



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*  
127° (2009), Vol. XXXIII, P. II, t. I, pp. 125-131

FRANCO PRODI\*

## **Cambiamenti climatici: cause naturali e cause antropiche**

Grande emozione essere qui nei luoghi di Francesco a parlare di madre Terra e delle variazioni del suo clima. Il prof. Mainardi ha parlato di variazioni dei viventi, *homo sapiens* incluso, e di evoluzioni biologiche e culturali. A me spetta di parlare della Terra, il pianeta che ospita la biosfera, e dei suoi propri cambiamenti. Ed è oggi anche, come è stato ricordato, giornata dell'aria, della sua qualità, ma anche della sua essenzialità, per molti viventi. Dunque ci focalizzeremo sull'atmosfera, che è proprio questo involucro d'aria che avvolge il pianeta e nella quale la realtà del clima principalmente si compie.

Se facciamo una carrellata veloce nel passato, dell'ordine delle centinaia d'anni, vediamo le variazioni della temperatura dell'aria al suolo, rispetto ad un valore medio del trentennio 1960-1990, derivata da misure fisiche, in tante stazioni meteorologiche su tutto il globo. L'andamento mostra, per gli ultimi due secoli, un aumento di circa sette decimi di grado per secolo di questo parametro, con accentuazione negli ultimi decenni. Andando a ritroso nel tempo ci troviamo subito privi delle misure fisiche (il termometro è nato con Galileo e con la scienza) e bisogna ricorrere a tanti indizi diversi: i documenti storici, gli anelli degli alberi, i sedimenti marini e lacustri, i carotaggi dei ghiacci antartici, ed a tutto l'armamentario della paleoclimatologia, ottenendone indicazioni sempre più incerte, come è ovvio, ma sulle quali c'è una certa concordanza fra gli scienziati specialisti. Così nell'ordine delle migliaia di anni troviamo le piccole glaciazioni del 1400-1700, l'optimum (caldo) medioevale. Nell'ordine delle decine di migliaia di anni, oscillazioni sempre più ampie della temperatura dell'aria, con massimo nell'olocene, mentre nell'ordine delle centinaia di migliaia di anni, aiutati principalmente dai carotaggi di ghiaccio

\* Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR ed Università di Ferrara.  
E-mail: f.prodi@isac.cnr.it

antartico, individuiamo periodi dell'ordine di quattrocentomila anni e sottoperiodi di circa centoventimila anni. Passando poi ai milioni e miliardi di anni possiamo mettere in relazione questo parametro con la disposizione delle terre emerse, la deriva dei continenti e la stessa storia del pianeta, anche prima che in questo avesse origine la vita. Ancora più ampie si rivelano le oscillazioni con due grandi glaciazioni e lunghi periodi di temperature elevate.

È naturale dare una causa o più cause a queste oscillazioni naturali. Le individuiamo descrivendo innanzitutto il sistema nei suoi due attori principali: Il sole e la terra, la «lampada» e «la palla» da biliardo. Nel vuoto i due si scambiano radiazione elettromagnetica. La lampada emette radiazione elettromagnetica centrata nel visibile, la palla emette radiazione infrarossa; radiazione che non vediamo ma che è altrettanto reale, come lo è il calore che sentiamo se avviciniamo la mano ad un ferro da stiro acceso.

Ci attendiamo che la temperatura di equilibrio della «palla», che riceve calore intercettando la luce visibile con la sua sezione come in disco e lo cede irraggiando infrarosso tutto intorno, si assesti su un valore che diminuisce se aumenta la distanza dalla «lampada», ovvero se la lampada perde di intensità. L'opposto ci aspettiamo se la distanza diminuisce e se la lampada aumenta l'intensità. La variazione della distanza palla-lampada viene chiamata «causa astronomica della variazione climatica», la variazione dell'intensità della lampada «causa astrofisica». Entrambe sono quindi cause naturali.

Il problema però si complica assai perché la palla è avvolta da un involucro gassoso, l'atmosfera appunto, che si comporta in modo selettivo per la radiazione che l'attraversa, assai benevola per la luce solare visibile che lascia passare quasi tutta, ma molto fiscale per quella infrarossa che dalla terra va verso lo spazio esterno, trattenendola con un «va e vieni» che ha come effetto il riscaldamento dell'atmosfera stessa (effetto serra). L'atmosfera infatti è composta anche da gas le cui molecole sono composte da tre o più atomi, che hanno bande di vibrazione e rotazione che assorbono ed emettono radiazione infrarossa: principalmente l'anidride carbonica, ma anche ozono, metano e lo stesso vapore d'acqua.

Se la terra fosse una sfera omogenea priva di atmosfera, tenendo costanti i dati esterni (energia in arrivo dal sole, distanza terra-sole), il problema sarebbe altamente semplificato: basterebbe eguagliare il flusso dell'energia solare intercettato dalla sfera (come un disco) a quello emesso dalla stessa verso lo spazio esterno in tutte le direzioni per ricavare la temperatura di equilibrio della sfera stessa. Ciò che impedisce di semplificare così il problema è appunto la presenza dell'atmosfera e delle nubi e dell'aerosol in essa presenti.

Infatti sono sospese nell'atmosfera anche particelle solide molto piccole (aerosol atmosferico) ed una gran varietà di nubi che svolgono un ruolo importante nel bilancio di radiazione dell'atmosfera. È proprio su queste componenti che l'effetto dell'uomo, l'uomo industriale, si fa sentire e può interferire sul clima del pianeta. Le nubi sono infatti il prodotto della dinamica alle scale più varie: dal cumulo di

bel tempo, prodotto del diverso riscaldamento della superficie terrestre, alla nube orografica, legata alla circolazione di valle, al grande sistema nuvoloso del ciclone extratropicale, risultato di un sistema grande migliaia di chilometri). Non appena formate, tuttavia, le nubi hanno un effetto sugli scambi di radiazione elettromagnetica e conseguentemente cambiano le regole che presiedono a questi scambi. Scambi che, come abbiamo detto, sono cruciali nella definizione del clima.

La variazione della composizione dell'atmosfera è quindi altra grande causa di variazioni climatiche, poiché la sua composizione può variare sia per cause naturali che antropiche. Sono cause naturali gli scambi atmosfera-oceano, atmosfera-biosfera, le eruzioni vulcaniche, il ciclo dell'acqua, mentre l'uomo ci mette di suo l'uso dei combustibili fossili, gli allevamenti animali su grande scala, immettendo in atmosfera sia gas serra che particelle. Inoltre l'uomo varia l'albedo superficiale con la deforestazione e la distruzione del suolo agricolo.

Va poi ricordato che il clima è definito da cinque grandi comparti: l'atmosfera, l'idrosfera, la criosfera, la litosfera e la biosfera. L'oceano e l'atmosfera interagiscono tra loro attraverso i flussi di calore e vapore, il ciclo evaporazione-precipitazione. La circolazione oceanica è descrivibile ai fini climatici come una grande nastro che partendo dalla «corrente del golfo» giunge ai mari marginali ove cede calore all'atmosfera e sprofonda nell'oceano, con una scala temporale tipica di mille anni. L'interazione atmosfera-biosfera ed il ciclo del carbonio svolgono pure un importante compito.

Le nubi, in particolare, svolgono il delicato ruolo di ripartire cause naturali ed antropiche, trovandosi esse al centro del sistema clima e soggette ad entrambe le influenze.

Nell'atmosfera priva di nubi la radiazione solare viene riflessa come tale verso lo spazio esterno dalle molecole di gas e dalle particelle di aerosol presenti. Una volta raggiunta la superficie terrestre questa riemette verso lo spazio esterno la radiazione come un corpo nero a 300 K.

Se invece vi sono nubi la parte di radiazione solare che viene subito riflessa dalla sommità della nube verso lo spazio esterno aumenta, ed inoltre si determina un assorbimento sia all'interno della nube che una diffusione (scattering), che può avere effetti molto importanti e difficili da trattare (scattering singolo e scattering multiplo). Inoltre, molto dipenderà dall'altezza alla quale si trova la nube e la composizione della stessa, se – cioè – di goccioline d'acqua o di cristalli di ghiaccio.

Le distribuzioni dimensionali delle goccioline di nube presentano concentrazioni predominanti nell'intervallo di raggio da 2 a 30  $\mu\text{m}$ , ed i cristalli da 5 a 200  $\mu\text{m}$  circa; in particolare, una popolazione di goccioline di nube può produrre una forte estinzione sia della radiazione solare che della radiazione infrarossa. In sintesi gli effetti delle nubi sul clima possono perciò consistere in assorbimento e riflessione della radiazione solare, con conseguente, per la variazione di spessore ottico, variazione dell'albedo. Infatti l'albedo aumenta al crescere dello spessore ottico, e quindi del suo spessore geometrico, e al crescere della concentrazione delle goccio-

line e della loro dimensione. L'assorbanza, d'altra parte, è strettamente legata all'indice di rifrazione delle goccioline ed alle proprietà ottiche della nube. Pertanto, considerevoli variazioni delle caratteristiche ottiche di una nube possono essere causate non solo dalle particelle di aerosol catturate dalle goccioline di nube, ma anche dalle particelle cosiddette interstiziali (libere nello spazio tra le goccioline). In particolare, le particelle di aerosol prodotte dall'uomo possono provocare notevoli variazioni dell'assorbanza e della riflettanza delle nubi.

Per quanto riguarda gli effetti dovuti alla emissione della radiazione infrarossa da parte delle nubi, si deve tener presente che ogni strato di nube emette radiazione termica verso l'alto e verso il basso, comportandosi in maniera molto simile ad un corpo nero avente la stessa temperatura dello strato. Poiché le nubi si trovano a temperatura compresa tra 250 e 300K circa, la curva di distribuzione spettrale dell'irradianza emessa da uno strato di nube può presentare il suo valore massimo ad una lunghezza d'onda compresa tra 9.6 e 11.6  $\mu\text{m}$  circa (legge di Wien). Per la legge di Stefan Boltzmann l'irradianza emessa dalla nube è proporzionale alla quarta potenza della temperatura. Quindi, in generale, una nube emette più radiazione termica verso il basso che non verso l'alto (essendo la parte inferiore più calda di quella superiore). Ne consegue che considerando i soli termini della radiazione infrarossa, questa contribuisce maggiormente a rafforzare l'effetto serra dell'atmosfera che non i processi di raffreddamento del sistema terra-atmosfera. Si deve tenere presente inoltre che, fatta eccezione per i cirri sottili, lo spessore ottico delle nubi nell'infrarosso è solitamente abbastanza grande perchè la radiazione termica emessa dalla superficie terrestre e dagli strati atmosferici sottostanti la nube sia quasi integralmente attenuata dalla nube stessa. Quindi, quando si valutano gli effetti delle nubi sul flusso di radiazione infrarossa uscente dal sistema Terra-Atmosfera, è importante tenere conto soprattutto della temperatura delle strato superiore della nube, poiché da essa dipende principalmente il valore dell'irradianza emessa dall'atmosfera verso lo spazio esterno.

Diversi altri fenomeni vanno tenuti presenti, fra i quali: a) gli effetti dovuti all'attenuazione della radiazione infrarossa, che da parte delle nubi avviene per scattering ad assorbimento, il cui ammontare dipende dallo spessore ottico delle nubi, a sua volta dipendendo dallo spessore geometrico, dalla concentrazione delle goccioline e dalle loro caratteristiche chimiche e fisiche; b) gli effetti dovuti alla variazione dell'indice di nuvolosità, per cui, le immagini della terra ottenute dal satellite negli intervalli di lunghezza d'onda del visibile e dell'infrarosso mostrano che circa la metà parte della superficie è coperta da nubi, con valori di albedo più alti nelle aree prive di nubi. Al riguardo è evidente che variazioni dell'indice di nuvolosità (percentuale della superficie terrestre coperta da nubi) comporterebbero una variazione dell'albedo complessiva del pianeta.

Un puro aumento di nuvolosità, non accompagnato da una variazione delle proprietà ottiche porterebbe ad un pronunciato effetto di raffreddamento. Ma se l'aumento dell'indice di nuvolosità fosse accompagnato da una diminuzione dell'al-

bedo caratteristica della nubi (per esempio per immissione da parte dell'Uomo di particelle carboniose più assorbenti) l'effetto complessivo sarebbe di raffreddamento.

Con ciò si conferma la veridicità dell'affermazione che il cambiamento del clima passa quindi attraverso l'accertamento dei cambiamenti della nuvolosità, in estensione, natura e composizione.

Si pone quindi il problema di costituire una climatologia delle nubi e della loro variazione.

E nel 1982 è stato impostato un Progetto «International Cloud Climatology Project», come parte del «World Climate Research Program», con lo scopo di raccogliere misure di radianza proveniente dai satelliti meteorologici per dedurre la distribuzione globale delle nubi, le loro proprietà, le loro caratteristiche diurne, stagionali ed interannuali. Dal luglio 1983 ad oggi sono stati organizzati archivi di dati di radianza a risoluzione ridotta su  $30 \times 30$  km ogni tre ore, per singoli satelliti e sensori, ed altri prodotti a livello di pixel singolo, con una sintesi da usarsi a fini climatologici, mensile, su griglia di 280 km e su tutto il globo. Tale sezione dell'archivio include la frazione di copertura delle nubi, la pressione alla sommità della nube, la temperatura, sempre alla sommità della nube e la sua variabilità alla mesoscala. Inoltre vengono archiviati dati relativi al quantitativo di acqua di nube, la dimensione media delle idrometeore, lo spessore ottico, il tipo di nubi e la pressione e temperatura della loro base. Come risultato viene prodotta la deviazione dal valore medio dello spessore ottico (che si mantiene normalmente fra  $\pm 0.5$  per un valore medio di 3.8) e vengono prodotte mappe globali estratte dalle medie annuali. Si nota una diminuzione della copertura del 2% dal 1992 ad oggi, mentre si era osservato un aumento dal 1983 al '91.

È anche necessario calcolare gli effetti dell'uomo sul clima attraverso le nubi. Fra le cause che possono portare ad una variazione dell'indice di nuvolosità, e delle caratteristiche ottiche delle nubi, vi è certamente l'alterazione del processo di formazione delle nubi stesse procurata dall'uomo attraverso la immissione di particelle di aerosol, diverse da quelle naturali sia per numero che per caratteristiche chimico-fisiche.

Poiché in atmosfera la nucleazione è per lo più eterogenea, cioè avviene su particelle di aerosol che fungono da nuclei di condensazione, il tasso di formazione di goccioline non dipende quindi dalla statistica delle fluttuazioni eterofase ma dal numero di questi nuclei. La condensazione su ioni, su particelle solubili o insolubili, modifica la variazione di energia libera che interviene nel cambiamento di stato. Per particelle igroscopiche, ad esempio, l'effetto netto è quello di diminuire la tensione di vapore di un termine cosiddetto di soluzione.

Si tenga anche presente che una popolazione di aerosol è caratterizzata da uno spettro di attivazione, che rappresenta il numero di particelle per unità di volume che sono attivate per diventare goccioline (i cosiddetti CCN), ad una fissata supersaturazione. Una volta noto lo spettro di attivazione di una popolazione di aerosol,

la concentrazione di goccioline che si verrà a formare nei primi stadi di evoluzione di una nube sarà funzione della supersaturazione e quindi tipicamente della velocità della corrente ascendente. Le goccioline ai primi stadi di sviluppo sono così piccole che tipicamente i processi di sedimentazione e di coalescenza non sono ancora importanti: è invece la condensazione il processo che domina l'accrescimento. Le goccioline che si sono formate sui diversi CCN (caratterizzati da un particolare spettro di massa) crescono nei primi metri della nube grazie all'aumento della supersaturazione. L'aumento della supersaturazione inoltre porta ad attivare sempre più goccioline, di modo che aumenta anche la loro concentrazione. Questa raggiunge un massimo poche decine di metri al di sopra della base della nube, dove sarà massima anche la soprassaturazione, che poi comincia a calare, mentre la concentrazione di goccioline rimane pressoché costante: solo le particelle più grosse continuano a crescere, mentre per quelle più piccole il processo di crescita per condensazione non è energeticamente favorito e le goccioline tendono ad evaporare.

Quando nella nube incominciano a comparire goccioline con raggi di 20 micron diventano rilevanti i processi di collisione/coalescenza. L'evoluzione della popolazione viene tipicamente rappresentata con un modello di crescita stocastica. Si noti che una goccia della dimensione di 1 mm (se risulta dalla cattura di altre e non dalla fusione di un fiocco) è il risultato di  $10^5 \div 10^6$  eventi di cattura. Di conseguenza la comparsa della pioggia richiede che, subito dopo la fase di crescita per condensazione almeno una gocciolina ogni centomila abbia un raggio superiore ai 20 micron, un raggio cioè sufficiente a innescare collisione-coalescenza. Questa condizione è certamente connessa a fenomeni di larga scala (che vanno ad impattare la velocità della corrente ascendente e l'apporto di umidità) ma in maniera determinante anche dal tipo di aerosol che ha generato la nube. Un aerosol marittimo – per esempio – sarà in generale più efficiente nell'innescare processi di precipitazione visto che produce goccioline iniziali con raggi più grandi. La immisione di particelle di aerosol da parte dell'uomo per vari processi (incendi di biomasse a grande scala nelle foreste amazzoniche, processi di combustione di tutti i tipi, frammentazione di solidi e liquidi etc.) è in grado di alterare la catena di processi microfisici sopra descritta portando a nubi diverse ed a diverse modalità di formazione delle precipitazioni.

Finché non si sarà compreso appieno il ruolo delle nubi nel sistema climatico e non si sarà in grado di modellarlo accuratamente negli effetti suesposti, i grandi modelli di clima saranno affetti da errori considerevoli.

Da quanto sopra esposto, è evidente: a) il clima cambia passa per il fatto che le nubi cambiano, in estensione, natura e composizione; b) è ancora poco nota, ma tuttavia complessa e importante, l'azione indiretta dell'aerosol antropico attraverso la modifica della microfisica delle nubi.

In sintesi, e limitandosi alle cause di variazioni climatiche operanti su tempi paragonabili a quelli dell'industrializzazione, si può oggi affermare che: a) vi sono cause note e quantificate (gas serra), cause meno note e da approfondire (aerosol e

nubi). Consapevoli del rischio che si corre nel restare inattivi, anche in carenza di conoscenza di alcuni aspetti, i politici intendono procedere in base al principio di precauzione autolimitando con accordi internazionali (protocollo di Kyoto) la immissione della anidride carbonica (di effetto certo di riscaldamento) in atmosfera.

Ovviamente, essendo questa la natura della questione, non stupisce che vi siano scienziati che sostengono questo principio di precauzione e scienziati che vi si oppongono sulla base della considerazione che la scarsa conoscenza di alcuni addendi rende la somma incerta.

Io ritengo che, continuando nel medesimo comportamento (crescita esponenziale dell'energia, uso di tecnologie inquinanti ecc.) sia serio il pericolo di cambiamento globale e di degrado ambientale, quest'ultimo già ampiamente verificato e sotto gli occhi di tutti. In conclusione, vi sarebbero fin d'ora buoni motivi per procedere a cambiamenti di stili di vita in base a questa ultima constatazione. Si rende pertanto necessario ed urgente cambiare il passo col quale la ricerca affronta il problema «clima», sia negli aspetti relativi ai singoli processi, sia nella messa a punto di un modello globale realmente affidabile. È urgente, insomma, adeguare, anche in termini di personale scientifico finanziamenti e strutture, e accelerare i troppo lenti tempi della scienza, a quelli urgenti dettati dalla preoccupazione dell'intera umanità per i destini del pianeta.