origine terrestre, come grandi eruzioni vulcaniche che operano come forzanti di raffreddamento [22] come quella del Pinatubo nel 1991, del Krakatoa (1883) e del Tambora (1815): le enormi colonne di ceneri sottili rimasero in sospensione nella stratosfera per alcuni anni prima di ricadere al suolo. Viceversa fenomeni di perturbazione degli scambi oceano-atmosfera (come l'episodio del Niño del 1998) possono spiegare dei massimi particolarmente elevati nella temperatura media globale. Il 2008 dopo molti anni è stato povero di macchie solari, cosa confermata dai primi mesi del 2009, indicando un periodo di calma che potrebbe preludere ad un decennio relativamente fresco. D'altra parte non è possibile dire se questa calma si protrarrà nei prossimi anni e per quanto tempo: ogni speculazione su singoli inverni rigidi, come su ogni estate molto calda, è destituita di ogni base scientifica. È possibile comunque che l'attuale ciclo solare sia particolarmente poco attivo, ma il riscaldamento globale da effetto serra prenderà quanto prima il sopravvento, anche per l'incremento del metano in atmosfera, liberato dalla decomposizione degli idrati sottostanti il permafrost e le piattaforme continentali [10]. Un'analisi critica molto recente [23, 24] ha mostrato l'esistenza di un errore sistematico nei dati riportati della temperatura media globale a cavallo degli anni '40-'50, con sovrastima delle T oceaniche. Questa correzione potrebbe spiegare la piccola discrepan-

za riscontrata per quegli anni tra le simulazioni effettuate dalla IPCC e altre agenzie e i dati sperimentali.

Conclusioni

Nell'ultimo milione di anni le variazioni climatiche terrestri sono state regolate da fattori predominanti riassumibili, a seconda della scala dei tempi, nei fattori astronomici (che determinano le glaciazioni e i periodi interglaciali), nelle variazioni dell'attività solare totale e nell'effetto serra naturale. Gli ultimi possono essere considerati come fattori modulanti, i primi e non determinanti nel lungo periodo. Il contributo antropico sta però forzando il clima attuale ed è un fenomeno del tutto nuovo nella storia naturale. È una ragionevole assunzione che per diversi decenni continuerà la tendenza al riscaldamento globale, anche se alternato da un periodo più fresco. In conseguenza vi saranno numerosi effetti negativi: prima di tutto un aumento della desertificazione delle aree temperate mediterranee, un ritiro dei ghiacciai alpini e una forte diminuzione della disponibilità di acqua per l'irrigazione

e per le necessità idriche delle popolazioni di queste regioni. Al contrario le precipitazioni aumenteranno nell'Europa continentale con rischi continui di alluvioni. Vi sarà una crescita contenuta del livello dei mari in concomitanza con la dissoluzione dei ghiacci continentali e quindi il pericolo di sommersione per i paesi rivieraschi e per le isole oceaniche basse, anche per l'aumento di fenomeni atmosferici estremi. Infine la possibilità di intrusione di acque salmastre nelle falde acquifere [25]. Le interpretazioni scientifiche sulle oscillazioni climatiche qui riprese sono già presenti e condivise in letteratura. Rigettare aprioristicamente queste tesi costituisce una posizione antiscientifica che tende a divulgare l'idea della immutabilità e aleatorietà dei fenomeni naturali, per far accettare lo *status quo* come unico possibile. L'attività solare non può essere certo controllata, ma gli effetti a breve termine dei fattori contrastanti che abbiamo discusso richiederanno delle politiche concertate a livello internazionale e investimenti in ricerche e formazione per lo sviluppo di tecnologie energetiche innovative, che potrebbero anche aiutare a superare l'attuale crisi economica mondiale.

Bibliografia

- [1] M. Milankovich, *Konig Serb. Academ., Spez. Pubbl.* 132 *Sekt. Math. Nat. Wiss.*, **33**, 1941.
- [2] C. Emiliani, *Planet Earth*, Cambridge University Press, 1992.
- [3] W.S. Broecker, G.H. Denton, *I fattori di controllo dei cicli glaciali*, *Le Scienze Quaderni*, 1998, **104**, 20.
- [4] J.R. Petit *et al.*, *Nature*, 1999, **399**, 429.
- [5] U. Siegenthaler *et al.*, *Science*, 2005, **310**, 1313.
- [6] R. Traversi *et al.*, *Nimbus*, 2005, **37-38**, 6.
- [7] T. Naish *et al.*, *EOS*, 2007, **50**, 88.
- [8] G. Nicolis, I. Prigogine, *Exploring the Complexity*, An Introduction, R. Piper GmbH & Co., 1987.
- [9] R.E. Benestad, *Solar activity and Earth's Climate*, Springer Verlag, 2006.
- [10] G. Barone, E. Chianese, *Methane hydrates: a Resource or a Climatic Threat?*, submitted 2009.
- [11] *La Scienza*, Il sistema solare, *La Biblioteca di Repubblica*, 2, 2005.
- [12] J.A. Eddy, *Historical evidence for the Existence of the Solar Cycle in The Solar Output and Its Variations*, O.R. White (Ed.), Colorado Ass. Univ. Press, 1977; Cfr.: *Le Scienze*, 1977, **109**, 54.
- [13] Riadattato da M. Rieke "Astr 250, a Tutorial Course on Fundamentals of Astronomy", Steward Observatory, Arizona, U.S. 2002.
- [14] S.F. Odenwald, J.L. Green, *Le Scienze*, 2008, **482**, 52.
- [15] W. Klaus *et al.*, *Astrophysical J.*, giugno 1998, **500**.
- [16] R.G. Marsden, E.J. Smith, *Ulysses, Solar Sojourner, Sky and Telescope*, 1996, **3**, 91.
- [17] E. Priest, T. Forbes, *Magnetic Reconnection*, Cambridge University Press, 2000.
- [18] G.D. Holman, *Le Scienze*, 2006, **454**, 48.
- [19] S. Linhui *et al.*, *Astrophysical J.*, 2004, **612**, 546.
- [20] J. Jäger, H.L. Ferguson (Eds.) *Climate Change: Science, Impacts and Policy*, Proc. of the 2nd World Climate Conference, Cambridge University Press, 1991.
- [21] IPCC. *Climate Change 2007. The Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press on line, 2007.
- [22] G. Barone, D. Fessas, G. Graziano, *A Phenomenological Study on the Combined Effect of Increasing Concentrations of Greenhouse Gases on the Global Warming*, in *Trends in Ecological Physical Chemistry*, L. Bonati *et al.* (Eds.), Elsevier, 1993, 127.
- [23] A. Zecca, L. Chiari, *Le Scienze*, 2009, **488**, 72.
- [24] D.W.J. Thompson *et al.*, *Nature*, 2008, **453**, 646.
- [25] F.S. Chapin, *The Scientist*, gennaio 2008, 36.

ABSTRACT

Climate Regulating Factors Follow Different Temporal Scales

Among all parameters determining the Earth's climate during the last million of years, some were predominant at the time scale of hundred thousand years (astronomical factors: Earth's orbit and axis oscillations), other at the time scale of centuries or milleniums (oscillations of the solar activity and variations of the green-house effect). This set of factors causes a substantial climate bistability. However the recent antropogenic contributions to the greenhouse effect are forcing at present the climatic changes.