APVE
EXPLO
1530

30 EXPLO
1909

Federico Barnabe
Buja (Udine)
N. 7

LUIGI DE MARCHI

TEORIE GEOLOGICHE:

COME SI FORMANO LE MONTAGNE

ESTRATTO DA "SCIENTIA" Rivista di Scienza
VOL. VI, ANNO III (1909), N. XII - 4

BOLOGNA
NICOLA ZANICHELLI

LONDON
WILLIAMS AND NORGATE

PARIS
FÉLIX ALCAN

LEIPZIG
WILHELM ENGELMANN

Sono trascorsi soltanto due secoli e mezzo dacchè Stenone, un olandese cresciuto alla scuola degli Accademici del Cimento, affermò per la prima volta pubblicamente il concetto, che già appare luminosamente veduto da Leonardo nelle sue solitarie meditazioni, della origine sedimentare della maggior parte delle rocce che costituiscono gli strati superficiali della Terra. Ma è meno di un secolo e mezzo che Saussure riconobbe negli strati del Monte Bianco, fortemente raddrizzati e piegati, l'azione di potenti forze deformatrici, che sollevarono tutto quel blocco di monti, e poco più di un secolo (1795) che Smith documentò l'intuizione del nostro Arduino che « tutti gli strati sono stati successivamente depositati sul fondo del mare e che ognuno di essi contiene gli avanzi pietrificati degli organismi viventi nel tempo della sua formazione ». Allora soltanto incominciò quella *storia documentata* del nostro pianeta che è la Geologia.

Ogni storia, che meriti tal nome, si fonda su un triplice lavoro: la raccolta critica dei documenti, che ne assicuri la autenticità, il loro coordinamento in una successione conseguente e verosimile di fatti, e la sintesi che riassuma i fatti stessi in una rappresentazione del processo storico che li collega, e ne assegni le cause più probabili. Questi tre lavori dovrebbero procedere separati e successivamente, quando si volesse giungere a conclusioni sicure e decisive, tali cioè da offrir solida garanzia che altri documenti e altri fatti non verranno a smentirle. Ma l'uomo è un animale sintetico, che ha sempre fretta di concludere, assillato dalla necessità organica della sua intelligenza di porsi il perchè delle cose, e di

cercare il riposo a tale inquietudine logica in una risposta che appaia plausibile alla luce delle cognizioni del momento, o, per usare una frase curiale, allo stato degli atti. Così la storia si fa e si rifà: in ogni epoca lo storico riempie le lacune tra i fatti sicuri con fatti meno certi o con induzioni più o meno ipotetiche che diano continuità alla sintesi, come un fisico che, avendo rappresentato coi punti di un diagramma i dati di una serie di esperienze, conduce a occhio una curva che li riassume e che dovrebbe rappresentare la legge direttrice del fenomeno. Quanto più scarso è il numero dei dati sicuri, tanto più libero è il campo alla ricostruzione puramente ideale, dove lo storico riflette la personalità dottrinale, logica, morale, sociale, estetica, sua e del suo tempo: cosicchè la storia rimane, a giudizio d' alcuni, più un arte che una scienza.

Anche la Storia della Terra non poteva, nè può, sottrarsi interamente a questo destino, e in ciò risiede gran parte del fascino che essa possiede tra le altre scienze naturali, per le quali la ricerca dei processi causali appare meno impellente, perchè le cause stesse sono o troppo remote alla nostra intelligenza o troppo immediate ed evidenti.

Essa ha avuto però la fortuna di poter fissare fin dal primo suo nascere un criterio sicuro per la classificazione sistematica e cronologica de' suoi documenti. Dallo studio dei materiali di un piccolo distretto, come l' Erzgebirge, il Werner ricavò una nomenclatura sistematica delle rocce, paragonabile a quella botanica di Linneo; dallo studio stratigrafico di una singola regione, come l' Inghilterra, lo Smith ricavò in base a scarsi dati paleontologici una classificazione di un cospicuo gruppo di formazioni geologiche successive, classificazione che tuttavia rimane nelle sue linee generali. L' impulso fantasticamente rapido che il genio di Cuvier diede alla Paleontologia, e l' estendersi dell' esplorazione geologica a tutta la superficie dei continenti non fece che ampliare il campo, ma non mutò il disegno della ricostruzione stratigrafica dell' involucro superficiale del pianeta. La *stratigrafia* nacque matura, come una scienza sperimentale, appena trovò il suo metodo; si può dire che fin dal principio le discussioni sull' età relativa delle formazioni geologiche sedimentari nei vari paesi si limitarono a questioni di dettaglio: il che non vuol dire che siano state e siano perciò sempre molto tranquille. Questa immediata adattabilità delle conclusioni formulate sullo studio stratigrafico

di una regione, ad ogni altra regione per quanto remota e diversa, se è documento imperituro dell' acuto spirito d' osservazione e di sintesi dei fondatori della scienza, è prova anche di una relativa semplicità dei fatti stratigrafici, rispondente a una relativa uniformità e persistenza delle cause trasformatrici della superficie terrestre in tutte le sue parti. Tali cause sono, e furono sempre, benchè forse in grado diverso, in tutte le epoche della storia terrestre, quelle che operano tuttora alla modellazione del rilievo superficiale: la radiazione solare, le trasformazioni e i moti dell' acqua, le correnti dell' aria e solo in via molto subordinata le manifestazioni di una attività interna della terra. Con questa visione concreta della permanenza delle cause attuali, operanti in un tempo immensamente, se non indefinitamente, lungo, Lyell stabilì or son quasi ottant' anni le basi anche di una Filosofia della Storia della Terra, facendo rientrare i processi geologici di formazione e distruzione delle rocce nell' orbita de' fenomeni fisici noti o accessibili all' osservazione e all' esperienza.

Così la Geologia in poco più di un secolo adempì con una prontezza meravigliosa alla parte più positiva del suo programma, quella di definire nello spazio, nel tempo e nelle cause la maggior parte dei materiali che costituiscono gli strati superficiali della Terra: cioè di raccogliere autenticare e classificare i documenti della storia futura. In tale lavoro portò anche efficace contributo pratico ai progressi dell' industria e dell' agricoltura; ma di tali benemerenze edonistiche il filosofo naturale non si occupa.

Non così facile le tornò e le torna l' adempimento delle altre parti del programma, di coordinare cioè i fatti stratigrafici in una sintesi tectonica, che riveli il processo deformativo della crosta terrestre e di assegnare le forze attive in questo processo.

Un geografo che, per darsi piena ragione dei dettagli formali del rilievo terrestre, voglia farsi un' idea dell' intima struttura dei massicci montuosi, su cui gli agenti atmosferici hanno scolpito il disegno e la plastica topografica, e ricorra perciò alle opere generali o alle monografie locali dei geologi, si trova subito smarrito davanti alla varietà e alla variabilità delle loro conclusioni. Per rimanere in casa nostra, vediamo in quanti modi nel periodo di pochi decenni sia stata interpretata la struttura delle Alpi.

Prima si vide una zona centrale di rocce cristalline, alla quale si appoggiavano simmetricamente da un lato e dall' altro rocce paleozoiche della zona così detta della *grovacca*, e poi rocce calcari, e poi bassi monti più esterni di arenaria, e parve di riconoscere in tale struttura l'effetto del sollevamento della zona centrale cristallina che avrebbe trascinato con sè e lacerato il mantello delle rocce sedimentari sovrastanti. Ben presto lo studio dei due versanti dimostrò che tale simmetria non si verifica affatto, e che anzi è caratteristica della catena alpina, come era già stato verificato da Dana negli Appallachiani degli Stati Uniti, e come si verificò in tutte le grandi catene montuose del mondo, una fondamentale asimmetria, non solo stratigrafica, ma anche geometrica, tra un versante esterno convesso e un versante interno concavo, che racchiude un mare o una pianura. Così per le Alpi sarebbe interno il versante italiano che racchiude la valle del Po e il bacino adriatico; esterno tutto il sistema delle Alpi e prealpi francesi, svizzere ed austriache. Questo, l' esterno, sarebbe costituito da una successione di pieghe parallele rovesciate come una colonna di onde che vanno a frangersi contro e attorno una serie di massicci più antichi allineati da occidente a oriente, attraverso l' Europa centrale: quello, l' interno, sarebbe costituito da una fascia più ristretta di pieghe rovesciate e in parte rovinata per cedimento verso il bacino racchiuso, che appare perciò come una zolla sprofondata della crosta terrestre. La prova di tale rovina sarebbe data, secondo i geologi austriaci, da una serie di fratture parallele, evidenti specialmente nelle Alpi orientali, lungo le quali le parti sprofondate formerebbero anfiteatro attorno al bacino adriatico. Ma una più minuta esplorazione delle Alpi venete porterebbe a escludere la presenza di molte fra queste presunte fratture, e ad eliminare quindi uno degli argomenti più rappresentativi del processo di sprofondamento del bacino interno.

Una rivoluzione assai più radicale sconvolse ripetutamente in questi ultimi decenni la ricostruzione ideale delle Alpi occidentali. Non più un solo asse di rocce cristalline ne costituirebbe lo scheletro, ma due assi paralleli che emergerebbero in superficie come due serie di nuclei arcaici allineati in una zona esterna, che abbraccia i grandi massicci di Mercantour, Belledonne, Monte Bianco, Oberland bernese e

S. Gottardo e in una zona interna che va dal Savonese al Canton Ticino ed è segnata dal Gran Paradiso, dal Monte Rosa e dal Massiccio di Antigorio. A questa si appoggierebbe una zona di rocce assai miste, dove sono copiosi i materiali di color verde e che perciò è conosciuta col nome di zona delle pietre verdi, che le attribuì il Gastaldi. Fra questa e la zona arcaica esterna è racchiusa una zona continua, da Savona ai Grigioni, di terreni paleozoici e mesozoici, dal carbonifero al trias: la così detta zona del Briançonese. La zona delle pietre verdi si riteneva arcaica, come quella dei massicci cristallini, e si consideravano quindi le due zone di questi massicci come i lembi sporgenti di un'unica massa incurvata superficialmente in una conca, o *sinclinale*, allungata, entro la quale eransi raccolti in un'epoca successiva i depositi paleozoici del Briançonese. Ma poi si constatò che la zona delle pietre verdi è molto più recente, e parve di riconoscere nella zona Briançonese non più una sovrapposizione, ma il nucleo del sollevamento alpino; sarebbe essa che aprendosi a ventaglio, avrebbe costipato gli strati laterali contro le due catene di massicci cristallini.

Intanto lo studio più approfondito delle prealpi francesi e svizzere metteva in luce un fatto nuovo piuttosto sconcertante. Esse sono costituite da rocce più antiche di quelle delle catene alpine cui si appoggiano immediatamente a sud; anzi queste, di formazione più recente, s'insinuano sotto quelle, che non sono radicate attraverso di esse ma sono semplicemente deposte sulla loro superficie. Come si trovano questi campioni di un mondo più antico così smarriti in un ambiente stratigrafico più recente? donde vengono questi *esotici*, come ai geologi piacque di chiamarli? Prima si credette che si trattasse di blocchi di dimensioni diverse, fino a quelle di vere montagne, scivolate per semplice peso lungo il versante delle Alpi durante il loro sollevamento: è l'ipotesi del *carreggiamento* (*charriage*) di Schardt. Un fenomeno analogo, ma su scala relativamente minuscola, si verifica nei sedimenti costieri che scivolano lungo la scarpa della costa, e Reyer lo riprodusse sperimentalmente su piccoli modelli di strati di sabbia, gesso e argilla plastica. Ma lo scivolamento per semplice peso, su un pendio molto dolce, di un intero monte stratificato che conservi, nel suo viaggio di decine di chilometri, la sua coerenza strutturale, era un fatto che ripugnava al senso comune (che però, nel giudicare di fenomeni così straordinari, non è

sempre il buon senso) di tutti i geologi dotati di qualche criterio meccanico. Ma appunto in quell' epoca, tra il 1890 e il 1900, si constatò l' esistenza nella zona centrale alpina di grandi pieghe completamente rovesciate verso nord e sovrapposte l' una all' altra, e Lugeon potè affermare nel 1902 che le prealpi esotiche erano il naturale prolungamento di alcune di queste pieghe o falde rovesciate, che, con interruzioni più o meno ampie si distendono a ricoprire, a strati sovrapposti, tutta la zona alpina svizzera. Così sorse la teoria delle *nappes de recouvrement,* che ora sconvolge come un turbine tutti i concetti che si credevano acquisiti sulla struttura e l' origine, non solo delle Alpi occidentali, ma di tutti i sistemi montuosi. Nel 1902 il Lugeon l' annunciava come *une de ces lueurs d' aurore qui annoncent l' approche du grand jour:* la più grande autorità della geologia svizzera, Heim, la salutò come *une lumière nouvelle* che illuminava d' un tratto molti problemi oscuri della tectonica alpina. Nel 1904 Termier l' estendeva alle Alpi orientali ed annunciava una nuova *sintesi delle Alpi,* che presenterebbero ora, nonostante l' apparente contrasto fra le occidentali e le orientali, unità di struttura. Le Alpi non sarebbero che immense *nappes* emergenti, a sud dell' asse alpino, da una zona, in prolungamento delle Alpi Dinariche, che costeggiano a oriente l' Adriatico; *nappes* ribaltate anche a contropendenza su tutto il rilievo, che ne sarebbe interamente coperto, salvo lacerazioni, fino alla Baviera, e alla pianura svizzera e francese. Una falda superficiale più vasta ricopre altre falde sempre più ristrette quanto più si scende in profondità. « Comme les arbres de la vallée du Rhone sous la poussée irrésistible du *mistral,* comme les fumées d'un pays industriel sous le vent qui les rabat et les roule, les plis des Alpes ont été couchés vers l'extérieur de la chaîne. Et la force qui les a couchés a été assez énergique pour les empiler les uns sur les autres, les laminer, les étirer, les fragmenter, tant et si bien que les nappes ainsi formées s'en sont allées jusqu'à 100, 120, peut-être 150 kilomètres de leur origine » [1].

L' arte, la grande arte, anima, come si vede, anche la Storia della Terra. Sarà questa la costruzione definitiva? La

[1] TERMIER, *Les nappes des Alpes orientales et la synthèse des Alpes,* « Bulletin de la Soc. géolog. de France » IV Série Tome III Mai 1904 p. 761.

esperienza del passato ci costringerebbe allo scetticismo, specialmente davanti allo spettacolo dell' entusiasmo inebbriante con cui gli apostoli della nuova fede sconvolgono gli strati terrestri anche fuori delle Alpi, ribaltando falde e pieghe e facendo scorrere intiere catene di monti per centinaia di chilometri. Così l' Apennino verrebbe dai Balcani, i monti della Sicilia e della Tunisia dal Mediterraneo... se i geologi italiani, che sono più addentro nell' intima conoscenza del loro paese, non dimostrassero che gli argomenti di fatto addotti a sostegno di tali concezioni rivoluzionarie non reggono sempre a un esame rigoroso della tectonica locale.

Tuttavia non soltanto l' alta autorità dei più esperti della geologia alpina, alcuni dei quali si trovarono costretti a convertirsi alle nuove idee, ma l' anatomia profonda che si potè fare in alcuni punti delle Alpi coi trafori, confortano il profano ad accettare, almeno entro certi limiti, la costruzione di Lugeon. Così il traforo del Sempione, sconvolgendo le previsioni geologiche basate sul concetto di un corrugamento autoctono intorno a un nucleo di gneiss, avrebbe rivelato la sovrapposizione alternata di ben cinque falde di gneiss fra le quali s' intercalano quattro falde di calcescisti mesozoici. La interpretazione tectonica del fatto non è certamente unica, e lo Stella nel 1905 ne suggerì ben tre possibili, ma certamente tra queste vi è quella del ricoprimento, sviluppata ora da Schmidt. Secondo essa le falde sovrapposte di gneiss rappresenterebbero delle propaggini o digitazioni di un' unica massa gneissica situata a sud, e che sarebbero rovesciate ad arco verso nord; mentre le falde di calcescisti rappresenterebbero le propaggini, intercalate fra le prime, di un' unica massa situata a nord contro i massicci del Gottardo e dell'Aar. Questo motivo è veramente quello che meglio s' accorda col *leit-motiv* della tectonica alpina, secondo le nuove idee; epperò, essi si rafforzano a vicenda.

Ma l' esempio del Sempione è uno dei più eloquenti per dimostrare il pericolo delle costruzioni tectoniche premature. Le sorprese offerte dal suo traforo, per ciò che riguarda la natura della roccia a varie profondità, la temperatura e l' idrologia profonde, furono tali e tante, che il più autorevole dei nostri geologi lo definì, in un momento d' amarezza in cui forse la frase esagerò il pensiero, una *debâcle* della geologia.

Il pericolo è inerente alla natura stessa degli studi geo-

logici, e a quella fatale necessità della nostra mente di associare i fatti noti in una sintesi che abbracci anche gli ignoti. La terra ci rivela la sua faccia nuda solo in aree ristrette, perchè la maggior parte è ricoperta dall'acqua o dalla vegetazione o dai prodotti del suo stesso deperimento sotto l'azione degli agenti atmosferici. In tratti ancor più ristretti, lungo le valli essa ci rivela anche la struttura profonda, ma soltanto di una sottile epidermide: e mille impedimenti, naturali o artificiali, impediscono al geologo di esplorarne anche la superficie in tutti i suoi punti. L'esplorazione geologica è quindi esclusivamente, o quasi, superficiale e per punti o linee discrete; su questa rete di dati osservati il geologo deve costruire, riempendone i vani per semplice induzione probabile, la carta geologica e le sezioni normali, che dimostrino la successione e l'inclinazione degli strati in profondità, in base alla loro distribuzione e inclinazione in superficie. Egli si trova quindi nella posizione, già ricordata, del fisico che voglia dedurre la legge di un fenomeno da un ristretto e discontinuo numero di dati di osservazione. Come questi riunisce i punti rappresentativi di tali dati in un diagramma grafico mediante una curva ideale che sembri meglio accordarsi ad essi, così il geologo riunisce i lembi di una stessa formazione, scoperti in punti diversi, con una zona, che li raccorda in superficie e con una curva ideale che li raccorda in una sezione verticale, facendola sprofondare sotto terra e spaziare nell'aria. Le sole condizioni che gli sono imposte nel tracciamento di tali curve sono: che le curve stesse abbiano nella loro intersezione colla superficie del terreno l'inclinazione che ivi presentano gli strati relativi, e che abbiano un andamento conseguente, se non concorde, tra loro, senza, naturalmente, intersecarsi. Ma la libertà che tali condizioni concedono è ancora grande e si comprende come nel tracciamento molto sia lasciato all'apprezzamento e all'intuito personale. Se si hanno, per esempio, in superficie lembi di una stessa formazione più recente imprigionati tra formazioni più antiche, noi possiamo riunirli o con una curva puramente aerea o con una curva alternatamente aerea e profonda. Nel primo caso veniamo ad ammettere che la formazione recente si appoggia tuttora, come fu deposta in origine sul fondo del mare, sulla più antica, e che nel corrugamento successivo solo alcuni lembi di essa rimasero pizzicati tra le pieghe della sottostante. Nel

secondo caso si viene invece a supporre un completo rivolgimento degli strati, pel quale larghi lembi della formazione più antica vennero, per effetto di ribaltamento di pieghe, a trovarsi sovrastanti alla formazione più recente. Era naturale che i geologi si attenessero di regola alla prima soluzione, come più spontanea e meno improbabile, tanto più che essa obbligava già ad ammettere nella maggior parte dei casi un corrugamento abbastanza pronunciato, e talvolta anche sorprendente, considerata la rigidità e fragilità del materiale roccioso. Per convertirli caso per caso alla seconda, era necessario il documento di formazioni antiche appoggiate su larga estensione a formazioni più recenti, cioè una incisione abbastanza profonda della crosta terrestre da mettere a nudo tanto il lembo superiore che l'inferiore di una piega rovesciata. Fin dagli inizii della tectonica alpina non mancarono gli esempi di questo fatto: già Escher von der Linth aveva visto nell'Alpe di Glarus la sovrapposizione alternata di strati antichi e recenti, e intuìto che si era davanti a una doppia piega rovesciata, ma non osò enunciare pubblicamente tale sua concezione, rispondendo a chi lo eccitava a farlo: « Nessuno mi crederebbe ed io passerei per pazzo ». Il suo grande scolaro Heim confermò con prove inconcusse la sua intuizione e la enunciò fin dal 1877 nel suo magistrale *Mechanismus der Gebirgbildung*, ma per certo tempo la doppia piega di Glarus rimase come un *monstrum* geologico. Negli anni successivi gli esempi di pieghe rovesciate si moltiplicarono, specialmente nella regione alpina più elevata, dove è più profondamente messa a nudo l'intima struttura della montagna, finchè lo studio delle Prealpi settentrionali venne, come dissi, a dare il più grandioso esempio di inversione stratigrafica, e l'ardita concezione di Lugeon a raccordare questi fatti in una sintesi che tutti li concilia e li riassume.

Per quanto questa possa sembrare straordinaria, quasi inconcepibile, noi vediamo che essa sorse gradualmente e con processo rigorosamente logico dallo studio sempre più esteso dei fatti, e che essa non segna già una inversione contraddittoria, ma il naturale sviluppo di un unico concetto, che andò delineandosi su scala sempre più grandiosa, quello cioè di un corrugamento sempre più esteso e profondo degli strati, e di una inclinazione sempre più accentuata, fino a completo ribaltamento, di pieghe, che dalle dimensioni di poche cen-

tinaia di metri si allungarono a quelle di parecchie decine e anche centinaia di chilometri. Sarà forse raccomandabile la prudenza di Escher von der Linth nell'affermare l'applicabilità della teoria in tutte le regioni montuose; sarà, se si vuole, deplorevole la facilità colla quale alcuni geologi moderni, come inebbriati della libertà conquistata contro la sistematica del senso comune, fanno viaggiare a loro piacimento intiere catene di monti; ma è fenomeno non esclusivo della scienza geologica, bensì di tutte le scienze e di tutte le arti, appena sorga una concezione nuova a infonder loro un alito nuovo, quello di esagerarne la portata e di attribuirle carattere rivoluzionario contro la *routine* delle idee acquisite. Non vediamo forse, anche in fisica, un turbine di fantasie provocato dalla scoperta del radio?

A questa progressiva evoluzione della sintesi tectonica corrispose fatalmente un succedersi di teorie intorno al processo causale che dovrebbe spiegarla. Qui il geologo si trova davanti a un problema che non è esclusivamente geologico, ma è nello stesso tempo cosmogonico, astronomico, fisico, chimico e meccanico; ma, come avviene sempre di problemi complessi, accessibili per le loro varie facce a ordini diversi di studi e di studiosi, ciascuno di questi è portato naturalmente a considerarlo principalmente, se non esclusivamente, dal suo punto di vista e ad accogliere con molta riserva, e solo in quanto rientrano nel suo quadro, le conclusioni degli altri, quando le conosca. Così lo storico perde facilmente di vista i lati psicologico, economico, etnografico, geografico dei fatti, di cui vede prevalentemente il lato politico, che ne dà la spiegazione esteriore. Analogamente lo storico della Terra, il geologo, ricostruisce il processo evolutivo del nostro globo quasi esclusivamente allo scopo di dare una spiegazione esteriore dei fatti tectonici, perdendo facilmente di vista il suo significato fisico e dinamico. Non è un'accusa, ma la semplice constatazione di una lacuna comune a tutti i campi di studio, inevitabile conseguenza della divisione del lavoro, e sotto questo rapporto benefica, in quanto permette di seguire le conseguenze di ogni teoria in direzioni diverse, e di controllarle poi reciprocamente.

Dato lo scopo particolare delle teorie sulla genesi delle montagne *(orogenetiche)*, di dar ragione della tectonica super-

ficiale, è naturale che col rapido mutarsi della rappresentazione di questa tectonica mutassero e mutino le teorie.

La tectonica simmetrica suggeriva spontaneamente l'ipotesi di un sollevamento della crosta superficiale per espansione della massa interna, che per argomenti di fatto (vulcanismo) e teorici (ipotesi cosmogonica di Laplace) si riteneva fluida.

La tectonica a pieghe suggerì non meno spontaneamente l'ipotesi della contrazione del globo per raffreddamento, per effetto della quale la crosta terrestre si arriccierebbe come la buccia di una mela che dissecca. Suess delineò nel modo più concreto questo processo di contrazione, costruendo la sintesi più completa e organica, che finora sia stata ideata, dei lineamenti più caratteristici della *faccia della terra,* i quali conserverebbero l'impronta delle forze che li hanno scolpiti. Secondo tale teoria da lui svolta e applicata in una monumentale sintesi geografica, le pieghe montuose, disposte lungo zone continue che abbracciano bacini di sprofondamento, sarebbero l'effetto dello sforzo tangenziale e unilaterale che i bacini stessi, sprofondando in blocco, avrebbero esercitato contro le regioni contigue meno resistenti, e che sarebbero state compresse contro altre regioni più esterne rimaste fisse. Ciò darebbe ragione e della asimmetria delle catene, più ripide da un lato che dall'altro, e del loro andamento curvilineo con cui si adattano alle regioni esterne resistenti, e delle fratture lungo il bordo interno del bacino, e della formazione dei mari e della trasformazione dei continenti. Comunque si apprezzi il valore di questa costruzione al lume della meccanica e della fisica, l'opera di Suess rimarrà l'epopea geologica del Secolo XIX.

La scoperta delle masse esotiche suggerì, come s'è visto, la teoria del corrugamento per scivolamento.

Secondo queste tre teorie la formazione delle montagne rimane un fatto puramente superficiale della crosta terrestre: la tectonica delle *falde di ricoprimento* è assolutamente inconciliabile con tale supposto, poichè sarebbe testimonio di una plasticità, che è in aperta contraddizione colle proprietà caratteristiche delle rocce superficiali. Noi siamo qui davanti a un vero fenomeno di scorrimento di una massa semifluida, la cui spiegazione va cercata in un processo radicalmente diverso da quello del semplice sollevamento, o del corrugamento per contrazione, o dello scivolamento.

Contro la teoria del sollevamento i sostenitori di quella del corrugamento hanno addotto un tale cumulo di argomenti, che ormai essa non ha più alcun difensore, benchè alcuni rilievi non si possano spiegare che come effetto di una effettiva intrusione di magma profondo che sollevò gli strati sovrastanti senza romperli *(laccoliti)*; ma in questo caso siamo davanti a un esempio affatto locale di vulcano abortito. Nella sua generalità essa è inconciliabile colle moderne idee sulla costituzione interna del globo, da me riassunte in questa stessa Rivista [1].

Ma anche la teoria della contrazione per raffreddamento urta contro un complesso di argomenti fisici e meccanici che ne scalzano le basi. Essa presuppone anzitutto che il nucleo interno del globo si contragga più rapidamente della crosta superficiale, che sarebbe perciò costretta a crollare progressivamente per mantenere il contatto di sostegno. Nulla sappiamo delle proprietà fisiche di questo nucleo, ma è naturale ammettere che in esso il raffreddamento sia assai più lento che in superficie, cosicchè, a meno di attribuirgli un coefficiente di dilatazione immensamente maggiore, dovrebbe contrarsi più lentamente, e la crosta superficiale dovrebbe spezzarsi sopra di esso, come si spezza e si squama nel deserto la superficie di un blocco di granito fortemente riscaldato nelle ore diurne, per effetto del raffreddamento notturno. Nè è senza peso, sotto questo rapporto, la considerazione di Wiechert che l'alta densità centrale della Terra risponde già a un tale grado di compressione dei materiali, che non è ammissibile una ulteriore contrazione progressiva. Ma anche ammettendo il presupposto, esso è inadeguato a spiegare la grandiosità della contrazione, quale sarebbe rappresentata dal corrugamento degli strati superficiali, quando questo fosse realmente l'espressione di una riduzione dell'area di base. Trent'anni sono Heim calcolò che il corrugamento alpino, secondo la tectonica di allora, rappresentava una contrazione da 120 a 150 chilometri sul meridiano di Zurigo, tra Zurigo e Como; ma ora si riconosce, in base alla tectonica delle falde di ricoprimento, che essa dovrebbe essere da 600 a 1200 chilometri. Ammettendo che sul meridiano stesso non siano avvenuti altri corrugamenti (e come si può ammetterlo?) questo solo corri-

[1] *Cos'è la Terra.* (« Rivista di Scienza ». Anno I, n.° II-**2**; 1907).

sponderebbe a una riduzione dell'intiero circuito meridiano del 3 % e quindi a una riduzione del raggio terrestre, in corrispondenza al meridiano stesso, di circa 190 chilometri! Secondo un calcolo di Rudski un raffreddamento di circa 8° gradi in un milione d'anni darebbe *al massimo* un abbassamento di poco più di due metri: vediamo quindi quale raffreddamento e quanti miliardi d'anni si richiederebbero per giustificare quella contrazione, che del resto, credo, nessun geologo sarà disposto ad ammettere.

Anche dal punto di vista meccanico la costruzione di Suess non regge a una discussione analitica. A una discussione siffatta la sottopose recentemente un geologo, il dottor Ampferer, negli Annali dell'Ufficio geologico di Vienna, ed io mi rimetto volontieri alla fondamentale fra le conclusioni di chi certamente è cresciuto alla scuola del Maestro. Egli osserva come, date le dimensioni della Terra, non si possano considerare gli effetti prodotti dalle forze in essa operanti (nel caso speciale la gravità) come identici a quelli che con materiali eguali si ottengono in esperienze di gabinetto, su piccoli campioni o modelli. Precisamente, se si volessero applicare senz'altro i risultati di queste esperienze a fenomeni che si svolgono su larga scala, bisognerebbe aumentare secondo la stessa scala d'ingrandimento i coefficienti di rigidità, di flessione, di trazione, di rottura, di attrito ecc. È questo un noto principio di meccanica. Poichè i materiali costitutivi della crosta terrestre sono gli stessi che vengono sottoposti alle misure sperimentali di resistenza, ma in dimensioni immensamente grandi, essi non potrebbero reggere allo sforzo d'equilibrio della volta superficiale terrestre abbandonata dal sostegno del nucleo centrale che si contrae; l'ing. Wepfer avrebbe calcolato che detto sforzo è 1720 volte la pressione di schiacciamento del granito compatto. È inammissibile perciò che una porzione molto grande della volta possa sprofondarsi in blocco al mancare del sostegno, senza schiacciarsi e frantumarsi, e tanto più inammissibile, supposto che ciò avvenga, è che la pressione da essa esercitata lateralmente si trasmetta fino alla distanza di parecchie centinaia di chilometri, corrugando e facendo correre gli strati, perchè si frantumerebbe per schiacciamento la roccia a immediato contatto. La formazione poi di fratture verticali che il Suess ammette lungo l'orlo dell'area di sprofondamento, e che

rappresenterebbero la superficie di scivolamento dell'area stessa, è in contraddizione col supposto di una pressione, perchè implicano anzi uno sforzo di trazione. Nè si spiegava il rovesciamento delle pieghe verso l'esterno della zona corrugata, anche quando il fatto non si affermava così grandioso come vorrebbe la nuova concezione delle falde di ricoprimento. Finalmente un bacino che si sprofonda dovrebbe esercitare la sua pressione laterale su tutto il contorno, e si dovrebbero formare non catene aperte, ma un reticolato di catene a maglie chiuse intorno a bacini contigui. Come si vede, la teoria di Suess rimane una geniale immagine rappresentativa, non una ragione esplicativa, dei fatti.

Ciò era sentito già da molti geologi, che ricorrevano perciò ad altre teorie. Queste si basano essenzialmente su un'osservazione suggestiva fatta da Hall fin dalla metà del secolo scorso: *Le catene di montagne, ossia le regioni corrugate della superficie terrestre, coincidono colle zone di massimo spessore dei sedimenti.* Spesso la potenza complessiva degli strati sedimentari sovrapposti si misura a parecchie migliaia, e talvolta decine di migliaia, di metri. Ma un altro fatto s'impone: spesso questa pila di strati è costituita fino alla base da sedimenti di mare poco profondo, e spesso è invece costituita tutta da sedimenti di mare profondo, ma non profondissimo, senza assumere alla superficie il carattere di formazione *neritica,* o di acqua bassa. Ora non si comprende come, dato un bacino di raccoglimento, profondo come lo vorrebbe l'altezza della pila stratigrafica, questo possa essersi ricolmato tutto di sedimenti di acqua bassa, o come, se ha raccolto all'inizio depositi di mare profondo, col progressivo suo ricolmarsi la *facies* non sia andata progressivamente modificandosi verso il carattere di sedimento neritico. Ambedue queste contraddizioni non si eliminano se non ammettendo che, man mano che i sedimenti si accumulavano, il bacino si approfondiva. Tale approfondimento progressivo sarebbe da alcuni giustificato colla contrazione generale della crosta terrestre che ravvicina i lembi della conca, e comprime i sedimenti in essa racchiusi corrugandoli a pieghe. Una catena montuosa a pieghe sorgerebbe quindi sulla stessa conca, o *geosinclinale,* nella quale si depositarono i sedimenti che li costituiscono. La conca originaria doveva trovarsi tra due

continenti, la cui demolizione fornì gli elementi della sedimentazione e che rimasero saldati dal sollevamento per compressione e corrugamento dei sedimenti racchiusi. È questa la teoria delle Geosinclinali sviluppata recentemente da Haug. La sua base è sempre la contrazione superficiale, ed è quindi scalzata dalle obbiezioni già svolte: essa inoltre non dà ragione nè della assimetria nè del rovesciamento delle pieghe, e deve ammettere l'esistenza di molti continenti in aree ora occupate da mari profondi, anche nel Pacifico, che per molti caratteri è considerato dalla maggior parte dei geologi come un oceano primitivo e permanente.

Ma l'approfondimento progressivo delle geosinclinali è spiegato da un'altra scuola, che fa capo allo stesso Hall, come effetto dello stesso peso dei sedimenti che si accumularono per intiere epoche geologiche lungo determinate zone, costeggianti coll'ampiezza di parecchie centinaia di chilometri i rilievi continentali preesistenti. La cosa può sembrare strana e contraddicente al concetto di rigidità del globo terrestre che nel citato articolo abbiamo visto confortato da così solidi argomenti. Ma anche qui entra in giuoco la grandiosità della scala in cui si svolgono i fenomeni. Sappiamo che il grado medio di rigidità del globo terrestre è dell'ordine di quello dell'acciajo: lo affermò molti anni sono Lord Kelvin e ad una conclusione conforme portarono le recenti misure di Hecker sulle maree luni-solari del suolo di Postdam. Un globo di acciajo di piccole dimensioni, alla cui superficie si applicasse il peso di una massa, tanto piccola relativamente alla massa totale quanto lo è la massa dei sedimenti deposti nella geosinclinale rispetto alla massa terrestre, subirebbe certamente una deformazione così tenue da sfuggire ai più delicati mezzi d'osservazione Aumentando progressivamente la massa della sfera e in egual rapporto quella del peso deformante, perchè la deformazione si mantenesse così piccola bisognerebbe che crescesse nel rapporto dei raggi il modulo di elasticità; ma poichè questo rimane costante, deve crescere nel rapporto dei raggi la deformazione. Si giustifica così un'accorciamento del raggio terrestre di parecchie centinaia o anche migliaia di metri: e, continuando per lungo periodo geologico questo processo nel medesimo punto, lo sprofondamento potrà raggiungere la grandezza anche di parecchie unità o anche di qualche decina di chilometri. È quindi un fatto ineccepi-

bile, se anche ad esso ripugna la troppo angusta esperienza accessibile ai nostri piccoli mezzi. Esso è confermato del resto anche dall'esperienza geologica, si può dire, attuale; dal fatto cioè che formazioni alluvionali relativamente recenti, come quelle che ricolmano la valle del Po, benchè di origine evidentemente fluviale, hanno una potenza anche di centinaia di metri.

Ma un altro fatto di carattere ben più generale lo conferma: il fatto, che le recenti numerose misure di gravità, in terra e in mare, hanno messo in piena luce, della *conservazione della forma ellissoidica del Geoide.*

Ho già accennato nel mio precedente articolo [1] a questo fatto, che non è abbastanza riconosciuto o compreso dalla maggior parte dei geologi. Anche in trattati attuali ed autorevolissimi troviamo affermato, senza quelle distinzioni che valgano a mantenere l'asserto nei limiti della realtà, che « *la surface des océans n'est pas rigoureusement celle d'un ellipsoïde de revolution... que la surface des eaux doit se relever légèrement à l'approche des rivages escarpés... que suivant la masse du continent la quantité dont la nappe d'eau se relève est plus ou moins grande et le calcul conduit à des chiffres assez différentes pour le bord des divers continent.* » [2]. Ora le moderne misure di gravità hanno rivelato come le superficie dell'Oceano Artico, dell'Atlantico e del Pacifico conservino nelle linee generali il regolare andamento ellissoidico; solo nell'immediata vicinanza delle coste, esse ne deviano leggerissimamente; ma ben più notevoli anomalie (sempre però piccolissime) si notano nei centri dei continenti e degli oceani, dovute a perturbazioni locali ancora non definite, e indipendenti dalla distribuzione superficiale delle masse.

Gli scostamenti della superficie esterna di equilibrio, o Geoide, dall'ellisoide teorico di rivoluzione, che essa ha probabilmente assunto in un periodo primordiale di fluidità, non superano i 100 m., al di sopra o al di sotto, cioè circa la 64000ª parte del raggio terrestre. In una sfera anche di parecchi metri di diametro la deformazione proporzionale sarebbe di pochi centesimi di millimetro.

Questa persistenza della forma d'equilibrio della massa

[1] « Rivista di Scienza » 1907. Anno I, n.° II-**2**, pag. 196-197.
[2] HAUG, *Traité des Géologie.* Paris, Armand Colin, Vol. I, pag. 498.

terrestre, nonostante tutte le modificazioni che tendono a deformarla, dimostra nella massa stessa uno sforzo d'adattamento, dipendente dal suo moto di rotazione, col quale essa corregge le deformità man mano che, per l'azione di cause esterne od interne, esse si formano. In particolare il lavoro di demolizione che gli agenti atmosferici compiono sui continenti, e il lavoro di trasporto che le acque eseguiscono sui prodotti di questa demolizione, hanno come effetto ultimo di alleggerire estese zone superficiali, e di aggravarne altre. In un lungo periodo geologico è la massa di un'intiera zona montuosa che viene così trasportata e deposta su una determinata zona oceanica. Se non avvenissero spostamenti compensatori, a questo trasporto di massa dovrebbe corrispondere una progressiva deformazione della superficie di livello esterna, che si gonfierebbe sulle zone aggravate e si incaverebbe sulle zone alleggerite, e, continuando il lavoro sempre nelle stesse direzioni, il Geoide dovrebbe accentuare progressivamente le sue gibbosità. Ciò non avviene: dunque si verificano spostamenti di masse profonde che compensano nei loro effetti quelli delle masse superficiali, in modo da mantenere l'equilibrio. Perchè la massa sedimentare accumulata nella zona di deposito non eserciti un'attrazione propria, che si rivelerebbe in un rigonfiamento del Geoide, bisogna che mentre si deposita si allontani dalla superficie, cioè si sprofondi, e noi abbiamo veduto che effettivamente essa preme col suo peso sul fondo facendolo abbassare: così si spiega il progressivo approfondamento delle *geosinclinali*. Per la stessa ragione la zona alleggerita deve elevarsi. Il materiale sottostante alla geosinclinale viene compresso e spinto lateralmente, in parte verso il blocco continentale da cui derivano i sedimenti, e alla fine anche questi, compressi dai successivi sovrappostisi, rientrano in profondità nel continente dalla cui superficie sono derivati. Sotto la zona alleggerita il materiale si dilata, e superficialmente deriva verso la geosinclinale, chiudendo così la circolazione. La spinta laterale del materiale profondo, che rientra sotto il continente, spiegherebbe il corrugamento degli strati in pieghe.

Questa è la teoria *isostatica*, o dell'equilibrio, di Dutton. Essa è la sola fra le teorie orogenetiche finora enunciate che tenga il debito conto della permanenza della forma del Geoide. Tutte le altre, sia quella del sollevamento, pel quale masse

profonde sono portate alla superficie senza corrispondente compenso; sia quella della contrazione, per effetto della quale estese zone sono ridotte di larghezza e quindi addensate e sollevate, mentre i bacini si sprofondano per mancanza di sostegno; sia quella dello scivolamento di Schardt e Reyer; sia finalmente la teoria termica (cui non ho finora accennato, perchè è la più evidentemente inadeguata) secondo la quale i sedimenti si corrugherebbero entro le geosinclinali per il progressivo riscaldamento e la conseguente dilatazione degli strati che rimangono sepolti sotto un mantello sempre crescente di altri sedimenti.... tutte, ripeto, vanno incontro, oltre che alle obbiezioni accennate, a questa fondamentale di non dar ragione della forma del globo. Tutti i processi in esse considerati sono processi deformatori senza compenso locale, che valga a correggere le anomalie di gravità corrispondenti a masse sollevate nell'aria, o abbassate nel vuoto sottostante o costipate in aree più ristrette.

La teoria isostatica non ha molti sostenitori tra i geologi, che partono da un concetto troppo rigido della rigidità della Terra dedotto dalle misure di resistenza dei suoi materiali in piccole dimensioni. Inoltre sembra che essa limiti il processo orogenetico alle regioni costiere e presupponga il principio della *permanenza dei continenti e degli oceani,* cioè la conservazione, nelle sue linee principali, attraverso tutte le ere geologiche del disegno geografico attuale; noi vediamo infatti che i sollevamenti si ripetono sempre sui continenti alleggeriti, e gli sprofondamenti sui mari aggravati. Essa quindi non darebbe ragione della scomparsa di vasti continenti e di vasti mari, che pure il geologo si crede costretto ad ammettere per un complesso di argomenti stratigrafici e paleontologici. Sembra anzi a prima vista che non solo i continenti, ma le catene montuose, dovrebbero conservarsi in eterno nel loro posto originale per quel processo di circolazione chiusa, secondo il quale il loro abbassamento superficiale per degradazione viene compensato dal sollevamento.

Quanto al primo argomento abbiamo già veduto che la Terra, nonostante la rigidità del materiale che la costituisce, per la grandiosità delle sue dimensioni e delle masse trasportate, si comporta come un corpo plastico, o meglio vischioso. Quanto al secondo argomento si può rispondere non essere vero che lo sprofondamento per il peso dei prodotti della

demolizione superficiale si debba verificare esclusivamente nelle geosinclinali oceaniche. Noi abbiamo anche attualmente una rilevante frazione delle aree continentali, circa $^1/_4$, che è costituita da bacini idrografici chiusi, le cui acque superficiali non trovano libero deflusso al mare, e abbandonano le loro alluvioni in terra ferma; nelle regioni più calde, o meno umide ciò avviene anche in bacini non chiusi, per l'evaporazione completa dei corsi d'acqua e il loro assorbimento nelle proprie alluvioni. Estesissime regioni desertiche, di steppa, di loess si trovano in queste condizioni, e più estese dovevano essere in periodi climatologici più caldi ed asciutti, come certamente si verificarono più volte nelle passate ere geologiche. Si deve ammettere, per inevitabile deduzione dai principii svolti precedentemente, che tutte queste aree sono soggette a sprofondamento, e che potranno in un avvenire più o meno remoto essere invase dal mare. Già alcune di esse sono a livello inferiore del livello del mare. D'altro canto un fondo d'alto mare, che si trovi racchiuso tra due geosinclinali costiere, per la spinta laterale che riceve da queste nel loro sprofondamento, o meglio per il flusso profondo di materiale che da quelle deriva, potrà elevarsi fino ad emergere; e in generale, poichè sollevamento e sprofondamento non possono essere limitati alle sole zone più alleggerite o più aggravate, ma necessariamente debbono estendersi anche a regioni circostanti di terra o di mare, si comprende la possibilità di estese oscillazioni della linea di confine tra il mare e la terra. Del resto è noto che il principio della *permanenza dei continenti,* nelle loro linee generali, è sostenuto con validissimi argomenti da autorità riconosciute, come Darwin, e che la facilità colla quale i geologi ricorrono al *deus ex machina* dei continenti scomparsi, onde risolvere difficoltà spesso assai meno perturbanti dell'artificio stesso cui si ricorre, non è ultima causa della diffidenza con cui sono accolte dai profani le loro ricostruzioni di geografia geologica. Le quali riceverebbero d'altro lato un colpo mortale dalla moderna tectonica delle falde di ricoprimento, secondo la quale formazioni sedimentari depositatesi colle rispettive faune in un punto sarebbero state trasportate durante un periodo orogenetico a centinaia di chilometri di distanza e alla fine di periodi orogenetici successivi potrebbero anche, se si tratta di formazioni molto antiche, trovarsi migliaia di chilometri

lontane dal punto in cui originariamente si depositarono sul fondo del mare.

Quanto al terzo argomento, della permanenza dei rilievi montuosi, osserviamo che in una vasta area continentale, su cui si estenda una complessa rete fluviale, che deriva da un sistema montuoso generalmente situato su un lato del continente (Ande-Rocciose per l'America, sistema alpino-imalajano per l'Eurasia), il più rapido alleggerimento non si verifica sopra la catena stessa, dove le acque non hanno ancora sufficiente energia per trasportare i prodotti della degradazione subaerea delle rocce, ma in una zona prealpina dove la forza delle acque è concentrata in corsi cospicui ed energici. L'asse di più rapido sollevamento sarebbe quindi, anche indipendentemente da altre cause, spostato dall'asse del rilievo primitivo. Il sollevamento stesso è poi più intenso dell'abbassamento superficiale per degradazione, perchè prodotto non solo dalla dilatazione degli strati sottostanti che vengono alleggeriti, ma anche dall'afflusso e dalla pressione del materiale proveniente in profondità dalla geosinclinale, dalle regioni profonde e in generale da tutta la regione circostante. Del resto una discussione rigorosa degli spostamenti di massa, che possono essere determinati in superficie e in profondità dal trasporto superficiale di materia dovuto agli agenti meteorologici, non potrà essere fatto che per via matematica e per approssimazioni successive alle condizioni reali del trasporto stesso.

Il problema generale si imposta in questo modo: data una massa rotante fortemente vischiosa, una cui superficie di livello esterna è un'ellissoide di rivoluzione, e che è soggetta soltanto all'attrazione reciproca delle sue parti, determinare quali spostamenti debbono prodursi in essa per effetto di un dato trasporto di masse sulla superficie, perchè la superficie esterna di livello conservi la sua forma.

Una prima approssimazione fu tentata dallo scrivente [1] considerando il caso di un suolo elastico, o solido indefinito a superficie piana, compresso superficialmente lungo una zona e spinto verso l'alto lungo un'altra zona parallela alla prima, e supponendo queste forze variabili in modo così lento, che in ogni

[1] *Teoria elastica delle dislocazioni tectoniche e sue Applicazioni geologiche.* (Rendic. Accad. Lincei 1907, pag. 384 e 499).

istante il solido possa considerarsi come in equilibrio. Gli spostamenti elastici successivi prodotti in tal caso si riassumono in un movimento generale degli strati superiori nella direzione dalla zona tirata alla zona compressa. Sotto la striscia racchiusa tra le due zone questo movimento diminuisce colla profondità, essendo massimo in superficie; fuori di detta striscia cresce nei primi strati colla profondità essendo nullo in superficie; ad una certa profondità sotto la striscia il movimento si inverte. Sotto la zona compressa e nel suo interno vi è sprofondamento, sotto quella tirata vi è sollevamento. Questo sistema di movimenti determina complessivamente una rotazione per la quale la massa sprofondata penetra sotto quella che si solleva, e anche le masse più profonde, sotto di questa, entrano nel movimento d'ascesa. Le masse che si elevano entrano poi nel movimento superiore di deriva verso la zona sprofondata e vengono così a rovesciarsi al disopra dei sedimenti più recenti, che sono entrati dopo nella circolazione profonda. Sotto la striscia fra le zone sollecitate si sviluppano pressioni elastiche convergenti verso il mezzo, e che nel caso di materiale stratificato potranno determinare delle pieghe, mentre sotto le due zone stesse si hanno tensioni divergenti, che potranno determinare delle fratture. Per il maggior scorrimento degli strati superiori entro la striscia, le pieghe si rovescieranno verso l'area di sprofondamento, mentre fuori dalla striscia, oltre la zona di massimo sollevamento, dove lo scorrimento superficiale è nullo, esse si rovescieranno in senso opposto. Attorno alla zona stessa avremo quindi un ventaglio di pieghe rovesciate in senso opposto. Il movimento di rotazione è tanto più ampio quanto più lontano si compie dal centro della rotazione stessa e quindi si avranno negli strati superiori pieghe o falde più allungate che ricoprono pieghe o falde più ristrette. Noi troviamo qui riprodotti i fatti più caratteristici delle pieghe e delle falde di ricoprimento che Heim, Suess, Lugeon, Termier e Schmidt avrebbero riscontrato nelle Alpi.

Sotto la conca di sprofondamento il materiale si condensa e la condensazione totale rappresenta una massa attraente, che compensa in parte il difetto superficiale di massa rappresentato dalla conca stessa; e se la conca si ricolma d'acqua, la massa di questa compensa quasi perfettamente il difetto rimanente. Per gli effetti della gravità esterna la deforma-

zione superficiale non determina quindi modificazione sensibile nella superficie di livello che rimane piana com'era inizialmente quando coincideva colla superficie del suolo. Abbiamo cioè in questo caso una deformazione *isostatica*, e si dimostra che lo stesso risultato si avrebbe qualunque fosse la distribuzione della pressione superficiale [1]. Analogamente sotto la regione che si eleva il materiale si dirada, e la dilatazione complessiva compensa in parte, come una massa negativa, l'attrazione locale del rilievo superficiale: in parte, perchè qui non vi è un compenso suppletivo come quello dell'acqua nel caso delle cavità. E infatti le misure di gravità nelle Alpi dimostrano che l'attrazione locale non è interamente compensata da un difetto di massa profonda.

L'aver considerato il materiale come elastico, invece che fortemente vischioso, come il ghiaccio dei ghiacciai, non può aver condotto che ad attenuare gli effetti, non a modificare essenzialmente le linee fondamentali del processo, che in realtà sarà assai più rapido e continuo e grandioso nell'ipotesi di una massa dotata di un certo grado di fluidità.

I sedimenti che si sprofondano possono raggiungere anche temperature elevate e risalire poi alla superficie completamente trasformati, o *metamorfosati*. A quelle profondità possono anche svolgersi fenomeni di vulcanismo latente, per lo sviluppo di gas, che è favorito dal dilatarsi dei materiali stirati verso l'alto. Le masse semifluide potranno così injettarsi per forza propria espansiva fra gli strati sovrastanti, e aprirsi la strada fino alla superficie, dando origine a fenomeni di vulcanesimo esterno, o consolidandosi ancora in profondità come masse intrusive fra strati molto più recenti. Queste masse intrusive entrando poi nella circolazione si rovescieranno le une sulle altre con interposizione di materiali più recenti, come abbiamo visto delle falde di gneiss del Sempione.

Siamo sempre nel campo delle teorie, che fatti nuovi e una discussione matematica più completa e rigorosa potranno ancora trasformare radicalmente. La grandiosità e la complessità del fenomeno è tale, che non può capire negli angusti confini di pochi postulati da cui si svolga il filo logico di una costruzione matematica. Ma se di teorie abbiamo bisogno, e

[1] De Marchi, *Teoria elastica dell'isostasi terrestre.* (Rendic. Accad. Lincei 1907, pag. 910).

se vogliamo che esse non abbiano la vita di un giorno e il significato di semplici opinioni, che a vicenda si distruggono, ma che evolvano naturalmente ciascuna nella successiva, per il progressivo ampliamento dei postulati di fatto su cui debbono fondarsi, è necessario tener presente che il problema orogenetico è un problema meccanico, che va discusso coi postulati e coi metodi della meccanica.

Padova, Università.