

[www.gdsdolomiti.org](http://www.gdsdolomiti.org)

[info.gdsdolomiti@gmail.com](mailto:info.gdsdolomiti@gmail.com)



*Il Gruppo Divulgazione Scientifica  
presenta*

# *Pillole di Scienza*

*terza edizione  
stagione 2010-2011*

*in collaborazione con*

*Radio Belluno*

# Indice

<b>Lettera del Presidente</b>	<b>5</b>	prietà dei neutrini?	14
		✓ Cosa si intende per astronomia dei neutrini?	14
<b>L'energia (Nart)</b>		<b>La petrografia (Alfieri)</b>	
✓ Quali sono le origini dell'energia?	7	✓ Cos'è la petrografia?	15
✓ Cos'è l'energia?	7	✓ Le rocce magmatiche	15
✓ Quali sono le unità di misura dell'energia?	7	✓ Le rocce intrusive	16
✓ Cos'è l'energia meccanica?	8	✓ Che roccia è la sienite?	16
✓ Cos'è l'energia di legame?	8	✓ Le rocce effusive	16
✓ Cos'è l'energia nucleare?	8	✓ Il porfido o ignimbrite	16
✓ Cos'è l'energia interna?	9	✓ Le rocce sedimentarie	17
✓ Cos'è l'energia libera?	9	✓ La dolomia	17
✓ Cos'è l'entalpia?	9	✓ L'arenaria	17
✓ Cos'è l'entropia?	9	✓ I conglomerati	18
✓ Ci sono delle eccezioni alla regole dell'aumento dell'entropia?	10	✓ Le rocce metamorfiche	18
✓ Cos'è l'equilibrio termodinamico?	10	✓ La fillade	19
✓ Cos'è l'equilibrio chimico?	10	✓ Il marmo	19
<b>Neutrini, particelle solitarie e sfuggevoli (Casanova)</b>		<b>Gli acceleratori di particelle (Casanova)</b>	
✓ Cosa sono i neutrini?	11	✓ Cosa sono gli acceleratori di particelle?	19
✓ Cosa si intende per decadimento beta?	11	✓ Quando furono costruiti i primi acceleratori di particelle?	19
✓ In cosa consiste l'ipotesi di Pauli?	11	✓ Quali sono le principali componenti di un acceleratore?	20
✓ Chi inventò il nome neutrino?	12	✓ Come si accelera un fascio di particelle?	20
✓ Quando fu scoperto sperimentalmente il neutrino?	12	✓ Come s'incurva un fascio di particelle in un acceleratore circolare?	20
✓ Furono scoperti altri neutrini dopo il 1956?	12	✓ Come possono essere classificati gli acceleratori?	21
✓ Cosa si intende per oscillazione dei neutrini?	13	✓ Cos'è la luce di sincrotrone?	21
✓ Che esperimenti si utilizzano per studiare le oscillazioni dei neutrini?	13	✓ Cos'è la luminosità di un acceleratore?	21
✓ Quando fu osservata la prima volta l'oscillazione di un neutrino?	13	✓ Come si può aumentare la luminosità di un acceleratore?	22
✓ Cos'è successo nei laboratori del Gran Sasso durante il 2010?	14	✓ Qual è il più grande acceleratore lineare costruito fino ad oggi?	22
✓ Ci sono progetti futuri per lo studio delle pro-			

- ✓ Quando è stato costruito il primo anello di accumulazione? 22
- ✓ Quali sono state le più importanti scoperte fatte agli acceleratori? 23

### **La prevenzione dei terremoti (Peruzza)**

- ✓ Introduzione 23
- ✓ Cos'è un terremoto 23
- ✓ Dove avvengono generalmente i terremoti? 24
- ✓ Cosa sono i maremoti? 24
- ✓ Qual è l'unità di misura di un terremoto? 24
- ✓ Si possono prevedere i terremoti? 25
- ✓ Qual è la sismicità dell'Italia? 25
- ✓ In che modo si possono rendere sicure le nostre costruzioni? 26
- ✓ Cos'è il rischio sismico? 26
- ✓ Cosa succede durante un terremoto? 27
- ✓ Cosa dobbiamo fare in caso di terremoto? 27
- ✓ Nella nostra regione, qual è la situazione terremoti? 28
- ✓ Cosa si fa nella nostra regione per ridurre il rischio sismico? 28

### **Dolomia e dolomitizzazione (Alfieri)**

- ✓ Presentazione 28
- ✓ La dolomite e la dolomia 29
- ✓ I primi studi 29
- ✓ La "Precipitazione primaria" 29
- ✓ "Precipitazione secondaria": le sei teorie del 1800 30
- ✓ Ferdinand von Richthofen 30
- ✓ Edmund Mojsisovics von Mojsvár 30
- ✓ Le conoscenze odierne 31
- ✓ Le dolomie per precipitazione diretta 31
- ✓ Le dolomie di sostituzione 31
- ✓ Modelli ipersalini 32
- ✓ Il Modello Salmastro 32
- ✓ Conclusioni 32

### **La tavola periodica (Nart)**

- ✓ Quando nacque la necessità della tavola periodica? 33
- ✓ Cosa accadde nel 1860? 33
- ✓ Cosa scoprirono Mendeleev e Meyer nel 1869? 33
- ✓ Vennero scoperti questi nuovi elementi chimici? 34
- ✓ Ci furono dei problemi che dovettero far ripensare i principi fondamentali della tavola periodica? 34
- ✓ Quali sono gli elementi fondamentali della moderna tavola periodica? 34
- ✓ A cosa sono legati i numeri quantici che descrivono la tavola periodica? 35
- ✓ La legge delle ottave è simile alla regola dell'ottetto? 35
- ✓ Come varia il raggio atomico degli elementi? 35
- ✓ Come varia l'energia di ionizzazione degli elementi? 36
- ✓ Come varia l'affinità elettronica degli elementi? 36
- ✓ Ci sono delle eccezioni alla regola dell'ottetto? 36

### **La matematica discreta (Alessandrini)**

- ✓ Introduzione 37
- ✓ Cosa sono i grafi? 37
- ✓ Perché sono famosi i ponti della città di Königsberg? 38
- ✓ Cos'è il problema del commesso viaggiatore? 38
- ✓ Cosa sono i "sei gradi di separazione"? 38
- ✓ Cos'è il teorema dei quattro colori? 39
- ✓ Cos'è la teoria dei giochi? 39
- ✓ Cos'è la teoria dei numeri? 39
- ✓ Cos'è il fattoriale? 40
- ✓ Cos'è un quadrato latino? 40
- ✓ Cos'è un quadrato magico? 40
- ✓ Perché i matematici sono molto interessati al

gioco degli scacchi?	41
✓ Cos'è una tassellatura?	41

### **I giacimenti fossiliferi (Piat)**

✓ Introduzione	42
✓ Ediacara	42
✓ Burgess	42
✓ Bundenbach	43
✓ Mazon Creek	43
✓ Trias delle Prealpi Lombarde	44
✓ Besano – monte San Giorgio	44
✓ Holzmaden	45
✓ Solnhofen	45
✓ Pietraroja	45
✓ Mongolia - deserto di Gobi	46
✓ Bolca	46
✓ Messel	47

### **Dall'origine della massa alla “particella di Dio” (Casanova)**

✓ Cos'è la massa?	47
✓ Chi è il bosone di Higgs?	48
✓ Perché è così importante il bosone di Higgs?	48
✓ Cosa si intende per simmetria elettrodebole?	48
✓ Cosa si intende per rottura spontanea della simmetria?	49
✓ In cosa consiste il Meccanismo di Higgs?	49
✓ Quando fu sviluppato il Meccanismo di Higgs?	49
✓ Chi è Peter Higgs?	50
✓ Chi conìò l'espressione “particella di Dio”?	50
✓ Quando fu confermato sperimentalmente il modello elettrodebole?	50
✓ Come si può osservare sperimentalmente il bosone di Higgs?	51
✓ A che punto è la ricerca del bosone di Higgs?	51

### **Le costanti fisiche (Nart)**

✓ Introduzione	51
✓ Cos'è la costante di gravitazione universale	

$G?$	52
✓ Cos'è l'accelerazione gravitazionale $g?$	52
✓ Cos'è la costante di Plank $h?$	52
✓ Cos'è la costante di struttura fine $\alpha?$	53
✓ Cos'è la costante di Faraday $F?$	53
✓ Cos'è la costante di Stefan $\sigma?$	53
✓ Cos'è la costante dei gas ideali $R?$	54
✓ Cos'è la costante di Coulomb $k?$	54
✓ Cos'è il numero di Reynolds?	54
✓ Cos'è la costante di Rydberg $R_M?$	55
✓ Cos'è la permeabilità magnetica nel vuoto $\mu_0?$	55
✓ Cos'è la costante dielettrica del vuoto $\epsilon_0?$	56

### **La Luna (Alfieri)**

✓ Introduzione	56
✓ Generalità	56
✓ Moto di rotazione e sistema Terra-Luna	57
✓ Moto di rivoluzione e fasi lunari	57
✓ Mese sidereo e Mese sinodico	57
✓ La Luna e le maree	58
✓ Mese draconico, retrogradazione dei nodi ed eclissi	58
✓ Eclissi di Luna	58
✓ Eclissi di Sole (occultazione)	59
✓ Librazioni	59
✓ Ipotesi sull'origine della Luna	59
✓ Ipotesi della fissione e della cattura	60
✓ Ipotesi dell'accrescimento e dell'impatto	60

### **Dolomiti: leggende e geologia (Piat)**

✓ Introduzione	61
✓ La leggenda dei Monti Pallidi	61
✓ La leggenda di Re Laurino (1)	61
✓ La leggenda di Re Laurino (2)	62
✓ I Crodères (1)	62
✓ I Crodères (2)	63
✓ Il Coccodrillo delle Buse Mole	63
✓ Il Lago di Agordo	63
✓ Cornia e Cordova	64

✓ <i>Miniere e minatori</i>	64
✓ <i>L'Aurora</i>	65
✓ <i>La Delibana (1)</i>	65
✓ <i>La Delibana (2)</i>	65

***I paradossi matematici (Alessandrini)***

✓ <i>Introduzione</i>	66
✓ <i>Cos'è il paradosso di Achille e la tartaruga?</i>	66
✓ <i>Cos'è il paradosso del barbiere?</i>	67
✓ <i>Cos'è il paradosso di Condorcet?</i>	67
✓ <i>Cos'è il paradosso del compleanno?</i>	67

✓ <i>Cos'è il paradosso della linea costiera?</i>	67
✓ <i>Cos'è il paradosso del mentitore?</i>	68
✓ <i>Cos'è il principio d'esplosione?</i>	68
✓ <i>Cos'è il paradosso del sorite?</i>	68
✓ <i>Cos'è il paradosso dell'Hotel Infinito?</i>	69
✓ <i>Esiste un solo tipo di infinito?</i>	69
✓ <i>Che differenza c'è tra il numero 0,9 (periodico) e il numero 1?</i>	69
✓ <i>Cos'è il principio della piccionaia?</i>	70

## **Lettera del Presidente**

*Cari lettori di Pillole di Scienza, desidero aprire questa prefazione con un ringraziamento ai miei colleghi del Consiglio Direttivo ed agli amici esterni che hanno collaborato a questa stagione. Tutti sono stati molto bravi a garantire la terza edizione della rubrica radiofonica, tra sempre più impegni personali e di lavoro; d'altronde, si sa com'è, più gli anni salgono e più importanti diventano gli impegni su tutti i fronti, famiglie comprese. Senza l'impegno di tutti non saremmo qui a darvi la possibilità di leggere queste pagine.*

*Ormai il GDS cresce a dismisura, seguendo un po' la legge di Moore dei microchip; siamo richiesti in nuove attività da diverse associazioni ed amministrazioni, anche con iniziative innovative volte allo sviluppo del turismo scientifico nelle Dolomiti, pianifichiamo le nostre attività future mettendole al "budget" del tempo disponibile, come una vera azienda della scienza. Proprio per questo abbiamo deciso, non senza dubbi e rammarichi, di terminare questa avventura radiofonica di Pillole di Scienza per avere a disposizione più tempo da dedicare alle nuove attività.*

*Non spaventatevi! Ci sentirete comunque ancora sulle frequenze di Radio Belluno: stiamo, infatti, programmando nuovi format per portare le conoscenze scientifiche direttamente a casa vostra. Ma di cosa si tratta non vi anticipo nulla, lo scoprirete a tempo debito, ascoltando la radio, leggendo le mail che vi invieremo oppure visitando il nostro sito [www.gdsdolomiti.org](http://www.gdsdolomiti.org).*

*Insomma, mandare in pensione una creatura che è sempre stata molto apprezzata non è facile, tuttavia, ci vuole coraggio anche nell'innovare e senza innovazione, che richiede a volte sacrificio, non si può migliorare ed offrire un prodotto nuovo. La Fiat 500 andava di moda, le vendite erano alle stelle in tutto il mondo, ma venne il momento di metterla da parte per nuovi modelli. Negli ultimi anni è stata riscoperta e non si può escludere che in futuro succeda lo stesso con Pillole di Scienza.*

*In questa edizione troverete delle piccole novità editoriali: le Pillole sono riportate per argomento-autore, anziché alternate tra i due relatori del mese, dato che in quest'ultima edizione si è preferito sviluppare un determinato tema, piuttosto che discutere argomenti sempre differenti tra loro.*

*Non mi resta che augurarvi una piacevole lettura e ringraziarvi per l'acquisto di questo piccolo, ma importante frutto del nostro lavoro che ci permette di continuare nella nostra missione.*

*Il Presidente GDS  
Dr. Fabiano Nart*



# L'energia

*“Vi sono due specie di lavoro: la prima consiste nell'alterare la posizione di una cosa su o presso la superficie della Terra, relativamente a un'altra cosa; la seconda consiste nel dire ad altri di farlo.”*

*B. RUSSELL*

## **Quali sono le origini dell'energia?**

Dal punto di vista rigoroso l'unica fonte di energia conosciuta nell'universo è la materia che, annullando la propria massa, si trasforma in energia secondo la relazione di Einstein  $E=mc^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto. Sempre da questo punto di vista, le fonti primarie di energie disponibili sulla Terra sono il Sole e la Terra stessa che crea il campo gravitazionale (con un contributo anche dalla Luna). Da un punto di vista pratico, però, si preferisce considerare fonti di energia quelle che possono trasformarsi in forme di energia direttamente sfruttabili. Pertanto sono fonti sia le sostanze in grado di liberare l'energia che contengono (carbone, Uranio), sia i fenomeni che con il loro evolversi liberano energia (combustione, fissione nucleare). Un caso particolare è l'energia elettrica che è inutilizzabile nelle sue manifestazioni naturali, quantitativamente piccole, mentre è facilmente producibile in grandi quantità a partire da diverse fonti. Nell'attuale fase della tecnologia l'elettricità costituisce la forma di energia più facilmente distribuibile e diventa quindi a sua volta una fonte energetica disponibile praticamente in ogni luogo.

## **Cos'è l'energia?**

L'energia è una grandezza fisica definita generalmente come la capacità di compiere lavoro. Pertanto, quando si parla di energia (termica, nucleare, etc...) o di fonti di energia (carbone, petrolio, etc...) si fa in genere riferimento a entità in grado di liberare una certa quantità di energia e quindi consentire l'effettuazione del relativo lavoro. Sarebbe tuttavia errato pensare all'energia come a un'entità indifferenziata. Dal punto di vista meccanico l'energia si presenta sotto forma di due forme diverse che consentono applicazioni tra loro differenti. Da un punto di vista fisico più generale l'energia si presenta sotto innumerevoli forme diverse che si trasformano l'una nell'altra e che acquistano attributi diversi, spesso casualmente, in base al contesto in cui intervengono. Si parla quindi di energia di legame, nucleare, elettrica etc... Dal punto di vista metodologico esistono quindi due modi diversi di parlare di energia; da una parte vi è il modo puramente formale di parlare di energia come un concetto astratto, fondamentalmente unitario di una funzione di alcune variabili del sistema, dall'altra vi è il modo tipico del linguaggio comune, ma anche scientifico, per il quale l'energia viene ad assumere il concetto di una “sostanza”. Secondo poi la termodinamica esistono altri concetti di energia, come ad esempio entalpia, energia libera, etc...

## **Quali sono le unità di misura dell'energia?**

Le unità di misura dell'energia più comunemente utilizzate sono l'elettronvolt, eV ed il Joule, J (convertibile in caloria, cal). L'elettronvolt trova più applicazioni nel campo della fisica delle particelle o nucleare. 1 eV è definito come l'energia cinetica acquisita da un elettrone che si muove in un campo elettrico uniforme sotto la differenza di potenziale di 1 Volt. Pertanto  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . In base alla relazione di equivalenza massa-energia, si usa spesso esprimere le masse delle particelle in eV o suoi multipli, ad esempio la massa di un elettrone è 0,511 MeV e quella di un protone di 939 MeV, quella del bosone di Higgs di 90 GeV. Il Joule è invece l'unità fondamentale del Sistema



Internazionale ed è definito come il lavoro prodotto da una forza di 1 N (Newton) quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione della forza, pertanto  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$ . Come detto il J è facilmente convertibile in caloria, in questo caso  $1 \text{ J} = 4,1486 \text{ cal}$ . Questa unità trova più spesso applicazione per la misura del calore e in applicazioni alimentari per indicare il contributo calorico dei cibi. A tal proposito è necessaria una precisazione: quelle che vengono chiamate calorie alimentari sono in realtà da intendersi come kilocalorie, ovvero 1000 volte tanto. Questo per evitare di lavorare e di scrivere sulle etichette dei cibi numeri a 5 o 6 cifre.

### ***Cos'è l'energia meccanica?***

Il concetto di energia può essere introdotto in maniera del tutto formale; in questo modo in un sistema meccanico si viene ad individuare una speciale entità che rimane costante nel tempo e che è strettamente collegata con la capacità di produrre lavoro. In particolare, un oggetto con una data massa  $m$ , una posizione in altezza  $h$  ed una velocità  $v$ , di questo sistema meccanico possiederà due tipi di energia: energia potenziale e cinetica. L'energia potenziale, che sarà proporzionale alla sua massa e alla sua altezza, è indicata da  $U = mgh$ , dove  $g$  è la costante gravitazionale. Questo vuol dire che più in alto si trova l'oggetto più grande sarà la sua energia potenziale: difatti un oggetto che ci cade in testa ci fa più male se cade da molto in alto. L'energia cinetica è invece legata alla velocità dell'oggetto ed è definita da  $E = \frac{1}{2} mv^2$ , ovvero più veloce viaggia l'oggetto maggiore è la sua energia: difatti ci facciamo più male se a grande velocità sbattiamo contro un muro. A energia potenziale e cinetica possono essere sempre ricondotte tutte le manifestazioni più comuni. Ad esempio, il calore non è altro che agitazione termica delle molecole, quindi energia cinetica; le energie di legame sono invece riconducibili ad energia potenziale, così come le energie elettromagnetica ed elettrostatica.

### ***Cos'è l'energia di legame?***

L'energia di legame è l'energia che si libera quando due atomi si legano tra di loro per formare una molecola. Considerati due elementi con simile elettronegatività, A e B che danno vita quindi ad un legame chimico covalente, l'energia di legame è uguale alla media tra l'energia di legame della molecola A-A e l'energia di legame della molecola B-B. Se l'elettronegatività dei due atomi è differente, come avviene per i composti ionici, l'energia di legame rispetto alla media delle energie di legame degli atomi costituenti risulta superiore di un termine detto energia di risonanza. La molecola cioè risulta più stabile, per la possibilità che ha di rimanere tra una forma covalente ed una forma ionica. Si parla di energia di legame anche nel caso dei nucleoni del nucleo atomico. In tal caso, se si misura la massa di un nucleo e la si confronta con la somma delle masse dei nucleoni che lo costituiscono si trova un difetto di massa  $\Delta m$ ; la quantità  $\Delta mc^2$  rappresenta l'energia di legame del nucleo. Anche un sistema gravitazionale come quello Sole-Terra possiede un'energia gravitazionale che essendo negativa viene interpretata come energia di legame.

### ***Cos'è l'energia nucleare?***

L'energia nucleare è la forma di energia che si manifesta durante le trasformazioni del nucleo atomico. Le trasformazioni che liberano quantità di energia interessanti ai fini pratici sono le fissioni, rotture dei nuclei pesanti e la fusione, unione di nuclei più leggeri. Anche nei decadimenti radioattivi si libera energia interna. Attualmente è possibile utilizzare soltanto l'energia che si libera nella fissione di nuclei come ad esempio  $^{235}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$ . L'energia nucleare per ogni nucleo che si spezza è di circa 200 MeV; tenendo conto che parte dell'energia viene sottratta dalle radiazioni  $\gamma$ , l'energia prodotta sotto forma di calore è circa  $8 \cdot 10^{13} \text{ J/kg}$  di isotopo fissile. Uno degli obiettivi della ricerca è di controllare anche l'energia che si sprigiona nelle reazioni di fusione di nuclei leggeri (Deuterio, D, Trizio, T, Elio, He e Litio, Li) la quale, a parità di quantità di materia, è dello stesso ordine di grandezza di quella liberata dalle reazioni di fissione. Questo tipo di energia risulta libera

da prodotti di decadimento radioattivi, come avviene per la fissione, inoltre viene prodotta partendo da elementi chimici più abbondanti. Si capisce quindi il grande interesse in tale ambito.

### ***Cos'è l'energia interna?***

In termodinamica è una funzione di stato che esprime l'energia di un sistema in un determinato stato, indipendentemente da come l'abbia raggiunto. Per un gas perfetto l'energia interna  $U$ , intesa come la somma delle energie cinetiche di tutte le molecole costituenti, dipende solo dalla temperatura mediante la relazione differenziale  $dU = n c_v dT$ , dove  $n$  è il numero di moli,  $c_v$  il calore specifico e  $T$  la temperatura assoluta (espressa cioè in Kelvin). Per un gas reale l'energia interna dipende anche dal volume. In un sistema termodinamico isolato l'energia interna si mantiene costante; in un processo termodinamico la variazione di energia interna  $\Delta U$  risulta data da  $\Delta U = Q - L$ , dove  $Q$  è la quantità di calore scambiata ed  $L$  il lavoro compiuto dal sistema. In particolare, in un processo termodinamico adiabatico, per il quale risulta  $Q = 0$ , la variazione di energia interna è pari al lavoro compiuto sul sistema dall'ambiente esterno.

### ***Cos'è l'energia libera?***

In termodinamica per energia libera si intendono due funzioni di stato: energia libera di Helmholtz ed energia libera di Gibbs. Quella di Helmholtz viene definita come  $F = U - TS$ , dove  $U$  è l'energia interna,  $T$  la temperatura assoluta ed  $S$  l'entropia. L'energia libera di Gibbs viene definita come  $G = H - TS$ , dove  $H$  è l'entalpia del sistema. A temperatura costante la variazione di energia libera di Helmholtz per un sistema che subisce una trasformazione termodinamica (e.g. un gas che si espande in un cilindro munito di pistone) è uguale al lavoro massimo che si potrebbe ottenere per quella trasformazione e cioè se fosse condotta reversibilmente. Invece la variazione di energia libera di Gibbs per una trasformazione termodinamica condotta a temperatura e pressione costanti fornisce il lavoro utile ottenibile, cioè la differenza tra il lavoro massimo e il lavoro fatto nelle espansioni contro la pressione esterna.

### ***Cos'è l'entalpia?***

L'entalpia è una funzione di stato che serve a caratterizzare un sistema termodinamico; viene anche detta calore totale o contenuto termico del sistema e viene indicata dalla lettera  $H$ . Per un fluido si definisce entalpia la somma dell'energia interna  $U$  e del prodotto tra pressione  $p$  e volume  $V$ , cioè  $H = U + pV$ . Per un gas perfetto l'entalpia dipende solo dalla temperatura e se il gas subisce una trasformazione isobara, cioè a pressione costante, l'entalpia eguaglia la quantità di calore scambiata con l'ambiente. Le variazioni di entalpia dipendono sempre dagli stati iniziale e finale del sistema, qualunque sia il modo con cui venga realizzata una trasformazione, è quindi definita una grandezza di stato. Il concetto di entalpia interviene nello studio di molti fenomeni (cambiamenti di stato, effetto Joule-Thomson) e nello studio del comportamento di varie macchine termiche (e.g. turbine) in cui la quantità di lavoro fornita è, con buona approssimazione, uguale alla variazione di entalpia subita dal fluido lavorante.

### ***Cos'è l'entropia?***

L'entropia, indicata dalla lettera  $S$ , è una grandezza termodinamica che esprime la tendenza di un sistema isolato, senza cioè scambio di materia e calore con l'esterno, a evolvere verso uno stato di equilibrio termico. Il concetto di entropia fu introdotto da Clausius per correlare la quantità infinitesimale di calore  $Q$  scambiata da un sistema in un processo termodinamico con la temperatura  $T$  delle sorgenti con cui avviene lo scambio e non con la variazione di temperatura del sistema stesso. Anche l'entropia, come l'entalpia, è una funzione di stato, dipende cioè solo dagli stati iniziale e finale di un sistema e viene definita, nella sua forma macroscopica, come il rapporto tra il calore  $Q$  scambiato e la  $T$  della sorgente, ovvero  $S = Q/T$ . Una definizione equivalente di entropia, seppur a

prima vista non analoga, è indice del disordine macroscopico di un sistema. Un aumento di entropia è indice del passaggio del sistema verso stati di maggior disordine, ad esempio il passaggio dallo stato solido a quello liquido dell'acqua. Nella fase solida le molecole sono bloccate nel reticolo cristallino, mentre nella fase liquida le molecole, soggette a minori forze coesive, sono più libere di muoversi, ossia più disordinate. L'aumento di disordine corrisponde a reazioni o trasformazioni spontanee, cioè che portano a stati con minor energia e quindi più stabili. L'entropia diventa quindi grandezza termodinamica per capire a priori se una reazione o trasformazione sarà spontanea, ovvero se si deve intervenire sul sistema per forzarla.

### ***Ci sono delle eccezioni alle regole dell'aumento dell'entropia?***

Come di norma, anche con l'entropia ci sono delle eccezioni; l'esempio classico è quello del Diamante. Il Diamante è composto da Carbonio, o meglio il Diamante è una delle forme allotropiche del Carbonio. Per allotropia si intende la capacità di un elemento chimico di cristallizzare in diversi modi e di dare quindi vita a composti differenti. Nello specifico, il Carbonio può cristallizzare a formare il Diamante, oppure la Grafite (in parole povere il carbone da combustione, lo stesso elemento può formare due composti che sono proprio agli opposti come valore commerciale ed utilizzo). Il Diamante dal punto di vista cristallografico è formato da varie piramidi che si toccano ai vertici, vertici che sono occupati da un atomo di Carbonio; la Grafite invece ha una struttura meno rigida, formata da strati con strutture esagonali con ai vertici degli stessi gli atomi di Carbonio. A rigore quindi la struttura più libera da interazioni e quindi più disordinata è quella della Grafite, quindi il Diamante dovrebbe trasformarsi spontaneamente in Grafite col passare del tempo. Fortunatamente per le donne questo non accade, se non in tempi lunghi... Ciò è dovuto al fatto che al processo di aumento dell'entropia, quindi termodinamico, compete quello cinetico, ovvero quello basato sulle velocità di reazioni. Stante all'aspetto cinetico il Diamante si trasformerebbe in Grafite in un tempo che tende all'infinito, quindi le donne sono al sicuro!

### ***Cos'è l'equilibrio termodinamico?***

L'equilibrio termodinamico è la coesistenza per un dato sistema termodinamico di tre tipi di equilibrio: termico, ovvero differenza nulla, o in prima approssimazione, infinitesima tra la temperatura del sistema e quella delle sorgenti con cui esso scambia calore; dinamico, ovvero risultante nullo o, in prima approssimazione, infinitesimo delle forze agenti dall'esterno sul sistema; chimico, ovvero massa, composizione e concentrazione del sistema costanti. Una trasformazione che procede attraverso una successione di stati di equilibrio termodinamico si dice reversibile, mentre una trasformazione che procede attraverso stati che differiscono di infinitamente poco da stati di equilibrio termodinamico viene indicata come quasistatica. In pratica, tutte le trasformazioni considerate idealmente reversibili, sono quasistatiche. Un sistema termodinamico lontano dalle condizioni di equilibrio tende spontaneamente a raggiungere tali condizioni mediante processi irreversibili: l'entropia di un sistema isolato è massima, mentre l'energia libera e l'entalpia sono minime.

### ***Cos'è l'equilibrio chimico?***

È un concetto applicabile alle reazioni chimiche reversibili e per il quale è costante nel tempo la concentrazione dei prodotti e dei reagenti che partecipano alla reazione. Il valore di queste concentrazioni quando è raggiunto l'equilibrio chimico è tale da definire una grandezza termodinamica caratteristica per una data reazione chimica a temperatura costante, chiamata costante di equilibrio. Il concetto di equilibrio chimico si può considerare da due punti di vista: cinetico e termodinamico. Secondo il primo, quando una reazione chimica reversibile è all'equilibrio, la velocità con cui i reagenti si trasformano nei prodotti è uguale a quella con cui i prodotti si ritrasformano in reagenti; secondo tale punto di vista l'equilibrio chimico non è statico, ma dinamico. Secondo l'impostazione termodinamica la variazione di energia libera di una reazione reversibile condotta com-

pletamente dai reagenti A e B ai prodotti C e D o viceversa è nulla o viceversa è nulla all'equilibrio. In pratica, l'equilibrio chimico serve ai chimici per capire come spostare l'andamento di una reazione chimica: ad esempio, una reazione che comporta una diminuzione di pressione sarà agevolata da una diminuzione del numero di moli tra i reagenti, quella che comporta un aumento di temperatura tra i reagenti sarà favorita se si riesce ad estrarre il calore dai reagenti.

## Neutrini, particelle solitarie e sfuggevoli

*“È più facile spezzare un atomo che un pregiudizio.”*

A. EINSTEIN

### ***Cosa sono i neutrini?***

I neutrini sono una categoria di particelle elementari; in accordo con il Modello Standard le particelle elementari devono essere pensate come enti privi di una struttura interna, ma dotati di massa e carica elettrica. In particolare i neutrini, come si può facilmente dedurre dal nome, sono particelle neutre, prive cioè di carica elettrica. Recenti ricerche inoltre hanno evidenziato come i neutrini siano dotati di una piccola massa, nonostante inizialmente fossero ritenuti a massa nulla. Queste caratteristiche li rendono particolarmente sfuggevoli dal punto di vista sperimentale; in altre parole i neutrini interagiscono molto poco con le altre particelle, riuscendo ad attraversare grandi porzioni di materia. Secondo il Modello Standard esistono tre diversi tipi di neutrini; ognuno di essi può essere pensato come il partner di un'altra particella elementare: all'elettrone si associa il neutrino elettronico, al muone si associa il neutrino muonico e alla particella tau si associa il neutrino tau. Nel loro insieme queste particelle costituiscono la famiglia dei leptoni. I neutrini e la fisica dei neutrini saranno i protagonisti di questa serie di Pillole di Scienza, dalla loro introduzione formale, avvenuta nei primi anni '30, fino ai più recenti risultati sperimentali.

### ***Cosa si intende per decadimento beta?***

Il decadimento beta è un fenomeno nucleare che consiste nella conversione di un neutrone in un protone con emissione di un elettrone e di un antineutrino. Lo studio del decadimento beta ha coinvolto molti fisici sperimentali e teorici all'inizio del 1900, intenti non solo nello studio sperimentale del fenomeno, ma anche nella comprensione teorica dell'interazione alla base di questo processo fisico. Il fenomeno in effetti costituiva un bel grattacapo per i fisici dell'epoca: presentava alcune caratteristiche oscure. In particolare, sembrava che il decadimento beta violasse il principio di conservazione dell'energia; si osservava, infatti, una perdita di energia dopo il decadimento. I fisici sperimentali avevano accumulato una gran quantità di dati in merito all'energia dell'elettrone emesso durante il decadimento beta; si evidenziò così che l'elettrone poteva essere emesso con energie che andavano da zero fino ad un valore massimo. Ma questo particolare spettro energetico dell'elettrone era legato inevitabilmente a questa perdita di energia; Niels Bohr, uno dei padri della meccanica quantistica e premio Nobel nel 1922, ipotizzò che il principio di conservazione dell'energia non fosse più valido, anche se bisognava in tal modo rinunciare ad un pezzo molto importante della meccanica. Una rinuncia troppo grande per altri fisici, tra i quali Wolfgang Pauli.

### ***In cosa consiste l'ipotesi di Pauli?***

Wolfgang Pauli nasce nel 1900 a Vienna; dopo la laurea in fisica ottenuta nel 1921 sotto la guida di Arnold Sommerfeld, Pauli ha modo di collaborare, sia in Europa che negli Stati Uniti, con

diversi fisici di fama mondiale, contribuendo in modo significativo allo sviluppo della meccanica quantistica e meritando il Nobel nel 1930. Dopo la scoperta e lo studio sperimentale del decadimento beta, Pauli fu fra i fisici che difesero il principio di conservazione dell'energia, che il fenomeno in esame sembrava violare. Ritenne così che Bohr fosse sulla strada sbagliata; in una lettera datata 4 dicembre 1930 Pauli avanzò la sua famosa ipotesi, l'esistenza di una nuova particella. In questa lettera aperta, indirizzata ad alcuni fisici nucleari che pochi giorni dopo si sarebbero incontrati a Tübingen, Pauli, nel disperato tentativo di salvare il principio di conservazione dell'energia, scrisse che durante il decadimento beta veniva emessa una nuova particella neutra, senza carica elettrica. Questa particella venne battezzata da Pauli con il nome di neutrone; tuttavia, non avendo a disposizione un supporto sperimentale per la sua ipotesi, Pauli preferì rivolgersi in via preliminare ai fisici sperimentali piuttosto che pubblicare la sua strana idea.

### ***Chi inventò il nome neutrino?***

Nel 1930 Pauli introdusse l'ipotesi dell'esistenza di una particella neutra emessa insieme ad un elettrone durante il decadimento beta. Questa particella venne chiamata neutrone, ma poiché Pauli non pubblicò nulla in merito, il neutrone di Pauli non godeva di uno status ufficiale di fronte alla comunità dei fisici. Nell'ottobre del 1931, durante un congresso organizzato a Roma da Fermi, Pauli avanzò di nuovo la sua ipotesi parlando, nel corso di conversazioni private, di una particella "neutra, leggera e molto penetrante". Nel 1932 avvenne però un'importante scoperta sperimentale: James Chadwick dimostrò l'esistenza di una nuova particella nucleare di massa simile al ben noto protone, ma senza carica elettrica, quello che oggi conosciamo come neutrone. A quel punto la particella neutra e leggera ipotizzata da Pauli non poteva più chiamarsi neutrone; fu Fermi a coniare il termine neutrino, ovvero un piccola particella neutra. Nel 1933, durante il settimo Congresso Solvay, finalmente Pauli presentò la sua idea; è l'atto di nascita del neutrino, anche se solo da un punto di vista teorico. Nonostante la teoria di Fermi del decadimento beta si basasse sull'esistenza di questi neutrini, mancavano ancora le necessarie conferme sperimentali dell'ardita ipotesi di Pauli.

### ***Quando fu scoperto sperimentalmente il neutrino?***

Fin dai primi anni trenta i neutrini entrarono nel lessico dei fisici nucleari, eppure dopo più di venti anni mancava ancora una conferma sperimentale della loro esistenza. Il neutrino di Pauli-Fermi non era stato ancora osservato come particella libera di interagire con la materia; all'inizio degli anni '50 il neutrino veniva descritto come una sorta di fantasma. Fu proprio nel 1951 che Frederick Reines cominciò la sua caccia al neutrino. Reines, fisico statunitense, all'epoca lavorava presso i laboratori di Los Alamos dove sviluppò le prime ricerche per la rivelazione sperimentale di un neutrino. Inizialmente pensò di usare le esplosioni di bombe atomiche; successivamente decise di utilizzare alcuni reattori nucleari. Costruì così insieme al suo team di ricerca alcuni rivelatori in grado di catturare il segnale prodotto da un neutrino. Questa particella, prodotta dalle reazioni nucleari, viaggiava libera dal reattore fino all'apparato sperimentale di Reines dove, interagendo con un protone dell'acqua contenuta all'interno del rivelatore, produceva un tipico segnale luminoso che poteva essere registrato ed analizzato. Nel giugno del 1956 la caccia al neutrino si concluse; Reines e collaboratori inviarono un telegramma a Pauli: la sua ipotesi si era trasformata in realtà sperimentale, il neutrino non era più un fantasma, ma una particella a tutti gli effetti.

### ***Furono scoperti altri neutrini dopo il 1956?***

La conferma sperimentale dell'esistenza dei neutrini aveva di fatto dimostrato che il neutrino non era soltanto un "fantasma", ma una particella che poteva essere rivelata attraverso opportuni apparati sperimentali. Nei primi anni '60 furono avviate delle ricerche dedicate allo studio dei neutrini prodotti agli acceleratori di particelle. I primi risultati arrivarono fra il 1961 ed il 1962: in un articolo pubblicato sulla rivista *Physical Review Letters*, Leon Ledermann, Melvin Schwartz e Jack

Steinberger misero in evidenza l'esistenza di almeno due diversi tipi di neutrini. Esistevano infatti, secondo i loro studi, un neutrino associato all'elettrone ed un neutrino associato al muone, una particella simile all'elettrone, ma dotata di massa maggiore. Quello che osservarono è che un neutrino prodotto insieme ad un muone non è in grado di produrre un elettrone; è come se l'elettrone insieme al suo neutrino, così come il muone ed il suo neutrino, costituissero delle coppie indissolubili difficili da separare. La storia non finisce qui perché il 21 luglio 2000 il Fermilab annunciò la scoperta di un terzo neutrino, il neutrino tau, associato questa volta ad un'altra particella simile all'elettrone, ma con massa molto più grande, il leptone tau. Ecco quindi che la grande famiglia dei leptoni è al completo: tre leptoni carichi (elettrone, muone e tau) a cui si associano tre leptoni senza carica elettrica, i neutrini.

### ***Cosa si intende per oscillazione dei neutrini?***

Come visto nelle puntate precedenti, i neutrini osservati da un punto di vista sperimentale sono di tre tipi: il neutrino elettronico, il neutrino muonico e il neutrino tau. Come detto, questi neutrini si accoppiano rispettivamente all'elettrone, al muone e al leptone tau. Tuttavia, dopo la scoperta del secondo tipo di neutrino alcuni fisici, tra i quali Bruno Pontecorvo, ipotizzarono che queste particelle potessero in qualche modo trasformarsi l'una nell'altra, quello che i fisici chiamano oscillazione dei neutrini. Questo significa che, per esempio, un neutrino muonico può trasformarsi durante il suo viaggio in un neutrino elettronico. Dobbiamo pensare i neutrini che si osservano sperimentalmente come una miscela di tre stati con masse differenti; ogni neutrino corrisponde ad una determinata miscela, ma questa miscela può cambiare durante il viaggio dalla sorgente dei neutrini all'osservatore. In questo modo il neutrino può subire una metamorfosi cambiando identità. Il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini si lega alla massa di queste particelle: se i neutrini avessero masse identicamente nulle non si osserverebbero queste transizioni. Lo studio sperimentale delle oscillazioni neutriniche riveste quindi un ruolo fondamentale nella determinazione delle proprietà di queste particelle.

### ***Che esperimenti si utilizzano per studiare le oscillazioni dei neutrini?***

Lo studio delle oscillazioni neutriniche ha coinvolto numerosi esperimenti, differenti in termini di sorgente dei neutrini. Le sorgenti possono essere naturali oppure artificiali. Fra le fonti naturali troviamo i neutrini prodotti all'interno del Sole durante la fusione dell'idrogeno e i neutrini prodotti dai raggi cosmici quando entrano nell'atmosfera. Fra le sorgenti artificiali possiamo ricordare i reattori delle centrali nucleari e gli acceleratori di particelle. Per osservare i neutrini così prodotti si utilizzano grandi rivelatori costituiti principalmente da un recipiente contenente acqua alle cui pareti vengono posti dei sensori sensibili alla luce. I neutrini sono particelle neutre piuttosto asociali che interagiscono poco con la materia; nei rari casi in cui avviene una collisione con i nuclei atomici, i neutrini producono caratteristici segnali luminosi. Tenendo conto di questo, l'acqua costituisce un mezzo ideale: è una sostanza abbastanza densa da rendere massima la probabilità di collisione con i neutrini ed è trasparente per permettere la trasmissione dei segnali luminosi. I sensori alle pareti del recipiente registrano questi segnali interpretandoli come il passaggio di un neutrino; i fisici sono poi in grado di capire dal tipo di segnale se si tratta di un neutrino elettronico, di un neutrino muonico o di un neutrino tau.

### ***Quando fu osservata la prima volta l'oscillazione di un neutrino?***

La scoperta del neutrino avvenuta nel 1956 ha aperto le porte ad una nuova stagione sperimentale dedicata a queste sfuggivevoli e solitarie particelle. Già verso la fine degli anni '60 furono sviluppati alcuni esperimenti in grado di studiare i neutrini emessi dal Sole; questi neutrini sono prodotti dalla fusione nucleare che costituisce il motore interno della nostra stella. Gli esperimenti che si sono prolungati fino agli anni '90 hanno evidenziato un flusso di neutrini elettronici prove-

nienti dal Sole inferiore al valore teorico, una prima indicazione dell'oscillazione dei neutrini solari. Tuttavia, la prima osservazione è avvenuta nel 1998 in Giappone, grazie all'esperimento Super-Kamiokande. Questo esperimento era stato progettato per lo studio dei neutrini prodotti dai raggi cosmici quando entrano nella nostra atmosfera. I primi risultati furono annunciati nel giugno del 1998: in una sala gremita di 400 fisici, Takaaki Kajita dell'Università di Tokyo illustrò i dati sulle evidenze sperimentali dell'oscillazione dei neutrini. Ulteriori conferme giunsero negli anni successivi ad opera di esperimenti indipendenti; nel 2001 il Sudbury Neutrino Observatory pubblicò i primi risultati che confermarono la metamorfosi dei neutrini provenienti dal Sole. Recentemente anche l'Italia ha giocato un ruolo importante, contribuendo allo studio sperimentale delle proprietà dei neutrini.

### ***Cos'è successo nei laboratori del Gran Sasso durante il 2010?***

Sotto il Gran Sasso si trova un importante laboratorio dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; uno degli esperimenti condotti in questo laboratorio si chiama OPERA e il suo obiettivo è quello di captare i neutrini per poterne studiare le proprietà. I neutrini che giungono ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso provengono dal CERN di Ginevra. Una volta prodotti viaggiano per 732 chilometri in linea retta ad una velocità molto vicina a quella della luce; attraversano le rocce sotto le Alpi e gli Appennini e piombano indisturbati sul rivelatore di OPERA in meno di tre millesimi di secondo. Qui interagiscono con la struttura del rivelatore producendo un segnale che viene studiato, analizzato ed interpretato dai fisici. La costruzione del rivelatore di OPERA è iniziata nel 2003, per concludersi nel 2008; da allora sono stati accumulati molti dati alla ricerca di un segnale prodotto da un neutrino; il CERN produce fasci di neutrini muonici molto intensi che durante il tragitto sotterraneo si trasformano in neutrini del tau. Finalmente nel maggio del 2010 è arrivato l'annuncio della prima osservazione di questa particolare oscillazione: dallo studio dei dati accumulati durante il 2008 ed il 2009 è stato possibile ricavare l'indicazione per un primo candidato di neutrino del tau, così come si legge nell'articolo recentemente pubblicato sulla prestigiosa rivista *Physics Letters B*.

### ***Ci sono progetti futuri per lo studio delle proprietà dei neutrini?***

Gli esperimenti condotti fino ad oggi hanno permesso ai ricercatori di capire molte cose sui neutrini: se inizialmente i neutrini erano ritenuti privi di massa, oggi sappiamo che sono dotati di masse molto piccole. Sappiamo inoltre che possono mescolarsi fra di loro e gli esperimenti sulle oscillazioni hanno permesso di ricavare le prime informazioni sulle diverse miscele che costituiscono i tre neutrini noti. Tuttavia, nonostante questi grandi progressi in campo sperimentale, restano irrisolte alcune questioni sul numero di neutrini (sono tre o più di tre?) e sulla natura della loro massa. Sono numerose così le collaborazioni internazionali avviate per lo studio delle proprietà dei neutrini. Nel 2011 dovrebbero essere completati due osservatori piuttosto particolari: a Marsiglia dovrebbe essere ultimato il progetto KM3net, un sorta di telescopio da un chilometro cubo di volume costituito da dodici file di rivelatori ancorati al fondo del mare, mentre in Antartide dovrebbe cominciare la sua avventura IceCube, un altro strano telescopio dal volume sempre pari ad un chilometro cubo dove i sensori sensibili alla luce sono sepolti nel ghiaccio fino ad una profondità di 1000 m (Nota: un prototipo del progetto KM3net di nome NEMO si trova al largo di Catania; si tratta di una torre alta 600 m posta ad una profondità di circa 2000 m).

### ***Cosa si intende per astronomia dei neutrini?***

Quando Pauli introdusse la sua ipotesi su questa strana particella così solitaria e sfuggitiva si preoccupò di aver introdotto nel mondo della fisica un nuovo ente impossibile da scoprire sperimentalmente. La svolta avvenuta nel 1956 con la scoperta che valse il premio Nobel 1995 a Reines aprì le porte all'osservazione dei neutrini. Oggigiorno queste particelle sono diventate una nuova

fonte di informazioni per lo studio di molti fenomeni, legati in particolare all'astronomia; si parla così di astronomia dei neutrini. Lo studio dei neutrini potrebbe permettere di osservare la parte più interna del nostro Sole, quel nocciolo in cui avviene la fusione nucleare; potrebbe permettere una visione differente delle spettacolari esplosioni di Supernovae o delle esplosioni di raggi gamma o ancora fornirci nuove dati sui buchi neri. Ma lo studio dei neutrini potrebbe darci informazioni anche sul nostro pianeta, fornendoci ulteriori informazioni sulla distribuzione degli isotopi radioattivi. I neutrini, in definitiva, potrebbero fornire una visione differente di diversi eventi, potrebbero dotarci di occhiali particolari per lo studio del mondo che ci circonda; naturalmente ci vorranno degli anni per abituarci a questo nuovo modo di vedere le cose.

## La petrografia

*“Ho veduto le onde dove un tempo era terra solidissima; ho veduto terre nate dalle acque. Conchiglie marine giacciono lontano dal mare...”*

OVIDIO

### ***Cos'è la petrografia?***

La petrografia è quella branca della geologia che descrive nel dettaglio le rocce, i loro minerali e le loro tessiture. L'analisi petrografica parte dall'osservazione dell'affioramento e delle macrostrutture, fino ad arrivare all'utilizzo del microscopio. Il microscopio è infatti lo strumento più importante nell'analisi petrografica, perché attraverso lo studio delle sezioni sottili (cioè di lastre finissime di roccia) consente di analizzare otticamente i minerali, di vedere le microstrutture della roccia e di capirne la sua origine. La petrografia acquistò il carattere di scienza autonoma nella prima metà del XIX secolo, quando lo studio delle rocce si giovò di metodi fisici e chimici. Risalgono infatti al 1820 circa le prime osservazioni al microscopio delle rocce in strati sottili. Nei prossimi appuntamenti vedremo di spiegare le diverse origini delle rocce del nostro pianeta, (che sommariamente si differenziano in magmatiche, sedimentarie e metamorfiche) e di elencarne le principali tipologie con un occhio speciale per quelle che si possono ritrovare nella nostra provincia.

### ***Le rocce magmatiche***

Le rocce magmatiche (dette anche eruttive o ignee) si formano in seguito alla solidificazione di magmi, cioè di masse silicatiche fuse prodotte dall'attività dei vulcani, contenenti vari componenti (FeO, MgO, CaO, ecc.) e sostanze volatili (acqua, anidride carbonica, idrogeno, metano, ecc.). Costituiscono quasi il 65% della crosta terrestre, ma sulla superficie della Terra questa abbondanza è nascosta dallo strato diffuso, sebbene molto sottile, di rocce sedimentarie e metamorfiche. Il loro raffreddamento, e la conseguente solidificazione, avviene nella parte esterna della crosta terrestre o in prossimità delle zone più alte del sottostante mantello. Temperatura, pressione e componenti volatili regolano il raffreddamento della massa magmatica. Possiamo suddividere le rocce magmatiche in 3 grandi gruppi: intrusive, effusive e ipoabissali. Una prima classificazione avviene verificando le caratteristiche cromatiche e di tessitura dei cristalli. La verifica della quantità di silice (determinabile con l'analisi chimica) permette in seguito di distinguere le rocce magmatiche in: rocce acide, con un contenuto di silice superiore o uguale al 63%; rocce intermedie, con un contenuto di silice tra 52% e 63%; rocce basiche, con un contenuto di silice tra 45% e 52%; rocce ultrabasiche, con un contenuto di silice inferiore al 45%.



### ***Le rocce intrusive***

Le rocce intrusive, o plutoniti, sono quelle rocce magmatiche in cui il magma si è intruso a profondità comprese tra 1,5 e 50 chilometri e la cristallizzazione è avvenuta per raffreddamento e solidificazione molto lenti; si possono formare, quindi, cristalli di notevoli dimensioni che danno alla roccia una struttura granulare. Classico rappresentante di questa categoria è il granito, roccia intrusiva acida, a grana medio o medio-fine, che contiene quarzo traslucido e incolore, feldspati potassici (ortoclasio), scarso plagioclasio e biotite (mica nera); può contenere muscovite, apatiti, zircone, pirite; il colore va dal bianco al rosso, passando per il rosa. Le masse fuse di tipo granitico consolidando danno origine a rocce dure che si estendono anche per centinaia di chilometri, dette batoliti. Le corrispondenti rocce effusive, ossia rocce che derivano dallo stesso magma che consolida però in superficie, sono dette rioliti o lipariti, anche se sono conosciute meglio come porfidi.

### ***Che roccia è la sienite?***

La sienite è una roccia magmatica intrusiva intermedia, di composizione analoga ai graniti, ma priva o con quantità di quarzo inferiori al 5%. Il nome deriva da Siene, l'antica Assuan, in Egitto, dove esistono grandi, cave sfruttate fin dall'antichità, di una roccia che in realtà era granitica, più che sienitica. La struttura delle sieniti è granulare, talora porfiroide per la presenza di grossi cristalli di feldspato; il colore varia da bruno, al violaceo, al grigio. Le sieniti sono caratterizzate dalla prevalenza di un feldspato prevalentemente alcalino che di solito è l'ortoclasio; può essere presente anche il plagioclasio in piccole quantità. Ai feldspati possono unirsi minerali femici colorati, di solito l'orneblenda, le miche, più raramente i pirosseni; in tal caso sono dette rispettivamente sieniti anfiboliche, minette e sieniti pirosseniche. Più rare le unioni con le biotiti, poiché nei magmi la maggior parte dell'alluminio viene utilizzato nella produzione dei feldspati. Gli elementi accessori possono essere gli ossidi di ferro, di zircone, l'apatite e la titanite. La monzonite, dal nome dei monti Monzoni nel Trentino, è una roccia magmatica intrusiva della famiglia delle sieniti, priva di quarzo e composta essenzialmente da ortoclasio e plagioclasio del tipo labradorite e da minerali femici quali augite, orneblenda e biotite.

### ***Le rocce effusive***

Le rocce magmatiche si dicono effusive (o vulcaniche) se la cristallizzazione del magma è avvenuta anche in superficie per cui il raffreddamento è avvenuto rapidamente e a volte senza che vi sia il tempo perché si formino i cristalli, infatti nella maggior parte dei casi presentano una struttura amorfa (non cristallina). Il basalto è un tipico rappresentante di questa categoria; presenta colore scuro o nero, con un contenuto di silice relativamente basso (minore del 50% solitamente). Il corrispondente intrusivo del basalto è il gabbro. Il basalto può presentarsi con aspetto che va da porfirico a microcristallino a vetroso. Esso proviene da un magma solidificatosi velocemente a contatto dell'aria o dell'acqua ed è la principale roccia costituente la parte superiore della crosta oceanica. I basalti sono normalmente ricchi in MgO, SiO<sub>2</sub> e in CaO, mentre sono poveri in Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O rispetto alle altre rocce magmatiche. Quando un basalto è eruttato in condizioni subacquee (ad esempio nelle dorsali oceaniche) l'acqua raffredda rapidamente la superficie della lava e causa la formazione delle tipiche strutture a "pillow" (cuscino). I pillow tipicamente hanno un interno a grana molto fine e una crosta vetrificata, presentano inoltre una fratturazione radiale. Le loro dimensioni variano da circa 10 cm fino a qualche metro. Si possono vedere queste caratteristiche formazioni sulla strada che porta da Caprile a Colle S. Lucia.

### ***Il porfido o ignimbrite***

Il porfido è una roccia vulcanica effusiva. Il porfido, petrograficamente, è formato da una pasta vetrosa o microcristallina di fondo, che ne costituisce più del 65% nella quale sono immersi piccoli cristalli (pezzatura 2/4 mm) in percentuale variabile tra il 30/35%. I cristalli più abbondanti

sono quelli di quarzo; notevolmente inferiore è la presenza dei feldspati, esigua è quella delle miche. Il suo colore comunque varia dal grigio chiaro ad un marrone medio. Questo tipo di pietra viene spesso utilizzata per applicazioni all'esterno poiché è molto resistente sia al forte freddo sia a temperature decisamente elevate. Lo possiamo trovare perciò in particolare in vari tipi di pavimentazioni come anche utilizzato per rivestimenti o pareti; un altro utilizzo può essere per rivestimenti d'interni, ad esempio per cucine o tavoli da lavoro. Sicuramente già utilizzato dagli Etruschi (per la costruzione di altiforni) e dai Romani, il porfido grazie alle sue caratteristiche ebbe ampio utilizzo sia nell'arte sia in opere edili. Uno dei più celebri luoghi di estrazione e lavorazione del porfido è il Trentino, ed in particolare nei comuni dell'Altipiano di Pinè il cui paesaggio è stato fortemente compromesso dalle enormi cave a cielo aperto.

### ***Le rocce sedimentarie***

Le rocce sedimentarie sono il risultato finale di un processo che inizia con l'alterazione e la disgregazione di rocce preesistenti (sia magmatiche, sia metamorfiche, sia sedimentarie già formatesi), prosegue con il trasporto dei materiali così prodotti e termina con la loro deposizione e compattazione, in genere sui fondali marini o nel profondo dei grandi laghi, dove resterà pressoché immobile per molti molti anni. Il termine sedimentarie dà già qualche indicazione, poiché deriva dal latino "sedimentum" che significa deposto e si riferisce alla decantazione (o precipitazione) di materiale solido all'interno di un fluido. Poiché l'alterazione delle rocce che affiorano e il trasporto e deposito dei prodotti alterati sono fenomeni sempre in atto, si trovano sedimenti quasi ovunque. Non appena il loro accumulo raggiunge un certo spessore, il materiale che si trova nella parte inferiore viene compattato dal peso dei sedimenti "fratelli" sovrastanti. Questi sedimenti possono anche venire cementati da sostanze minerali che precipitano chimicamente dalle acque che filtrano attraverso i minuscoli spazi esistenti tra i singoli granuli (chiamati clasti). Il processo finale che dà luogo alla roccia sedimentaria è chiamato diagenesi. Le rocce sedimentarie rappresentano meno del 10% in volume dei primi 16 km di crosta, tuttavia l'importanza di questo gruppo di rocce è notevole visto che costituiscono il 75% delle rocce che affiorano in superficie.

### ***La dolomia***

Questa roccia prende il suo nome dal naturalista e geologo francese Déodat de Dolomieu. La dolomia è una roccia sedimentaria carbonatica costituita principalmente dal minerale dolomite, chimicamente un carbonato doppio di calcio e magnesio. La dolomia si forma quando in un calcare la calcite è parzialmente sostituita da dolomite. Il metodo tradizionalmente usato per distinguere, in maniera speditiva sul terreno, il calcare dalla dolomia, è la prova dell'acido cloridrico (HCl): una goccia di acido (diluito in acqua al 5% di concentrazione) viene versata su un campione di roccia: se il campione reagisce immediatamente con una schiuma effervescente è calcare, mentre la dolomia rimane apparentemente inerte. I criteri per la classificazione delle dolomie possono essere sia composizionali, riguardanti il rapporto calcio/magnesio, che tessiturali e genetici. Infatti, la dolomitizzazione si verifica in condizioni ambientali particolari quali possono essere quelle ipersaline come ad esempio in ambienti tidali e lacustri, o in zone del sottosuolo dove si incontrano e mescolano acqua meteorica e acqua marina. Anche l'attività biologica, infine, può essere un fattore importante nel processo di dolomitizzazione, visto che la materia organica, in particolare alghe e batteri, ne favorisce lo sviluppo.

### ***L'arenaria***

L'arenaria o arenite è una roccia di origine sedimentaria composta di granuli delle dimensioni di una sabbia e si forma per cementazioni di sabbie in periodi e strati diversi. I granuli possono avere varia composizione, in funzione dell'area di provenienza, ma il più comune fra essi è il granulo di quarzo, SiO<sub>2</sub>. Tra loro sono legati da una matrice, o cemento se cristallizzato, che comunemen-

te è carbonato di calcio, silice o ossido di ferro. La quantità di matrice/cemento è molto importante in quanto permette di poter classificare le arenarie: mudstone - se la matrice è presente in percentuali maggiori del 75% ; wacke - se la matrice è presente in percentuali comprese fra il 75% e il 50% ; subwacke - se la matrice è presente in percentuali comprese fra il 50% e il 15% . La pietra arenaria si divide principalmente in due tipi, arenaria gialla e arenaria grigia e, a seconda delle località di estrazione, essendo stata utilizzata per tutte le opere edilizie prima dell'avvento del moderno cemento, caratterizza l'aspetto di tutti i siti urbanizzati nei pressi dei quali questo tipo di pietra veniva estratta.

### ***I conglomerati***

I conglomerati sono sedimenti clastici che derivano dallo smantellamento di formazioni più antiche da parte degli agenti dell'erosione o agenti esogeni (agenti meteorici, correnti, frane...), sia in ambiente subacqueo che in ambiente subaereo. I meccanismi di messa in posto di questi sedimenti sono soprattutto fluviali in ambiente continentale e gravitativi per quelli che si rinvengono in ambiente marino, alla base delle scarpate continentali. Il conglomerato è composto da granuli (o clasti) che possono raggiungere diametri superiori a 1 metro, ma che di solito sono ciottoli centimetrici. Oltre ai clasti, possono esserci granuli di dimensioni molto minori che riempiono gli interstizi tra i clasti stessi: è la matrice composta da sabbia o anche argilla. Infine, dalle soluzioni che circolano nel sedimento possono precipitare sali che vanno a costituire il cemento della roccia. La cementazione può essere parziale (quando parte degli interstizi tra i clasti rimane libera) o totale. Il cemento può essere a sua volta di varia natura: calcite, dolomite, silice, gesso, argilla, ossidi e idrossidi (come l'ematite), fosfati, a seconda dell'ambiente di sedimentazione e della composizione delle acque sotterranee.

### ***Le rocce metamorfiche***

Il processo metamorfico, detto appunto metamorfismo, comporta la trasformazione di rocce preesistenti. Una roccia metamorfica si può infatti formare dalla trasformazione di una preesistente roccia ignea, sedimentaria, o da una stessa roccia metamorfica. Il nome di questo genere di rocce risulta molto appropriato in quanto significa "cambiamento di forma" e questi cambiamenti sono innescati da alcuni fattori tra cui i più importanti sono la temperatura, la pressione e la presenza di fluidi. È noto infatti che, fino ad una certa profondità, vi è un aumento di temperatura variabile tra i 10°C e i 30°C per ogni chilometro a seconda delle diverse regioni e questo prende il nome di gradiente geotermico. In pratica più si scende in profondità e più aumenta la temperatura. Similmente alla temperatura cresce anche il valore della pressione. Il gradiente di pressione in genere si valuta intorno ai 250-300 bar ogni km di profondità. Questi cambiamenti ambientali coinvolgono sia la struttura mineralogica che la composizione chimica della roccia; in alcuni casi la roccia subisce solo modesti cambiamenti, in altri si può arrivare ad un cambiamento radicale dell'originaria struttura.

### ***La fillade***

La fillade è una roccia metamorfica con grana media, che solitamente si forma da sedimenti pelitici nel corso di metamorfismo regionale di pressione da bassa a moderata e di bassa temperatura. Tra i componenti essenziali, quarzo, miche (in forma di sericite) e cloriti sono quelli che le conferiscono la caratteristica lucentezza o la colorazione grigio-verde. Roccia foliata, può includere piccoli cristalli distinti (porfiroblasti) di granato negli strati ondulati. La foliazione è dovuta all'allineamento di miche e cloriti in seguito a pressioni medio-basse. La fillade spesso mostra pieghe di ampiezza ridotta. Si presenta in grana molto minuta, scistosità accentuata e ondulata. Sono visibili le lamelle micacee che danno alla roccia una particolare lucentezza. Deriva da rocce sedimentarie argillose o argillose-sabbiose. Grado metamorfico basso, quindi temperatura e pressione di ricristallizzazione medio-basse. Le filladi si possono vedere molto bene e comodamente lungo la strada

provinciale 51 poco prima di Agordo sul bivio per il paese di Rivamonte. Veniva utilizzata nei tempi passati in lastre per la ricopertura di tetti.

### ***Il marmo***

Nelle nostre zone si tende a chiamare impropriamente “marmi” alcune di pietre da costruzione che sono però sedimentarie e nulla hanno a che fare con il marmo originario. Il marmo, infatti, è una roccia metamorfica composta prevalentemente di carbonato di calcio. Il vocabolo marmo deriva dal greco antico μάρμαρον (mármaron), che significa "pietra splendente". Il marmo si forma attraverso un processo metamorfico da rocce sedimentarie, quali il calcare o la dolomia, che provoca una completa ricristallizzazione del carbonato di calcio di cui sono in prevalenza composte e danno luogo ad un mosaico di cristalli di calcite o di dolomite. L'azione combinata della temperatura e pressione, durante la trasformazione della roccia sedimentaria in marmo, porta alla progressiva oblitterazione delle strutture e tessiture originariamente presenti nella roccia, con la conseguente distruzione di qualsiasi fossile, stratificazione o altra struttura sedimentaria presenti nella roccia originaria. Il colore del marmo dipende dalla presenza di impurità minerali (argilla, limo, sabbia, ossidi di ferro, noduli di selce), esistenti in granuli o in strati all'interno della roccia sedimentaria originaria. I marmi bianchi sono esito della metamorfizzazione di rocce calcaree prive di impurità.

## **Gli acceleratori di particelle**

*“La bomba atomica... Se solo l'avessi saputo, avrei fatto l'orologiaio.”*

*A. EINSTEIN*

### ***Cosa sono gli acceleratori di particelle?***

Gli acceleratori di particelle sono macchine molto particolari il cui scopo è quello di far aumentare la velocità di particelle quali protoni, antiprotoni, elettroni e positroni. Man mano che la velocità di queste particelle aumenta, aumenta anche la loro energia; ogni acceleratore è costruito per raggiungere determinate energie, trovando così applicazione diverse. Esistono acceleratori di bassa, media ed alta energia; gli acceleratori di bassa energia vengono utilizzati soprattutto nel campo della diagnostica ospedaliera e in alcune particolari terapie mediche. Gli acceleratori di media energia trovano largo impiego sia nella ricerca (in particolare, studi sulla struttura della materia e nel campo della biologia e della medicina), sia nell'industria (per esempio, impianti di sterilizzazione). Gli acceleratori ad alta energia costituiscono la fetta più piccola in termini quantitativi, ma hanno rivestito e rivestono tuttora un ruolo fondamentale per la ricerca di base nella fisica delle particelle elementari. La storia delle particelle elementari si lega agli acceleratori e il loro sviluppo esponenziale ha reso possibile molte nuove scoperte; in fondo è la missione dell'LHC, l'ultimo acceleratore ad alte energie in ordine temporale da cui tutti i fisici del mondo si aspettano molto.

### ***Quando furono costruiti i primi acceleratori di particelle?***

I primi acceleratori furono costruiti nei primi anni '30; siamo nel 1931 quando fu costruito un primo acceleratore elettrostatico: sfruttava la differenza di potenziale elettrico fra due elettrodi per accelerare elettroni e ioni fino ad energie di 10-20 MeV. Era l'acceleratore di Van der Graaf; la differenza di potenziale veniva creata accumulando carica elettrica su una sfera metallica attraverso una cinghia ruotante composta da materiale isolante. L'anno seguente, il 1932, venne alla luce l'ac-

celeratore di Cockroft e Walton, che sfruttava un principio di funzionamento analogo a quello di Van der Graaf per produrre protoni ad alta energia. Grazie a questa macchina Cockroft e Walton furono in grado di realizzare le prime reazioni nucleari: bombardando nuclei di litio con protoni accelerati artificialmente riuscirono a realizzare la prima scissione nucleare, producendo due particelle alfa, ovvero nuclei di elio. Meritarono così il premio Nobel, assegnato nel 1951. Da allora gli acceleratori hanno giocato un ruolo essenziale nello studio della fisica configurandosi come complessi microscopi in grado di sondare la materia nei suoi costituenti di base. Oggi gli acceleratori sono macchine sofisticate e molto delicate, occupano grandi aree (almeno quelle dedicate allo studio delle particelle elementari) e raggiungono energie molto più elevate dei loro vecchi progenitori.

### ***Quali sono le principali componenti di un acceleratore?***

I moderni acceleratori di particelle sono costituiti da quattro componenti principali: il primo elemento è una sorgente di particelle, cioè un oggetto in grado di produrre un fascio di particelle, un gruppo di particelle da accelerare. Per esempio, all'LHC i protoni vengono prodotti a partire da idrogeno gassoso contenuto in una piccola bombola; un atomo di idrogeno è costituito da un protone attorno al quale orbita un solo elettrone. Attraverso un intenso campo elettrico è possibile strappare l'elettrone dall'atomo e produrre così protoni; il secondo elemento è una serie di tubi a vuoto all'interno dei quali le particelle prodotte vengono convogliate; il vuoto è necessario affinché le particelle non urtino con gli atomi dell'aria contenuta nei tubi così da evitare inutili perdite di energia e dannose diminuzioni di velocità; il terzo elemento è un dispositivo di guida e di focalizzazione delle particelle che, utilizzando solitamente campi magnetici, mantiene le particelle in prossimità di un'orbita o di una traiettoria ben determinata all'interno dei tubi a vuoto; infine, il quarto ed ultimo elemento essenziale alla costruzione della macchina è un sistema di accelerazione che permetta l'aumento della velocità delle particelle e, corrispondentemente, l'aumento della loro energia.

### ***Come si accelera un fascio di particelle?***

Particelle cariche, come elettroni e protoni, possono essere accelerate facilmente grazie ad un campo elettrostatico generato da due piastre metalliche collegate ad una batteria. La batteria permette di caricare i due pezzi di metallo: una piastra si carica positivamente, l'altra negativamente. In questo mondo, una particella con carica negativa, come l'elettrone, si allontanerà dalla piastra negativa sottoposta ad una forza repulsiva e si avvicinerà alla piastra positiva soggetta invece ad una forza attrattiva. Sospinta da queste forze la particella andrà incontro ad un aumento della propria velocità. Se questa spinta viene ripetuta più volte possiamo ottenere una notevole accelerazione; esistono diversi modi per incrementare la velocità giocando su spinte successive. Un primo esempio è quello di far viaggiare le particelle in linea retta facendole attraversare più campi elettrostatici acceleranti in sequenza: è quello che accade negli acceleratori lineari (o LINAC). L'inconveniente di questo tipo di acceleratori è che per raggiungere alte velocità, e quindi alte energie, bisogna disporre di un percorso rettilineo molto lungo. Per ovviare a questo problema è possibile far circolare le particelle in un anello; le particelle possono essere accelerate con spinte successive in determinati punti dell'anello: è quello che accade negli acceleratori circolari.

### ***Come s'incurva un fascio di particelle in un acceleratore circolare?***

Per curvare la traiettoria di una particella carica in moto si utilizzano adeguati campi magnetici. Un campo magnetico produce su particelle cariche in moto una forza nota come forza di Lorentz. Se l'elettrone o il protone entrano perpendicolarmente alla direzione del campo magnetico, l'effetto della forza di Lorentz è quello di una deviazione della traiettoria della particella su di un'orbita circolare. Questo effetto può essere localizzato lungo la direzione del moto delle particelle: distribuendo opportunamente i magneti che generano il campo magnetico attorno al tubo a vuoto, il fascio di particelle cariche può essere deviato fino a chiudere un anello anche di dimensioni notevoli.

li. Una tecnologia utilizzata, per esempio, in acceleratori di grandi dimensioni come l'LHC, il cui anello misura 27 chilometri circa, o il Tevatron, il cui anello misura 6 chilometri circa. Tuttavia, bisogna tener conto di un aspetto essenziale: per deviare particelle che viaggiano a velocità prossime a quella della luce, l'intensità del campo magnetico deve essere molto alta; per ottenere intensi campi magnetici si utilizzano magneti superconduttori, ovvero campi magnetici generati da correnti elettriche che percorrono, senza resistenza, cavi raffreddati a temperature di circa 271 gradi centigradi sottozero.

### ***Come possono essere classificati gli acceleratori?***

Gli acceleratori, come detto nelle puntate precedenti, accelerano fasci di particelle ad energie diverse. Negli acceleratori utilizzati in fisica per lo studio della materia e delle particelle elementari, il fascio accelerato ad alta energia si trasforma in una sonda per lo studio delle componenti più piccole della materia. Quello che bisogna fare dopo aver accelerato le particelle è farle urtare contro un bersaglio. L'energia che le particelle accumulano durante la fase di accelerazione può essere utilizzata per generare nuove particelle, secondo la famosa equivalenza fra massa ed energia sancita dalla Relatività Speciale di Einstein. Esistono due tipi di acceleratori: quelli a bersaglio fisso, dove le particelle urtano contro un oggetto fermo e i collider, dove due fasci di particelle accelerate vengono fatti scontrare frontalmente. Negli acceleratori a bersaglio fisso l'energia a disposizione per la creazione di nuove particelle cresce con la radice quadrata dell'energia del fascio di particelle; nei collider, invece, il processo d'urto è maggiormente vantaggioso perché l'energia che può essere trasformata in nuove particelle è uguale alla somma dell'energia dei due fasci che vengono fatti scontrare frontalmente.

### ***Cos'è la luce di sincrotrone?***

Come visto nelle puntate precedenti, gli acceleratori lineari hanno un limite notevole: per raggiungere energie più elevate servono acceleratori più lunghi. Per ovviare a questo problema si è pensato di costruire acceleratori dove i fasci di particelle venivano fatti girare in un anello in modo da subire successive accelerazioni ad ogni giro. Tuttavia, in questo tipo di acceleratori circolari esiste un altro tipo di problema: quando particelle cariche si muovono su traiettorie circolari parte della loro energia viene persa sotto forma di radiazione elettromagnetica, una sorta di luce nota con il nome di luce di sincrotrone. L'energia persa per ogni giro dell'anello è inversamente proporzionale alla massa delle particelle; questo significa che l'energia persa dagli elettroni è molto più grande dell'energia persa dai protoni. In tal senso, in una macchina che accelera elettroni dovranno essere presenti più settori acceleranti in grado di controbilanciare la perdita di energia sotto forma di luce di sincrotrone. Per rendere l'idea, al LEP, il vecchio acceleratore di elettroni e positroni del CERN, erano presenti poco più di un centinaio di settori acceleranti distribuiti lungo l'anello, mentre all'LHC, per accelerare protoni, ne basta uno solo.

### ***Cos'è la luminosità di un acceleratore?***

La luminosità è una proprietà molto importante di ogni acceleratore; essa rappresenta il numero di particelle che attraversano un'unità di superficie (tipicamente un centimetro quadrato) nell'unità di tempo (tipicamente un secondo). Se, per esempio, costruiamo un acceleratore con una luminosità pari a 100, significa che ogni secondo 100 particelle attraversano una superficie di 1 centimetro quadrato. Possiamo così pensare che la luminosità indichi l'efficienza di un acceleratore; se la luminosità assume valori più alti, più alta sarà la possibilità che si verifichino degli urti tra le particelle del fascio e quindi che si producano nuove particelle da studiare. Se, come nel caso del famigerato bosone di Higgs, si tratta di una particella molto sfuggitiva, difficile da produrre, allora la luminosità dell'acceleratore dovrà essere molto elevata. L'LHC del CERN di Ginevra è stato progettato per lavorare ad una luminosità nominale di  $10^{34}$  particelle per secondo e per centimetro

quadrato. Considerando la bassa probabilità di produrre un bosone di Higgs negli urti tra protoni, questo valore fa dell'LHC una macchina comunque adatta ad una produzione statisticamente significativa di questa particella. In questi giorni l'LHC ha raggiunto valori di luminosità pari a 1032 particelle per secondo e per centimetro quadrato, un valore inferiore al valore previsto in fase di progettazione, ma che costituisce comunque un record significativo nel suo continuo percorso di miglioramento.

### ***Come si può aumentare la luminosità di un acceleratore?***

Come detto nella puntata precedente, la luminosità di un acceleratore è un parametro essenziale per misurare la bontà della macchina e la sua capacità di produrre eventi in numero significativo per gli studi di fisica delle particelle. Aumentare la luminosità di un acceleratore è quindi un'operazione molto importante. Per aumentare la luminosità si lavora sul fascio di particelle; un fascio di particelle, come i protoni che circolano nell'LHC, deve essere pensato come un lungo treno, formato da diversi vagoni (detti bunch) all'interno dei quali si trovano diversi protoni. Da un lato si può lavorare sulla lunghezza del treno, aumentando il numero dei vagoni; dall'altro si può far aumentare la capienza di ogni singolo vagone. Si può anche fare in modo che i passeggeri di ogni vagone si stringano maggiormente gli uni agli altri, comprimendo i protoni con opportuni campi magnetici entro i limiti della repulsione elettrostatica. Vediamo di dare qualche cifra: l'LHC è stato progettato per lavorare con 2808 bunch, i vagoni del treno, ognuno dei quali frequentato da cento miliardi di protoni. In questo periodo la macchina sta lavorando con 248 pacchetti di protoni, un valore decisamente inferiore al valore nominale, ma che costituisce comunque un record e segna gli ottimi progressi dell'LHC ottenuti durante tutto il 2010.

### ***Qual è il più grande acceleratore lineare costruito fino ad oggi?***

Il più grande acceleratore lineare oggi in funzione è lo SLAC National Accelerator Laboratory, o per gli amici SLAC; si trova in California, ad una cinquantina di chilometri a sud di San Francisco. Questo acceleratore lineare è lungo circa 3 chilometri, accelera elettroni e positroni fino ad energie di 50 GeV e il tunnel principale si trova 10 metri sottoterra. La sua costruzione, avviata nel 1962, fu ultimata nel 1966 e da allora lo SLAC ha condotto ricerche fondamentali per la fisica delle particelle elementari, meritando, diciamo così, tre Nobel: tra la fine degli anni '60 e l'inizio degli anni '70 alcuni esperimenti evidenziarono l'esistenza dei quark all'interno dei protoni e dei neutroni e il premio Nobel fu assegnato nel 1990. Poi, nel 1974, fu scoperto il quark charm e il premio Nobel fu assegnato poco dopo, nel 1976. Infine, nel 1975, fu scoperto il leptone tau, particella simile all'elettrone, ma decisamente più pesante, con assegnazione del Nobel nel 1998. Oggi lo SLAC si configura come un laboratorio multidisciplinare, dove alla ricerca in fisica delle particelle si affianca la ricerca in astrofisica e in ottica utilizzando quella luce di sincrotrone di cui abbiamo parlato nelle puntate precedenti.

### ***Quando è stato costruito il primo anello di accumulazione?***

Molti acceleratori fra i più potenti e famosi al mondo, come il LEP al CERN di Ginevra o il Tevatron negli Stati Uniti, hanno un progenitore comune. Il primo anello di accumulazione, dove venivano fatte circolare contemporaneamente particelle ed antiparticelle alla stessa energia, fu AdA e possiamo dire che rappresenta un primato italiano. Siamo a Frascati, poco lontano da Roma; è il 7 marzo 1960 e un fisico austriaco di nome Bruno Touschek tiene un seminario presso i Laboratori Nazionali dove illustra le sue innovative idee. Touschek nasce a Vienna nel 1921; completa gli studi in Germania dove ha modo di collaborare con Rolf Wideroe, uno dei padri degli acceleratori di particelle. Dopo alcuni anni trascorsi a Glasgow, in Scozia, arriva a Roma nel 1952 e qui si stabilisce definitivamente. Touschek ebbe il merito di introdurre nel campo della fisica degli acceleratori l'idea di accelerare nello stesso anello sia particelle che antiparticelle, facendole prima girare in versi

opposti e poi facendole collidere frontalmente per poter così disporre di tutta la loro energia per creare nuove particelle. AdA fu un prototipo dalla vita piuttosto breve, ma giocò un ruolo fondamentale per i successivi sviluppi, dimostrando la possibilità di realizzare acceleratori di questo tipo.

### ***Quali sono state le più importanti scoperte fatte agli acceleratori?***

Nella fisica della particelle gli acceleratori raccontano una storia lunga 80 anni, fatta di grandi scoperte che hanno accompagnato lo sviluppo del Modello Standard. Voglio qui ricordare, seppur brevemente, alcune tappe di questa lunga storia. 1962, siamo nei laboratori nazionali di Brookhaven, nel New Jersey, Stati Uniti: viene scoperto un secondo tipo di neutrino, è il neutrino del muone; 1977, sempre negli Stati Uniti, viaggiamo fino alla porte di Chicago, per fermarci al Fermilab: qui viene scoperto il quinto quark, il quark b; 1979, ci spostiamo in Europa, siamo ad Amburgo all'acceleratore denominato DESY: vengono scoperti i gluoni, le particelle che trasportano le informazioni dell'interazione forte; 1983, scendiamo fino a Ginevra, dove al CERN vengono scoperti i bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , i mediatori dell'interazione debole; 1995, torniamo negli Stati Uniti, ancora al Fermilab di Chicago: viene scoperto l'ultimo quark previsto dal Modello Standard, il quark top. Ma non è certo la fine del viaggio: tra particelle, macchine acceleratrici e Modello Standard voliamo di nuovo nel vecchio continente; atterriamo a Ginevra e torniamo al CERN, dove si trova il più potente acceleratore mai costruito, l'LHC. Ci sediamo e, perché no, con un orecchio alla radio, aspettiamo l'annuncio di nuove scoperte.

## **La prevenzione dei terremoti**

*“Dopotutto, non è la natura che ha ammucciato là ventimila case di sei-sette piani.”*

*J. J. ROUSSEAU*

### ***Introduzione***

In queste puntate ci occuperemo dei terremoti perché siamo convinti che il corretto approccio ai terremoti, come per alcune malattie, sia la prevenzione e quindi affronteremo questo argomento. Le Pillole che somministreremo in questo ciclo sono tratte da un volume realizzato negli scorsi anni nell'ambito di un progetto di educazione dell'OGS, l'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, ente di ricerca con sede a Udine e Trieste. Se qualcuno volesse scrivere per il volume può rivolgersi al seguente indirizzo: “Pillole per Edurisk” OGS Borgo Grotta Gigante, 42/c, 34020 Sgonico TS. L'informazione in tempo reale sui terremoti che avvengono nell'Italia Nord orientale è consultabile via internet all'indirizzo [rts.crs.inogs.it](http://rts.crs.inogs.it).

### ***Cos'è un terremoto***

Un terremoto è un fenomeno naturale che avviene nella parte pellicolare del nostro pianeta, quella che chiamiamo crosta terrestre. Se immaginiamo la nostra Terra come un uovo a la coque, la parte più esterna, la crosta, è come il guscio, rigida; all'interno c'è un grosso strato dalle caratteristiche plastiche, come l'albume, che chiamiamo mantello e ancora più all'interno un nucleo che, come il tuorlo, può essere in parte fluido. Le rocce che costituiscono la crosta terrestre si rompono e si muovono perché c'è un lento movimento di trascinamento che avviene nello strato sottostante. Sono velocità molto basse quelle in gioco, nell'ordine di grandezza della crescita delle nostre unghie. Spostare questi pezzi di crosta terrestre è come tentare di piegare un grissino o un pezzetto di



legno fra le mani: prima si flette fino a quando raggiunge il punto di rottura; la rottura e quindi lo spostamento dei due pezzi di grissino, è quello che noi chiamiamo terremoto. Ma chiamiamo terremoto anche il rumore che sentiamo quando si spezza il grissino oppure la piccola vibrazione che avvertono le mani che tengono i due monconi. Queste sono le onde sismiche, che sono una perturbazione temporanea e che sono l'effetto percepito, talvolta anche a grossa distanza, dal punto in cui ha origine il terremoto.

### ***Dove avvengono generalmente i terremoti?***

I terremoti si concentrano in alcune fasce del nostro pianeta in cui osserviamo un'intensa deformazione. Sono le zone che vengono chiamate "margini di placca", proprio perché la crosta terrestre è suddivisa in una sorta di grossi zatteroni che sono in movimento relativo uno rispetto all'altro. La crosta subisce dei movimenti di trascinamento grazie a delle forze che originano in profondità nel mantello terrestre e nei punti in cui queste placche convergono, divergono o si muovono orizzontalmente una rispetto all'altra abbiamo fenomeni come vulcani, la formazione di catene montuose e di fosse oceaniche. È proprio in queste zone in cui avvengono principalmente i terremoti. L'Italia, ahì noi, è una zona in cui vanno a collidere due placche, la placca Euroasiatica e la placca Africana. La situazione è ulteriormente complicata perché la placca Africana che spinge verso Nord quella Euroasiatica ha una sorta di promontorio, chiamato anche microplacca Adria o Adriatica proprio perché la sua estensione corrisponde più o meno a quella del mare Adriatico. I margini di questa microplacca sono gli Appennini, le Alpi orientali, tutta la catena delle Dinaridi e dei Balcani e poi forse c'è una direttrice che unisce il Gargano alle isole di Corfù, che sono punti attivi dal punto di vista terremoti. Ugualmente molto attiva è anche tutta la zona dell'Arco Calabro, che quindi interessa l'Italia meridionale fino alla Sicilia. Montagne e vulcani denunciano la deformazione intensa di quest'area, pur essendo le velocità in gioco in questa zona molto inferiori rispetto a quelle che si riscontrano in altri punti della Terra, come ad esempio nella zona dell'Anatolia, in California o in Giappone.

### ***Cosa sono i maremoti?***

Se sott'acqua succede qualcosa di grosso, un terremoto che sposta il fondo del mare oppure una frana o un'eruzione vulcanica, abbiamo la formazione di una serie di onde marine che prendono il nome di maremoto. I giapponesi, che la sanno lunga, lo chiamano *tsunami*, che significa letteralmente "onda nel porto", proprio perché in alto mare nessuno si accorge di un maremoto: quella che si forma è un'onda lunga, anche centinaia di chilometri, ma alta solo pochi decimetri; purtroppo, quando quest'onda si avvicina alla costa, diminuendo la profondità dell'acqua diventa sempre meno veloce, ma sempre più alta, con valori talvolta enormi che raggiungono anche i 50 m. È un fenomeno che abbiamo visto recentemente all'opera nell'Oceano Indiano, quando si è verificato il terremoto di Sumatra il 26 dicembre del 2004, un terremoto che, per inciso, ha provocato oltre 250.000 vittime. Il maremoto è un fenomeno che avviene anche lungo alcune coste italiane: le coste calabre, la Sicilia orientale, talvolta la Liguria, in Puglia abbiamo testimonianze di eventi che si sono probabilmente originati in Grecia, oppure nelle isole Eolie a causa di fenomeni di frana. Per l'alto Adriatico è difficile ricostruire dalle fonti storiche a disposizione se ci sono stati eventi di questo genere, ovvero se l'onda eccezionale era legata a un maremoto o a un evento meteorologico. In ogni caso, nel Mediterraneo non abbiamo dei tempi adeguati per allertare la popolazione, come invece succede tra le coste del Giappone e le isole Hawaii o nelle altre coste dell'Oceano Pacifico; la salvaguardia individuale deve quindi essere legata al riconoscimento immediato del pericolo: sento un terremoto, vedo l'acqua che si ritira sulla spiaggia e corro all'interno in una posizione sicura.

### ***Qual è l'unità di misura di un terremoto?***

Esistono sostanzialmente due scale per misurare i terremoti: una è basata sugli effetti e l'altra

è invece basata su uno strumento, sulla fisica del fenomeno, sull'energia; entrambe sono nate alla fine del XIX secolo. Come per misurare la febbre ad un bambino noi possiamo ricorrere ad un termometro oppure limitarci agli effetti e vedere che ha gli occhi lucidi, le guance arrossate e la fronte bollente, allo stesso modo ragioniamo per i terremoti. La scala degli effetti è la scala macrosismica di intensità, che chiamiamo anche scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS, in Italia). Diverse nazioni usano diverse scale macrosismiche, ad esempio i giapponesi hanno una scala che è articolata su meno gradi rispetto alla nostra. La scala MCS classifica gli effetti dei terremoti in 12 gradi; noi ne ricordiamo tre, per semplicità: il III grado rappresenta la soglia di prima percezione umana del terremoto, ovvero la condizione in cui la maggior parte delle persone identificano un movimento come terremoto; il VI grado, invece, individua la soglia di primo danno, quando incominciano ad esserci degli effetti non particolarmente pesanti, ma diffusi, sulle costruzioni; il IX grado, invece, identifica la soglia di distruzione, ovvero un grado di danneggiamento tale che in una città, che non sia costruita con criteri antisismici, la percentuale di edifici collassati o inutilizzabili si aggira intorno al 50-70% del totale. L'altra scala, quella basata sulla misura dell'energia, si avvale di sismografi, strumenti sviluppati appunto alla fine del 1800; è una scala che viene generalmente identificata con il nome di Richter, perché Charles Richter fu la prima persona a proporre una codifica di questo tipo di misure. In pratica, si misura l'ampiezza di una certa fase registrata da un sismografo e questa ampiezza è legata all'energia che viene rilasciata alla sorgente. La misura del terremoto, in questo caso, viene indicata con dei numeri reali; fra un grado e il successivo, ad esempio fra il 5 e il 6, della scala Richter c'è un rapporto di energia di circa 30 volte. Per considerare, in maniera molto approssimativa, anche il terzo grado della scala Richter identifica un terremoto appena percepibile dall'uomo, ma quando passiamo al sesto grado ci troviamo di fronte a un evento disastroso, come quello dell'Aquila del 2009. I terremoti più violenti che siano mai stati registrati dagli strumenti hanno magnitudo 9,4-9,5; fra essi ricordiamo l'evento di Sumatra del 2004.

### ***Si possono prevedere i terremoti?***

No, i terremoti non si possono prevedere, cioè non è possibile conoscere in anticipo esattamente dove, come e quando avverrà un terremoto. Questo però non significa che non siamo in grado di dire qualcosa sui terremoti; noi riusciamo ad identificare delle zone che per caratteristiche geologiche e per precedente attività sismica sono più propense ad avere dei terremoti. È come per le malattie: non andiamo dal medico chiedendogli di prevedere che malattie potranno insorgere nei prossimi mesi o nei prossimi anni, ma se il medico ci trova fumatori e magari con delle analisi del sangue non proprio a posto ci informerà che siamo a rischio di un qualche tipo di patologia. Lo stesso tipo di atteggiamento dobbiamo averlo nei confronti dei terremoti, in cui l'approccio della previsione non è un approccio vincente; la scienza oggi è in grado di riconoscere alcuni sintomi che possono essere l'indizio di un imminente terremoto, li indichiamo come precursori, ma non è in grado di fornire una previsione con un livello di certezza tale da essere utile ai fini di protezione civile. È per questo che l'atteggiamento si deve spostare dall'idea di previsione alla pratica della prevenzione, come per le malattie.

### ***Qual è la sismicità dell'Italia?***

L'Italia ha una lunga storia sismica; abbiamo una documentazione che risale fino all'epoca romana e, purtroppo, anche un numero esorbitante di morti legati ai terremoti. Si faccia conto che, mediamente, negli ultimi mille anni a causa dei terremoti abbiamo avuto 300 morti l'anno che sono, per inciso, la quantità di morti legata all'ultimo terremoto dell'Aquila. In Italia i terremoti avvengono quasi dappertutto, relativamente più tranquille sono la Sardegna, il Trentino Alto Adige, la parte settentrionale della costa tirrenica, una parte del Gargano, la Sicilia centro-meridionale. Il nostro catalogo dei terremoti conta oltre 2500 eventi al di sopra della soglia del danno, intensità macrosismica VI grado, in circa 1000 anni, quindi mediamente abbiamo due terremoti dannosi al-

l'anno. Esistono aree che producono forti terremoti rari e altre, invece, che sperimentano terremoti medio-piccoli, ma più frequenti. Bisogna però ricordare che il numero di terremoti cresce esponenzialmente al diminuire dell'energia, per cui, ad esempio, dove c'è un terremoto di magnitudo pari a quello dell'Aquila, ce ne sono 10 di energia inferiore, simili al terremoto avvenuto a Salò nel 2004 e ce ne sono 1000 percepibili dalla popolazione. In Veneto, solamente osservando la sismicità registrata dal 1977 ad oggi, esiste circa il 15-20% di probabilità annuale di avere un terremoto di magnitudo superiore a 4, ma oltre l'80% nel caso in cui la magnitudo scenda al valore di 3, che è più o meno la soglia di percezione umana e siamo praticamente certi di avere terremoti strumentali.

### ***In che modo si possono rendere sicure le nostre costruzioni?***

Gli edifici sono fatti per sopportare, in condizioni normali, il proprio peso e il peso di chi vi abita e alcuni eventi come il vento e la neve; soprattutto si tratta di pesi legati a carichi statici e verticali. I terremoti non sono né statici, né prevalentemente verticali, perché le sollecitazioni che distruggono le case avvengono sul piano orizzontale; una casa sicura è quindi quella in grado di resistere a sollecitazioni di questo tipo. Ci sono diverse procedure che rendono una casa antisismica: il rispetto delle leggi, innanzitutto, ma anche degli accorgimenti semplici, che sono legati all'esperienza, portano a un miglioramento delle caratteristiche delle nostre abitazioni; una forma regolare e compatta, ad esempio, o un'altezza in numero di piani limitata sono garanzie di sicurezza. Sono necessari buoni materiali e una buona manutenzione. Se le strutture sono elastiche e poco pesanti, la casa resiste meglio ai terremoti; se ci sono dei buoni collegamenti tra le componenti orizzontali e quelle verticali della casa, le pareti e i solai nelle case in muratura, i pilastri e le travi negli edifici in cemento armato, la costruzione resisterà meglio alle sollecitazioni di un terremoto. Poi bisogna che le case siano libere di oscillare, perché le case oscillano sotto i terremoti come gli alberi nel caso del vento, senza urtarsi una con l'altra e quindi è necessaria un'adeguata distanza tra un edificio e quello adiacente. Ci sono, infine, alcune procedure per fissare correttamente degli elementi che non fanno parte della struttura della casa, degli elementi sporgenti come terrazze, parapetti, comignoli, cornicioni e tegole. La risposta del sito, infine, ovvero l'insieme di informazioni che otteniamo essenzialmente dal geologo, è importante per sapere se la nostra casa avrà maggiori o minori sollecitazioni in caso di terremoto.

### ***Cos'è il rischio sismico?***

Il rischio sismico è la stima dei danni che si possono verificare a causa dei terremoti. In italiano i termini di pericolosità e rischio sono spesso utilizzati come sinonimi, mentre l'inglese utilizza termini diversi, hazard e risk, per identificare due cose distinte. Riusciamo a capirlo perfettamente con l'esempio della montagna: la montagna è un posto definito pericoloso, ma il rischio non riguarda la montagna, riguarda l'alpinista, l'escursionista o la persona che va in montagna; analogamente, nel campo dei terremoti, la pericolosità è la potenzialità di avere dei terremoti, mentre il rischio indica l'insieme degli effetti, come danni economici e sociali, che si possono verificare nel caso in cui avvenga un terremoto. Il rischio è dato, quindi, dalla combinazione di tre elementi: la pericolosità, ossia la caratteristica naturale, la vulnerabilità, ovvero la propensione degli edifici ad essere danneggiati, il valore economico, associato alle cose presenti negli edifici. L'Italia è un Paese ad elevata pericolosità sismica, dove avvengono terremoti energetici con una certa frequenza, ma non elevatissima; Paesi come la Turchia, la California e il Giappone hanno una pericolosità estremamente superiore alla nostra, con terremoti molto più forti e molto più frequenti. Per contro, invece, l'Italia è un Paese ad elevatissimo rischio sismico perché terremoti anche non particolarmente energetici comportano effetti estremamente pesanti, a causa di fattori come il tipo di antropizzazione e le caratteristiche delle strutture abitative: i nostri centri storici sono bellissimi, ma vulnerabili.

### ***Cosa succede durante un terremoto?***

Possiamo distinguere due tipi di effetti durante un terremoto: degli effetti che sono temporanei e degli altri che sono permanenti; in ogni caso gli effetti sono sempre meno gravi a mano a mano che ci si allontana dall'epicentro che è la proiezione ideale in superficie del punto in cui, in profondità, ha avuto origine un terremoto. Fra gli effetti permanenti abbiamo, essenzialmente, il danneggiamento di edifici, di strutture, di patrimonio abitativo. Nella zona in cui gli effetti sono temporanei identifichiamo l'area del cosiddetto risentimento, dove il terremoto è stato percepito, ma non ha lasciato tracce indelebili. Nel danneggiamento assistiamo a crolli di edifici, perdita di funzioni di sistemi estesi come possono essere le strade, gli acquedotti, le tubature del gas, la rete elettrica; si assiste anche alla presenza di deformazioni del terreno oppure a fenomeni franosi. Esiste un fenomeno molto particolare, che si verifica solo in determinate situazioni geologiche, che si chiama liquefazione del terreno e, in pratica, è quello che succede quando un bambino gioca sulla battigia e salta sulla zona in cui si frange l'onda rendendo la sabbia completamente liquida; se questo succede sotto la nostra casa, ovviamente questa avrà dei danni molto più elevati. Negli effetti temporanei abbiamo la percezione delle onde sismiche, la vibrazione; talora, si può assistere a fenomeni come bagliori o tuoni che sono sempre delle manifestazioni legate alla propagazione delle onde sismiche. Poi cadono gli oggetti e, molto importante, c'è la paura, ossia la risposta umana da parte delle persone che vivono in quella zona. È strano pensarlo, ma l'uomo ha una sorta di sismografo naturale: siamo in grado di percepire il movimento dei terremoti e siamo anche in grado di percepire delle onde sismiche che arrivano in maniera anticipata rispetto alla vibrazione più forte. Se qualcuno di voi ha sentito un terremoto in maniera significativa, forse si ricorderà che il primo impulso avvertito è una specie di piccolo colpo che arriva da sotto i piedi; è l'arrivo delle onde P, le più veloci, che si propagano dalla posizione dell'epicentro fino al punto in cui c'è la persona. Solo dopo qualche secondo arrivano le vibrazioni più ampie, quelle che causano la caduta delle case, che sono legate alle onde superficiali o alle onde S; basta moltiplicare per 8 il numero di secondi che passano tra questo primo arrivo e l'arrivo delle oscillazioni ampie, per avere una stima approssimativa del numero di chilometri al quale è avvenuto il terremoto.

### ***Cosa dobbiamo fare in caso di terremoto?***

Comportarsi bene in caso di terremoto significa sapere prima cosa dobbiamo fare, perché un terremoto non è un'esperienza frequente che instaura quindi in noi una reazione automatica. Agire prima significa effettuare, ad esempio, una ricognizione nella casa, nell'ufficio, nella scuola per riconoscere ed individuare quali sono i punti sicuri e quali invece sono i punti da evitare, per individuare i percorsi più rapidi, per essere in condizioni di sicurezza. Ci sono poche decine di secondi in cui noi possiamo agire davvero durante l'occorrenza di un terremoto; in questi secondi dobbiamo agire per raggiungere un punto sicuro, come un muro portante, allontanarsi da oggetti che possono cadere, allontanarsi da scale, ascensori, evitare di uscire sui terrazzi, stare lontano da vetri e librerie che possono caderci addosso. In caso di terremoto è sempre importante cercare di proteggersi anche dalla caduta di oggetti piccoli che comunque potrebbero ferirci. Un'altra cosa importante da praticare prima del terremoto è l'esercizio a controllare le reazioni; le reazioni inconsulte durante un evento sismico sono causa di danno a se stessi e talvolta anche agli altri. Un'altra buona pratica è predisporre vicino alla porta dei kit di emergenza che abbiano dentro una coperta, qualche pronto soccorso, una torcia, magari dell'acqua: sono estremamente utili nel caso in cui il terremoto sia davvero forte. Dopo la scossa ci sono degli altri comportamenti che è il caso di tenere, sempre privilegiando la salvaguardia dell'incolumità: bisogna cercare di spegnere sistemi elettrici e di gas che possono causare incendio, bisogna cercare di tenersi informati, ma tramite la radio, non utilizzando i cellulari che invece magari saranno indispensabili per l'emergenza e bisogna cercare di prestare aiuto ad eventuali feriti che possiamo avere intorno.

### ***Nella nostra regione, qual è la situazione terremoti?***

Il Veneto è una regione sismica, anche se talvolta tendiamo a sottovalutarne l'importanza. Nel 2011 celebriamo i 500 anni del terremoto chiamato di Idria, del 1511 appunto, che è forse il terremoto in cui abbiamo registrato i danni maggiori a Venezia. La documentazione storica dice che ci sono stati molti eventi disastrosi all'interno del Veneto, a partire da un evento nell'VIII secolo, che viene riferito a Treviso perché questo era il centro urbanizzato più importante dell'epoca, ma è un evento che in realtà non sappiamo esattamente dove si sia verificato. Poi c'è un altro evento importante, avvenuto nella zona del Veronese nel 1117 e dei grossi terremoti, ossia confrontabili in termini di energia a quello avvenuto nel 1976 in Friuli, ad esempio nel 1695 nella zona di Asolo oppure nel 1873, che è una data importante per il Bellunese: a Belluno ci fu un terremoto che distrusse ampiamente la città e fu il primo esercizio di soccorso da parte dell'Italia da pochi anni unita. Ci sono poi degli eventi più vicini a noi nel tempo, come il terremoto del 1936 che ha interessato l'area del Cansiglio e la pedemontana tra Veneto e Friuli. Oltre a questi eventi, che comunque hanno causato dei morti, ci sono poi degli eventi più piccoli, che vengono fortemente risentiti in Veneto anche se provengono da regioni confinanti: chi non è più giovanissimi si ricorderà gli effetti del terremoto del 1976 in tutto il territorio del Veneto.

### ***Cosa si fa nella nostra regione per ridurre il rischio sismico?***

Come nel resto d'Italia, anche in Veneto si applica o, almeno, si dovrebbe applicare la normativa sismica che prevede 3 zone (seconda, terza e quarta) che riguardano i comuni del Veneto. Quando, nel 2003, c'è stata l'ultima modifica normativa su questo argomento, molti comuni a debole pericolosità, in cui le case non dovevano adottare per legge dei dispositivi di sicurezza, sono stati classificati sismici e quindi è aumentato drasticamente il numero di comuni veneti che hanno dei significativi deficit di protezione sismica. Oltre ad applicare la normativa c'è un servizio di monitoraggio e un sistema di allarme-allerta in caso di terremoti; per il Veneto questo servizio viene offerto dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica (OGS), che permette di avere un contatto diretto tra il mondo della ricerca e la Protezione Civile. Oltre a questo, il monitoraggio dei terremoti ci permette anche di aumentare le conoscenze che abbiamo sul fenomeno e quindi gestire in modo ottimale l'informazione in caso di coinvolgimento della popolazione. C'è infine una cosa non demandabile alle leggi e che bisognerebbe fare in Veneto come nel resto d'Italia ed è aumentare la cultura e la consapevolezza nei confronti del terremoto, la sensibilità complessiva e la responsabilità individuale che noi abbiamo nei confronti della salvaguardia nostra e degli altri.

## **Dolomia e dolomitizzazione**

*“Un geologo è essenzialmente un litoclasta, o spaccatore di pietre, e a malapena resiste alla tentazione di rompere i monumenti per meglio determinare la natura delle sostanze di cui sono fatti.”*

*D. DE DOLOMIEU*

### ***Presentazione***

La dolomite è il più comune carbonato delle rocce sedimentarie. È abbondante fin dalle rocce carbonatiche precambriane, ma è raro rinvenirne la formazione nei moderni ambienti carbonatici. Perché questo avvenga e per quale motivo ci sia un'apparente incapacità di sintetizzarla in labora-

torio in condizioni di temperatura ambiente, rimane un enigma sedimentologico di lunga data, spesso chiamato “il Problema Dolomite”. Numerose sono le pubblicazioni comparse negli ultimi 100 anni che hanno riesaminato la questione, partendo dalla classica pubblicazione di Van Tuyl del 1916, e molte sono le recenti pubblicazioni che documentano e discutono in dettaglio le varie ipotesi formative della dolomite. Esse si basano su osservazioni sul campo e su varie teorie, formulando modelli che includono diverse condizioni che possono sconfiggere le barriere termodinamiche e cinetiche della precipitazione dolomitica. In questi nostri prossimi appuntamenti, seguiremo le tracce dello sviluppo dei concetti fondamentali collegati all’origine della dolomite ed a questo persistente enigma sedimentologico.

### ***La dolomite e la dolomia***

La dolomite è un minerale, un carbonato doppio di calcio e magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Importante nel processo di formazione di tale minerale è lo scambio e sostituzione ordinata tra calcio e magnesio nella struttura del carbonato stesso. Praticamente avvengono delle interazioni sostitutive rese possibili dai legami prevalentemente ionici di Ca e Mg con gli ossigeni costituenti. Tali legami sono però differenziati dal diverso raggio ionico del Ca (0,99Å) e del Mg (0,66Å) dai quali si evidenzia anche la diversa struttura dei cristalli di carbonato di solo calcio,  $\text{CaCO}_3$ , detto calcite e quello di solo magnesio,  $\text{MgCO}_3$ , detto magnesite. Interessante è notare che magnesite e dolomite sono poco miscibili allo stato solido e quindi è ancor più interessante il fatto che si abbia miscela stabile di due minerali in uno nuovo. La dolomia è una roccia sedimentaria carbonatica costituita principalmente dal minerale dolomite. Quando in un calcare la calcite è parzialmente sostituita da dolomite, esso viene chiamato calcare magnesiaco, calcare dolomitico o dolomia calcarea in funzione della specie mineralogica dominante in percentuale. Il metodo tradizionalmente usato per distinguere, in maniera speditiva sul terreno, il calcare dalla dolomia è la prova dell’acido cloridrico (HCl); una goccia di acido (diluito in acqua al 5% di concentrazione) viene versata su un campione di roccia: il calcare reagisce immediatamente con una schiuma effervescente, mentre la dolomia rimane apparentemente inerte.

### ***I primi studi***

Come riportato dal tedesco von Morlot nel 1847, Giovanni Arduino nel 1779 fu il primo a tentare una spiegazione sull’origine della dolomia attraverso un’alterazione del calcare dovuta ad una reazione con soluzioni idrotermali ricche in magnesio. Il primo studioso che cercò di andare a fondo nella comprensione della formazione della roccia dolomitica fu, nel 1822, Leopold von Buch, il quale esaminò, sul campo, la presenza della dolomite in numerose località della Germania, Austria ed Italia. Dalle sue osservazioni concluse che la dolomia non conteneva mai fossili, che aveva una struttura più porosa del calcare e nelle zone del “Tirolo del sud” le masse dolomitiche erano sempre accompagnate da un porfido nero augitico. Questa roccia plutonica era la causa della conversione del preesistente calcare in dolomia. Quindi, per von Buch, la dolomia si trovava sempre in associazione con porfido augitico, causa principale della sua formazione; e laddove il porfido non era visibile, significava semplicemente che era stato eroso, oppure che la dolomia era ancora in fase di conversione e la massa porfirica si trovava nel sottosuolo. Anche altri geologi seguirono la scuola di pensiero iniziata da von Buch e spiegarono la formazione della dolomia in termini di conversione di calcare preesistente. Molti altri, però, restavano convinti di una genesi primaria della dolomia.

### ***La “Precipitazione primaria”***

All’indomani dei suoi studi sull’Alpe di Siusi, il francese Bertrand-Geslin (1834) suggerì che già dal momento stesso della deposizione queste rocce carbonatiche contenessero il carbonato di magnesio, ed escluse la possibilità di qualsiasi introduzione successiva di magnesio attraverso soluzioni filtranti. Le sue affermazioni vennero rafforzate da altri studiosi francesi che sostenevano

un'origine per così dire "epigenetica" della dolomite. Soltanto la precipitazione diretta, commentavano, potrebbe spiegare l'accrescimento lineare e le laminazioni fini tipiche di molte dolomiti. Uno di essi, Delanoüe, aggiunse alla discussione quella che era la sua personale esperienza, avendo studiato molte dolomie delle Alpi Liguri e del Golfo di La Spezia, ma senza aver trovato alcuna prova a sostegno della "*dolomitisation postérieure du calcaire*". Strati sottili di dolomia intercalati a strati di calcare ricco in fossili e ben stratificato, escludevano a suo dire una conversione secondaria. L'acqua del mare, spiegò Delanoüe nel 1854, era in grado di demolire nel corso di alcuni secoli quasi tutta la scogliera calcarea, ma non poteva, apparentemente, cambiare una scogliera calcarea in dolomitica. Inoltre, aggiungeva, la dolomia può essere trovata in strati normali indisturbati, contenenti fossili e materia organica, senza alcuna traccia di cambiamento secondario.

### ***“Precipitazione secondaria”: le sei teorie del 1800***

In una revisione sul tema della dolomitizzazione, lo studioso Scheerer precisò che nel 1866 erano conosciute sei teorie differenti sulla genesi secondaria della dolomite. La prima e più vecchia era quella “dei vapori di magnesio” che reagivano con il calcare, avanzata da Von Buch, ma il concetto era stato descritto precedentemente dall'Arduino. La critica a questa teoria era l'assenza di qualsiasi rapporto tra la  $MgCO_3$  contenuta nel calcare ed il porfido presente nelle vicinanze. La seconda teoria, esposta soprattutto dall'austriaco W. von Heidinger, implicava una reazione fra calcare e una soluzione di solfato di magnesio. La terza ipotesi era paragonabile alla precedente, in quanto supponeva una reazione fra calcare preesistente e una soluzione di cloruro di magnesio. La quarta teoria della "dolomitizzazione" era quella di Frapolli (1847), che pensava che la formazione della dolomia doveva essere attribuita alle azioni del vapore di cloruro di magnesio. La quinta, suggeriva una reazione tra l'acqua contenente biossido di carbonio ed il calcare contenente  $MgCO_3$ : gran parte del carbonato di calcio del calcare sarebbe dissolto ed il carbonato di magnesio presente reagirebbe per dare dolomia. La sesta teoria era quella in cui il calcare verrebbe parzialmente sciolto con una soluzione di bicarbonato di magnesio in modo da trasformarsi in dolomia. La maggior parte di queste differenti teorie di dolomitizzazione ricevono poca o nessuna attenzione nella letteratura moderna, con l'eccezione di una: la teoria di Heidinger.

### ***Ferdinand von Richthofen***

Nel XIX secolo, il barone Ferdinand von Richthofen produsse la prima analisi stratigrafica sistematica delle montagne del sud Tirolo. Basandosi sulla teoria delle barriere coralline ideata da Charles Darwin e pubblicata nel 1842, von Richthofen condusse alla formulazione dell'ipotesi dell'accrescimento corallino per spiegare la peculiarità topografica della regione. Basandosi su di una precisa mappa geologica ed una investigazione stratigrafica dettagliata della regione, nel 1860 von Richthofen usò la Dolomia dello Sciliar per illustrare la sua ipotesi. Scrisse che lo Sciliar è una barriera corallina e l'intera formazione della Dolomia dello Sciliar era in larga maniera originata attraverso l'attività animale. La sezione geologica inclusa nella carta redatta al tempo, mostra la grande differenza in elevazione tra la massa dello Sciliar ed il paesaggio circostante. I rilievi montuosi della zona, con i suoi scoscesi pendii isolati dalle altre cime, il notevole spessore di dolomia e la presenza occasionale di resti di coralli convinsero lo studioso tedesco della somiglianza con le isole coralline di Darwin (simili a molti atolli che oggi troviamo alle Bahamas o in Australia) facendo concludere che queste masse fossero di origine corallina e si fossero accresciute durante il lungo periodo di continua subsidenza della regione.

### ***Edmund Mojsisovics von Mojsvár***

Edmund Mojsisovics von Mojsvár mantenne e sviluppò ulteriormente l'ipotesi delle barriere coralline di Von Richthofen attraverso i suoi numerosi studi sulle montagne dolomitiche. Le fotografie ed i profili allegati con i quali Mojsisovics illustrò le barriere triassiche del sud Tirolo, insie-

me con una dettagliata analisi sedimentologica e dei caratteri stratigrafici delle sezioni affioranti, consolidarono il concetto che le strutture organogene si erano formate originariamente in isolate piattaforme carbonatiche in condizione di mare aperto, ma con una variante rispetto a von Richthofen: egli continuava, comunque, ad opporsi all'ipotesi delle barriere coralline, tenendo conto delle evidenze di una generale assenza di coralli nella dolomite, con presenza invece costante di alghe calcaree ed echinodermi. Fu il primo che ebbe il dubbio, inoltre, che le piattaforme carbonatiche potessero attualmente formare un rialzo fangoso formato in prevalenza da precipitati micritici bio-indotti comprendenti depositi non dolomitici ridepositati nella piattaforma sottostante.

### ***Le conoscenze odierne***

Dalla fine del XVIII secolo fino all'inizio del XX, le montagne dolomitiche del sud Tirolo sono state il centro della fondamentale ricerca intorno all'origine della dolomite, la quale è rimasta per lungo tempo un problema in campo sedimentologico. C'era un consenso generale che: 1) molte dolomie si formarono attraverso sostituzione secondaria di carbonato di calcio metastabile, così come l'aragonite e la magnesio calcite di alta temperatura; 2) l'acqua del mare è la sorgente ideale per soluzioni dolomitizzanti perché in essa ci sono alte concentrazioni di ioni magnesio. Ironicamente, sebbene l'attuale acqua di mare sia sovrassatura rispetto alla dolomite, né la precipitazione di dolomite massiva né la dolomitizzazione possono essere osservate mentre accadono. Inoltre, sebbene le moderne condizioni presentano la possibilità di studio dei parametri geochimici che promuovono la precipitazione dolomitica, il tentativo di simulare in laboratorio le condizioni osservate non hanno ancora ottenuto successo. A tutto ciò però va aggiunto che negli ultimi 40-50 anni, la scoperta della formazione della dolomite in particolari ambienti come al di sotto della sabka di Abu Dhabi e nei laghi effimeri del sud Australia (Coroong Lagoon) hanno offerto nuove idee sul controllo del processo chimico-fisico.

### ***Le dolomie per precipitazione diretta***

La dolomitizzazione si verifica in condizioni ambientali particolari quali possono essere quelle ipersaline come, ad esempio, in ambienti tidali e lacustri, o in zone del sottosuolo dove si incontrano e mescolano acqua meteorica e acqua marina. Anche l'attività biologica può essere un fattore importante nel processo di dolomitizzazione, visto che la materia organica, in particolare alghe e batteri, sembra ne favoriscano lo sviluppo. I criteri per la classificazione delle dolomie possono essere sia composizionali, riguardanti il rapporto calcio/magnesio, che tessiturali e genetici. Per quest'ultima tipologia classificativa, attualmente consideriamo dolomie ottenute per precipitazione diretta e per sostituzione. Le dolomie di precipitazione diretta, o primarie, sono rarissime e la precipitazione diretta di dolomite nell'acqua marina è fundamentalmente un problema di nucleazione molecolare che è un processo estremamente lento a basse temperature. Tra gli studiosi è opinione corrente che tale processo sia stato estremamente raro anche nel passato geologico, tranne però, durante il Precambriano e il Paleozoico in cui la precipitazione diretta sarebbe stata favorita dall'alta pressione di anidride carbonica nell'atmosfera, dovutamente alle ancora frequentissime eruzioni vulcaniche che, inoltre, producevano un elevato rapporto magnesio/calcio nelle acque.

### ***Le dolomie di sostituzione***

Le dolomie di sostituzione rappresentano la maggior parte delle dolomie antiche e recenti. Si formano a causa della conversione di un precursore minerale costituito da carbonato di calcio (solitamente calcite o aragonite), che sia sedimento sciolto o roccia, in dolomite: questo processo consiste essenzialmente in una parziale sostituzione degli atomi di calcio con quelli di magnesio. A basse temperature, lo smistamento degli ioni in una struttura cristallina è molto lento, anche tenendo in considerazione i tempi geologici: di conseguenza, si ipotizza che la dolomitizzazione non sia una reazione che avvenga allo stato solido, ma che si attui mediante dissoluzione del carbonato di calcio



e contemporanea precipitazione di dolomite a partire da una soluzione acquosa che attraversi il sedimento. In generale, perché si possa verificare sono necessarie due condizioni fondamentali: a) un rapporto Mg/Ca sufficientemente elevato e b) un meccanismo in grado di far fluire attraverso la roccia un volume sufficiente di soluzione "dolomitizzante", in modo che la reazione possa completarsi e quindi formarsi una vera roccia dolomitica. Naturalmente è necessario anche un tempo sufficientemente lungo affinché la reazione possa espletarsi.

### ***Modelli ipersalini***

Le soluzioni ipersaline necessarie ad aumentare il rapporto Mg/Ca vengono prodotte tramite evaporazione e conseguente movimento ascensionale dei fluidi attraverso il sedimento che può esplicarsi con meccanismi differenti: concentrazione capillare e pompaggio evaporitico oppure riflusso. Nel primo meccanismo si presuppone l'esistenza di una piana di marea retrostante una laguna; in condizioni climatiche aride e momenti di intensa evaporazione e ridotto rifornimento idrico, si innesca un movimento di risalita delle acque con sviluppo di evapotraspirazione. L'evaporazione lascia, come residuo, una salamoia interstiziale che può raggiungere valori di salinità 5 volte superiori all'acqua marina normale e rapporti Mg/Ca pari anche a 40:1. Con queste condizioni esistono le premesse allo sviluppo della dolomitizzazione dei sedimenti attraverso i quali passano (e ristagnano) tali salamoie. Nel meccanismo del riflusso, si presuppone l'esistenza di una piattaforma carbonatica bordata da barriere (scogliere organogene, barre litorali...) che racchiudono lagune interne, più o meno ristrette. Se il clima è arido, nei settori più interni di tali lagune si vengono a concentrare, per successive evaporazioni, dense salamoie ipersaline che poi, per gravità, tendono a rifluire verso mare; la presenza delle barriere limiterebbe il riflusso libero determinando il ristagno delle salamoie nelle parti più depresse delle lagune. Le salamoie così formatesi, nel tentativo di rifluire verso mare, percolerebbero attraverso i sedimenti dolomitizzandoli.

### ***Il Modello Salmastro***

In questo modello si spiega come acque salmastre derivate dalla miscela di acque ipersaline e dolci siano in grado di dolomitizzare efficacemente le rocce attraversate. La diluizione di salamoie da parte di acque dolci provoca una drastica diminuzione della salinità, mantenendo quasi costante il rapporto Mg/Ca, e le soluzioni risultanti rientrano nel campo di stabilità della dolomite. In condizioni ipersaline bisogna raggiungere valori molto elevati nel rapporto Mg/Ca affinché si verifichi la precipitazione di dolomite, invece di aragonite e/o calcite, mentre in condizioni salmastre, al contrario, la dolomite cristallizza con rapporti molto minori: basti pensare che sono sufficienti percentuali di acqua marina comprese tra il 5% e il 50% affinché si abbia sovrassaturazione della dolomite e quindi si verifichi la precipitazione di tale minerale. Gli ambienti in cui si possono avere queste situazioni sono gli ambienti schizoalini cioè, ad esempio, gli ambienti costieri periodicamente interessati da acque "dolci" meteoriche, in seguito alle quali è possibile l'instaurarsi di acquiferi di acque dolci sotterranee che quindi diventano potenziali aree di dolomitizzazione. In letteratura geologica, questo è noto come "modello Dorag" e spiega l'origine di quelle dolomie che non sono associate a rocce evaporitiche, oppure quelle in cui non esistono evidenze di alti strutturali o piattaforme carbonatiche.

### ***Conclusioni***

Fino ai tempi recenti, le ipotesi formative della dolomite hanno trascurato i fattori microbiologici nella costruzione dell'equazione geochimica, cioè precipitazione primaria opposta alla sostituzione secondaria, che furono postulate per rappresentare il processo di formazione della dolomite. Ora, è generalmente accettato che l'attività microbiologica, a determinate condizioni di formazione, può essere un mediatore della precipitazione di significanti quantità di dolomite a bassa temperatura. Come questa mediazione microbiologica di un biominerale possa essere traslata den-

tro la produzione di gigantesche strutture, come ad esempio le montagne dolomitiche, non è ancora chiaro, ma l'influenza di questi microorganismi non può essere ignorata. Oggi, mancano notizie sugli ambienti microbiologici giganti che indubbiamente esistevano nel passato geologico. Tali ambienti, che potevano essere esistiti all'interno di geometrie multifacies di piattaforme carbonatiche del Norico, potrebbero aver contribuito alla produzione microbiologica di carbonato micritico, possibilmente anche di precipitazione di dolomia primaria e, in questo modo, avrebbero potuto essere capaci di fornire grandi quantità di carbonato a grana fine per sostenere una trasformazione fisica e geochemica all'interno della struttura carbonatica. In futuro, la ricerca di prove microbiologiche, che possono essere raccolte da antiche rocce dolomitiche, potrebbero fornire indubbiamente nuove informazioni per meglio capire il processo che ha creato le eccezionali piattaforme dolomitiche.

## La tavola periodica

*“Gli elementi più abbondanti sulla Terra sono l'idrogeno e la stupidità.”*

*H. ELLISON*

### ***Quando nacque la necessità della tavola periodica?***

È difficile dire quando si sentì la necessità di costruire la tavola periodica degli elementi, dato che dai primi tentativi all'ottenimento della sua prima versione passarono circa 20 anni, tuttavia possiamo far risalire i primi tentativi al 1850, quando due chimici cercarono una prima organizzazione degli elementi fino ad allora noti, dato che ci si accorse che alcuni di essi mostravano proprietà analoghe. Il chimico tedesco Joahnn Döbereiner descrisse triadi di elementi, ovvero delle triplette con andamento delle proprietà chimico-fisiche che seguivano un trend, mentre più tardi il chimico inglese John Newlands propose la legge delle ottave, ovvero gruppi di otto elementi chimici che dimostravano una periodicità nella variazione delle proprietà. Questi due tentativi erano molto approssimativi, quanto vicini alla soluzione finale. Basti difatti pensare come le triadi approssimassero il peso atomico dell'elemento centrale come la media dei due agli estremi, o come la legge delle ottave sia oggi nota come regola dell'ottetto. Gli elementi chimici al tempo noti erano 63 e si intravedeva una sorta di organizzazione intrinseca, tuttavia senza capirne ancora il fondamento.

### ***Cosa accadde nel 1860?***

Nel 1860 si tenne il Congresso di Karlsruhe, un importante meeting di chimici e fisici in cui si discutevano e si proponevano le nuove teorie. A questo Congresso partecipò il nostro Amedeo Avogadro, che dimostrò il principio oggi giustamente noto con il suo nome, ovvero: campioni di gas diversi contengono, a parità di volume, temperatura e pressione, lo stesso numero di particelle. Però, se pesiamo questi gas diversi troveremmo pesi diversi e questo suggerisce che ogni gas o, meglio, gli atomi che lo costituiscono, possiedono un peso diverso l'uno dall'altro. A questo congresso parteciparono il chimico russo Dmitriv Ivanovic Mendeleev ed il chimico tedesco Julius Lotar Meyer i quali ritornarono a casa con una copia del lavoro di Avogadro e, come ben insegna la storia della scienza, la loro fu la mossa vincente per sviluppare la tavola periodica come oggi noi la conosciamo.

### ***Cosa scoprirono Mendeleev e Meyer nel 1869?***

Mendeleev e Meyer scoprirono che disponendo gli elementi chimici in ordine di massa atomica crescente si poteva osservare un andamento ripetitivo e regolare delle proprietà. Mendeleev cer-

cò quindi un giorno di organizzare tutti gli elementi secondo la legge periodica appena scoperta, ma non ci riuscì. Come raccontò lui in un congresso, vinto dal sonno sognò la giusta soluzione; svegliatosi, riorganizzò gli elementi chimici sistemandoli sempre per ordine di massa atomica crescente, ma andando a capo ogni volta che un ciclo di proprietà chimico-fisiche sembrava terminare e ricominciare. Ottenne così la prima versione della tavola periodica moderna, con l'eccezione che le righe erano invertite con le colonne e che c'erano alcuni buchi. Difatti Mendeleev non spostò gli elementi chimici di una casella, ma ipotizzò dei nuovi elementi chimici che secondo lui sarebbero esistiti, ma non ancora scoperti. Oggi tutti riconoscono a Mendeleev la tavola periodica e nessuno si ricorda di Meyer; il motivo risiede nel fatto che Mendeleev non si limitò solo ad organizzare gli elementi chimici, ma ebbe il merito di prevederne di nuovi.

### ***Vennero scoperti questi nuovi elementi chimici?***

Questi nuovi elementi chimici vennero tutti scoperti, a conferma della giustezza dell'intuizione del chimico russo. Il caso più eclatante è quello dell'elemento chimico germanio. Mendeleev difatti si accorse che tra gallio ed arsenico c'era un "buco" e che il nuovo elemento chimico si sarebbe trovato sotto il noto silicio, quindi seguendo l'andamento periodico delle proprietà avrebbe dovuto avere proprietà chimiche e fisiche simili a quelle del silicio ed un peso intermedio a quello di gallio e arsenico. Lui ipotizzò l'elemento ekasilicio (dal greco "simile al silicio") e ne predisse anche le maggiori proprietà. Nel 1866 il chimico tedesco Clemens Winkler scoprì un nuovo elemento chimico che venne chiamato germanio e dimostrava proprietà quasi identiche a quelle ipotizzate da Mendeleev: ad esempio, venne ipotizzato un peso atomico di 72 ed il germanio dimostrò 72,59, una densità di 5,5 g/cm<sup>3</sup> e venne misurato 5,32, una formula dell'ossido del tipo EO<sub>2</sub> con colore bianco e carattere anfotero (ovvero che si scioglie sia negli acidi che nelle basi) e venne sperimentata una formula GeO<sub>2</sub> con colore bianco e carattere anfotero.

### ***Ci furono dei problemi che dovettero far ripensare i principi fondamentali della tavola periodica?***

Come quasi tutte le nuove scoperte, anche la prima versione della tavola periodica mostrò delle carenze che, una volta risolte, portarono a qualche modifica ed alla legge periodica corretta. Il problema nacque quando venne scoperto l'argon il quale aveva una massa atomica di circa 40, uguale a quella del calcio, con la differenza che l'argon è un gas inerte, mentre il calcio è un metallo reattivo! Tra il 1900 ed il 1920 il fisico inglese Henry Mosely, studiando la spettroscopia a raggi X, si accorse che, bombardando un elemento chimico con raggi X, si potevano estrarre elettroni e quindi creare atomi figli il cui peso atomico era certamente inferiore, mentre rimaneva costante una quantità legata ai nuclei, ovvero il numero di protoni, oggi indicato con Z, numero atomico, che nelle condizioni di elettroneutralità corrisponde anche al numero di elettroni dell'atomo. Con questa scoperta la tavola periodica venne riordinata secondo il numero atomico crescente e non secondo la massa atomica, mettendo pace ai problemi sorti con la scoperta di nuovi elementi chimici e trovando la forma a noi familiare.

### ***Quali sono gli elementi fondamentali della moderna tavola periodica?***

I primi due concetti fondamentali sono quelli di numero atomico e di peso atomico (detto anche numero di massa). Il numero atomico Z è il numero di protoni o di elettroni nell'atomo e viene scritto a destra e come pedice al simbolo dell'elemento; il numero di massa A è pari alla somma di protoni (o elettroni) e dei neutroni e si scrive come apice a destra. C'è da dire che non sempre viene rispettata la nomenclatura. All'interno della tavola periodica si individua il periodo, ovvero ogni riga e corrisponde al numero quantico principale, n, ovvero al livello energetico occupato dagli elettroni. Lungo il periodo, come suggerisce il nome, le proprietà chimiche variano in modo continuo e si va a capo quando le proprietà tornano ad un valore simile a quelle del primo elemento a sinistra,

cominciando un nuovo periodo. Così facendo si creano delle colonne, dette gruppi il cui numero corrisponde al numero di elettroni che si trovano nell'orbitale esterno. Il numero di elettroni che trovano posto su ogni orbitale atomico è determinato da leggi quantomeccaniche, quindi esistono raggruppamenti di elementi chimici che condividono delle colonne, gruppi, ma non periodi e vengono chiamati blocchi. Esistono tre principali blocchi, s, p e d, quest'ultimo detto anche blocco di transizione. Il blocco è legato al numero quantico azimutale,  $l$ , ovvero al tipo di orbitale esterno occupato dagli elettroni.

### ***A cosa sono legati i numeri quantici che descrivono la tavola periodica?***

Come sempre accade nel mondo della chimica e degli atomi, il comune denominatore è l'equazione di Schrödinger che fornisce il numero quantico principale  $n$ , e dal quale dipendono gli altri numeri quantici. Per quanto riguarda il numero principale  $n$ , più questo è grande, più gli elettroni sono lontani dal nucleo che li attrae, sono su "piani" più elevati. Sono quindi meno attratti dal nucleo e la loro energia è minore. Attenzione, che nel mondo degli atomi si definisce un'energia elevata quanto più questa è negativa, per cui dire un'energia minore vuol dire meno negativa, più positiva, ovvero più vicina a 0. Ad ogni livello energetico  $n$ , corrispondono dei sottolivelli definiti dal numero quantico azimutale  $l$ , in particolare  $l$  può avere tutti i valori da  $n - 1$  a 0. Quindi se  $n = 1$ ,  $l = 0$ , se  $n = 2$ ,  $l = 0$  e  $1$ , se  $n = 3$ ,  $l = 0$ ,  $1$  e  $2$ ; questo vuol dire che all'aumentare di  $n$ , cioè più ci si allontana dal nucleo, più ci sono sottolivelli, che in teoria si traducono in orbitali di varia forma. Si aggiungono poi altri due numeri quantici, quello magnetico  $m_l$ , e quello di spin  $m_s$ . Il primo identifica l'orientazione dell'orbitale, ovvero la direzione dove punta,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  oppure una combinazione di queste, il secondo può valere solo  $+1/2$  e  $-1/2$  ed identifica la rotazione dell'elettrone, verso destra o verso sinistra.

### ***La legge delle ottave è simile alla regola dell'ottetto?***

La legge delle ottave era l'antesignana dell'attuale regola empirica dell'ottetto, che recita così: quando l'atomo ha raggiunto la configurazione elettronica, ovvero il numero di elettroni, del gas nobile più vicino, l'atomo è stabile. Ricordando il concetto di periodo, ovvero di riga della tavola periodica, si vede che ogni riga, in prima approssimazione le prime tre, ha otto caselle, ovvero otto elementi chimici. Sapendo che passando di casella in casella si aggiunge un elettrone, arrivati all'ultima casella a destra si hanno in totale otto elettroni; dopo di che si va a capo, per la legge periodica legata alle proprietà chimico fisiche. Si viene a creare quindi una colonna a destra, detta gruppo dei gas nobili. Nobili perché all'inizio si pensavano inerti, in quanto non si riusciva a farli reagire. L'inerzia era spiegata prendendo come giustificazione il fatto che aggiungendo otto elettroni ad un livello atomico lo si riempie completamente e quindi è stabile. Oggi si riescono a far reagire anche alcuni gas nobili, tuttavia la regola empirica dell'ottetto è una buona regola per capire la tavola periodica ad un livello non specifico e viene utilizzata da tutti i chimici, almeno in prima approssimazione, per capire come due elementi chimici (scelti con un certo criterio "chimico") reagiranno tra di loro in termini di numero di legami chimici che si stabiliranno.

### ***Come varia il raggio atomico degli elementi?***

Guardando alla tavola periodica, il raggio atomico degli elementi, definito come la metà della distanza che separa i centri di atomi contigui ed uguali, decresce procedendo da sinistra a destra lungo un periodo, mentre aumenta procedendo dall'alto al basso lungo un gruppo. Quando ci si muove lungo un periodo da sinistra a destra vengono aggiunti elettroni, quindi si potrebbe pensare che il volume aumenti, ma ci dimentichiamo che parimenti si aggiungono anche protoni, che sono caricati positivamente e quindi attraggono elettroni caricati negativamente. Si potrebbe pensare che aggiungendo tanti protoni quanti elettroni l'effetto si annulli, ma un'analisi più attenta dimostra che gli elettroni aggiunti vengono aggiunti allo stesso livello, quindi alla stessa distanza dal nu-

cleo, inoltre interagiscono anche tra di loro e l'effetto finale è che prevale la carica positiva del nucleo e quindi l'attrazione verso il centro con conseguente diminuzione del volume e quindi del raggio. Scendendo lungo un gruppo, invece, si passa da un periodo a quello successivo, ovvero si aumenta di livello, cioè di distanza dal nucleo. Scendendo di casella in casella aumentano i protoni, ma anche gli elettroni, ma in questo caso i protoni vengono aggiunti sempre al nucleo, mentre gli elettroni a livelli energetici superiori con conseguente aumento del raggio atomico.

### ***Come varia l'energia di ionizzazione degli elementi?***

L'energia di ionizzazione è definita come l'energia necessaria per estrarre un elettrone da un atomo in fase gas. Si definisce energia di prima ionizzazione l'energia per estrarre il primo elettrone e così via. Guardando alla tavola periodica, l'energia di ionizzazione degli elementi aumenta procedendo da sinistra a destra lungo un periodo, mentre diminuisce procedendo dall'alto al basso lungo un gruppo. Quando ci si muove lungo un periodo da sinistra a destra vengono aggiunti elettroni e parimenti si aggiungono anche protoni, che sono caricati positivamente e quindi attraggono elettroni caricati negativamente. Si potrebbe pensare che aggiungendo tanti protoni quanti elettroni l'effetto si annulli, ma un'analisi più attenta dimostra che gli elettroni aggiunti vengono aggiunti allo stesso livello, quindi alla stessa distanza dal nucleo, inoltre interagiscono anche tra di loro e l'effetto finale è che prevale la carica positiva del nucleo e quindi l'attrazione verso il centro, con conseguente meno libertà degli elettroni. L'energia per estrarre un elettrone aumenta quindi andando da sinistra verso destra lungo un periodo. Scendendo lungo un gruppo, invece, si passa da un periodo a quello successivo, ovvero si aumenta di livello, cioè di distanza dal nucleo. Scendendo di casella in casella aumentano i protoni, ma anche gli elettroni, ma in questo caso i protoni vengono aggiunti sempre al nucleo, mentre gli elettroni a livelli energetici superiori con conseguente diminuzione dell'energia di ionizzazione.

### ***Come varia l'affinità elettronica degli elementi?***

L'affinità elettronica degli elementi chimici è l'energia che si libera quando un atomo in fase gas cattura un elettrone. In questo caso non si possono descrivere delle variazioni periodiche come per le altre due proprietà discusse nelle Pillole scorse, tuttavia si può dire che l'affinità elettronica è maggiore per quegli elementi vicini all'ossigeno, quindi in alto a destra, mentre è minore per quelli vicini al cesio, quindi in basso a sinistra. Se ci ricordiamo la regola dell'ottetto discussa in precedenza, un elemento tenta sempre di assumere la configurazione elettronica del gas nobile più vicino in modo da diventare più stabile. Gli elementi più a destra saranno tentati ad acquistare uno o due elettroni e quindi spostarsi di uno due posti a destra, completando l'ottetto ed assomigliando al loro vicino gas nobile, piuttosto che perderne sei o sette e quindi spostandosi di altrettante caselle a sinistra; in questo caso il processo richiede più energia e quindi non è conveniente. Al contrario, gli elementi più a sinistra gradiranno perdere uno o due elettroni, quindi spostandosi indietro di uno due posti, raggiungendo il gas nobile più vicino a loro, piuttosto che acquistarne sei o sette. Affinità elettronica ed elettronegatività sono agli antipodi ed entrambe, insieme alla regola dell'ottetto, ci permettono di capire in prima approssimazione che gli elementi di sinistra si combineranno molto volentieri con quelli di destra.

### ***Ci sono delle eccezioni alla regola dell'ottetto?***

Come sempre ci sono delle eccezioni ad ogni regola, anche per la regola dell'ottetto; tuttavia, ci sono delle spiegazioni scientifiche e sensate. Consideriamo ad esempio il fosforo che si trova nel V gruppo; gruppo numero cinque vuol dire che ci sono cinque elettroni nell'orbitale esterno. Indipendentemente da quanti elettroni ci siano negli orbitali più interni, questi sono fuori gioco per studiare la reattività dell'elemento, perché sono completi e stabili. Come dire che presa una cipolla, le proprietà di questa siano date dallo strato esterno e quello che c'è sotto non ci interessa. Dunque,

cinque elettroni vuol dire che ce ne vogliono tre per completare l'ottetto e quindi assomigliare al gas nobile più vicino, l'argon. Difatti si forma il composto  $\text{PCl}_3$ , dove il cloro scambia con il fosforo tre elettroni ed il fosforo con il cloro uno, tutti e due raggiungono così la stabilità. Ma in natura si forma anche il composto  $\text{PCl}_5$ , il che farebbe presupporre una violazione della regola dell'ottetto con dieci elettroni. In realtà con gli elementi dal terzo periodo in poi sono disponibili orbitali nuovi, che, anche se non occupati, possono venir messi a disposizione nelle reazioni chimiche violando la regola dell'ottetto. Altre spiegazioni per la violazione risiedono negli orbitali virtuali, nell'ibridazione di più orbitali e nel fenomeno del borrowing.

## La matematica discreta

*“Una cosa è matematicamente ovvia solo dopo che l’hai capita.”*

*R. D. CARMICHAEL*

### **Introduzione**

Tutti noi abbiamo un'idea di cosa sia la matematica, ma cosa significa discreta? Non si tratta certo di una matematica “così così”, a metà tra la sufficienza e il buono! In matematica, la parola discreto ha a che vedere con insiemi costituiti da oggetti distinti, isolati, non contigui: quindi oggetti che possono essere contati. Ad esempio, i numeri naturali (cioè 1, 2, 3, e così via) costituiscono un insieme discreto. L'aritmetica, cioè la parte della matematica che studia questi numeri, fa quindi parte della matematica discreta. Il contrario di discreto è continuo, mentre due parole che sono quasi sinonimi di discreto sono numerabile e digitale (quest'ultimo termine fa intuire la grande importanza che la matematica discreta ha nell'era dei computer). Nelle prossime Pillole parleremo allora di matematica discreta e ci occuperemo non solo di numeri (naturali), ma anche di altri oggetti particolari, come i grafi, i quadrati magici, i quadrati latini, le tassellature. Affronteremo insieme argomenti affascinanti come la colorazione delle carte geografiche, la teoria dei giochi, i famosi sei gradi di separazione, la matematica nel gioco degli scacchi.

### **Cosa sono i grafi?**

Un grafo è semplicemente un insieme di punti, detti nodi o vertici, collegati tra di loro da linee che vengono chiamate archi o lati. Un termine alternativo che possiamo usare per descrivere un oggetto di questo tipo è quello di rete. Strutture di questo tipo sono estremamente utili per descrivere una grande quantità di situazioni, processi e fenomeni, non solo nella matematica astratta, ma anche in informatica, in fisica, nell'ingegneria e in molte altri contesti scientifici e tecnologici. Per questo motivo esiste una parte della matematica discreta chiamata teoria dei grafi, che studia i vari tipi di grafi e le loro proprietà. Ad esempio, si parla di grafi orientati o non orientati, a seconda che gli archi che collegano i nodi abbiano una direzione, come una freccia, oppure no; si parla di grafi planari, se gli archi non si incrociano, o non si sovrappongono tra di loro; si dice che un grafo ha una struttura di albero, quando presi due nodi qualsiasi esiste un solo cammino che li congiunge. Magari senza rendercene conto, utilizziamo grafi molto spesso, nella vita di tutti i giorni: ad esempio, sono di fatto grafi gli alberi genealogici, gli organigrammi aziendali, i diagrammi di flusso, ma anche, in un certo senso, le carte geografiche o gli stradari, gli schemi elettrici, e così via.

### ***Perché sono famosi i ponti della città di Königsberg?***

La città prussiana di Königsberg, ora chiamata Kaliningrad e in territorio russo, è famosa per avere dato i natali al filosofo Kant e al matematico Hilbert. La città è percorsa da un fiume, il Pregel, nel quale si trovano due isole piuttosto vaste, un po' come accade nel centro della città di Parigi. Nel Settecento, queste isole erano collegate tra di loro, e con le due aree principali della città, da sette ponti. Il grande matematico svizzero Leonhard Euler, noto in Italia come Eulero, si domandò se fosse possibile fare una passeggiata per Königsberg in modo da attraversare ognuno dei sette ponti una e una sola volta, tornando infine al punto di partenza. Oggi, in onore di Eulero, chiamiamo un tragitto di questo tipo circuito euleriano. Eulero ebbe l'intuizione di formulare il problema in termini di teoria dei grafi: cioè, rappresentò ciascuna delle aree urbane con un nodo e ciascuno dei ponti con un arco. Osservando il grafo che si era originato, constatò che da ogni nodo usciva un numero dispari di archi; e dopo un'accurata indagine matematica sul problema, riuscì a dimostrare rigorosamente che in un grafo è possibile effettuare un circuito euleriano se e solo se non ci sono nodi toccati da un numero dispari di archi. Di conseguenza la passeggiata euleriana sui ponti di Königsberg è impossibile. Il problema dei ponti di Königsberg è importante nella storia della matematica perché fu uno dei primi problemi di teoria dei grafi ad essere discusso in modo rigoroso.

### ***Cos'è il problema del commesso viaggiatore?***

Immaginate che un commesso viaggiatore o, come forse si direbbe oggi, un agente di commercio, debba visitare una serie di clienti che si trovano in città diverse, tra di loro collegate da una rete di strade. Il commesso viaggiatore vuole trovare il percorso più breve che gli permetta di passare da ciascun cliente una e una sola volta e che lo riporti alla fine nella città di partenza. Ricordate il circuito euleriano dei ponti di Königsberg? In quel caso dovevamo trovare un percorso che passasse una e una sola volta da ogni ponte, cioè da ogni arco del grafo; qui invece dobbiamo trovare un percorso che passi una e una sola volta da ogni città, cioè da ogni nodo del grafo. Un percorso di questo tipo viene chiamato circuito hamiltoniano, in onore di William Hamilton: questo matematico irlandese inventò, nel 1857, un gioco da tavolo che consisteva nel trovare un cammino chiuso sul bordo di un dodecaedro. Il problema del commesso viaggiatore è ancora oggi uno dei problemi più studiati dagli informatici e trova applicazione non solo nei problemi logistici, ma anche nella progettazione di circuiti elettronici. È un problema molto difficile, perché non appena il numero di nodi diventa abbastanza alto, anche utilizzando computer molto potenti non si riesce più a trovare il percorso ottimale in tempi ragionevoli e diventa inevitabile ricorrere a metodologie euristiche approssimate.

### ***Cosa sono i "sei gradi di separazione"?***

Nel 1967 lo psicologo Stanley Milgram reclutò un gruppo di abitanti del Midwest e chiese a ciascuno di inviare una lettera ad una persona residente a Boston, a migliaia di chilometri di distanza, sconosciuta ai partecipanti all'esperimento. Invece di dar loro l'indirizzo preciso del destinatario, fornì il nome e poche altre informazioni e li invitò a spedire la missiva a un loro conoscente, che secondo loro fosse in grado di proseguire al meglio la catena verso il destinatario finale. Il risultato dell'esperimento fu sorprendente. La maggior parte delle lettere arrivò a destinazione e in pochissimo tempo: i passaggi intermedi non furono centinaia, come ci si attendeva, ma in media soltanto sei. L'esperimento di Milgram fu determinante per rafforzare la teoria detta appunto dei sei gradi di separazione, secondo la quale nella rete delle conoscenze, ognuno è collegato a qualunque altra persona nel mondo attraverso una catena di pochi passaggi, in media 6. Negli ultimi anni la teoria è stata confermata da esperimenti simili a quello di Milgram, ma compiuti usando le reti sociali su internet. La teoria dei sei gradi di separazione è stata spiegata ipotizzando che le reti sociali abbiano una struttura di grafo molto speciale, detta di piccolo mondo, grazie alla quale ogni nodo ha di solito un numero limitato di nodi vicini e tuttavia il grado di separazione tra due nodi

qualsiasi è in media molto basso. Le reti piccolo mondo sono molto diffuse, oltre che nelle reti di persone, anche nei neuroni del cervello, nel web, nelle catene alimentari e in molti altri tipi di rete.

### ***Cos'è il teorema dei quattro colori?***

Supponiamo di essere disegnatori di carte geografiche e di dover creare una carta dell'Europa. Abbiamo tracciato i confini degli Stati e dobbiamo colorare l'interno di ognuno, facendo in modo che non ci siano Stati confinanti con lo stesso colore. Nel 1852 il matematico Francis Guthrie si domandò di quanti colori diversi abbiamo bisogno e ipotizzò, senza provarlo rigorosamente, che quattro colori siano sufficienti in ogni caso. Per ben 125 anni l'ipotesi di Guthrie rimase indimostrata. Nel 1977, i due americani Kenneth Appel e Wolfgang Haken riuscirono a fornire la dimostrazione della secolare congettura, utilizzando un complicatissimo programma informatico che analizzò una per una tutte le configurazioni di mappe possibili. Dopo migliaia di ore di calcolo, il programma verificò che per tutte le configurazioni l'ipotesi di Guthrie era valida; per trascrivere tutti i passi della dimostrazione vennero riempite più di 500 pagine. La congettura dei quattro colori fu il primo esempio di teorema dimostrato grazie ad un programma per computer: il rivoluzionario metodo di dimostrazione utilizzato suscitò grandi polemiche nella comunità scientifica, soprattutto per i dubbi sull'affidabilità di un simile approccio; ad oggi, comunque, nessuno è riuscito a scovare errori in quella dimostrazione.

### ***Cos'è la teoria dei giochi?***

La teoria dei giochi è una parte della matematica che studia le situazioni di conflitto tra soggetti, immaginando che questi partecipino ad una sorta di "gioco" di società, in cui le decisioni di ciascuno possono provocare conseguenze sui risultati ottenuti dagli avversari. Lo scopo della teoria è descrivere matematicamente il comportamento umano nei casi in cui diversi soggetti interagiscono per contendersi qualche risorsa. La teoria nacque negli anni Quaranta e uno dei suoi creatori fu il celebre matematico americano John von Neumann. Un altro famoso cultore della teoria dei giochi è stato John Nash, tuttora vivente, premio Nobel per l'economia, la cui vita è narrata nel film "A beautiful mind". La teoria dei giochi viene applicata a svariati settori, come l'economia, la finanza, i problemi militari, la politica, la sociologia, la psicologia, lo sport, l'etologia e l'ambiente. Nella teoria dei giochi si parla spesso di giochi a somma zero: con questa espressione si intende una situazione in cui ciò che un partecipante vince viene perso dall'altro. Questi giochi portano spesso a situazioni conflittuali, per cui un buon negoziatore preferisce i giochi a somma non zero, più soddisfacenti per i soggetti coinvolti, in quanto non ci sono sconfitti in senso stretto. Un esempio di gioco a somma zero è il poker, dove la vincita di un giocatore viene corrisposta dal giocatore perdente; un esempio di gioco a somma non zero è invece il Superenalotto, dove non esiste un confronto diretto tra vincitori e sconfitti.

### ***Cos'è la teoria dei numeri?***

Con l'espressione teoria dei numeri si indica quella parte della matematica che studia i numeri naturali, cioè i numeri che abbiamo imparato a usare alla scuola elementare o, se volete, quelli che usiamo per contare le pecore quando vogliamo addormentarci! In un certo senso, quindi, la teoria dei numeri corrisponde a quella che chiamiamo comunemente aritmetica, ma ciò non deve trarci in inganno, facendoci pensare che si tratti di una parte della matematica semplice e banale! È vero il contrario: nella teoria dei numeri, alla quale hanno contribuito grandi matematici come Fermat, Eulero, Lagrange, Gauss e Riemann, si incontrano alcuni dei problemi più difficili e oscuri della matematica. Potremmo citare a tal proposito alcuni enigmi, a tutt'oggi irrisolti, legati ai numeri primi, come ad esempio la congettura di Goldbach: secondo questa congettura, ogni numero pari maggiore di 2 può essere scritto come somma di due numeri primi. Ad esempio, questo è vero per il numero 8, che è uguale a  $3+5$ , o per il numero 14, che è uguale a  $3 + 11 = 7 + 7$ . Finora non è



stato trovato nessun numero pari maggiore di 2 per il quale non valga la congettura, ma nessuno è riuscito a dimostrare rigorosamente che essa valga veramente per tutti i numeri pari maggiori di 2.

### ***Cos'è il fattoriale?***

Il fattoriale di un numero intero qualsiasi è il prodotto dei primi numeri interi positivi minori o eguali di quel numero. Ad esempio, il fattoriale di 5 è uguale a  $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5$ , cioè a 120. Ci si rende conto facilmente che con il crescere del numero di partenza, il fattoriale aumenta molto velocemente: ad esempio già il fattoriale di 10 è 3.628.800; il fattoriale di 20 è un numero enorme di 19 cifre, che è circa uguale al numero totale degli insetti presenti sulla Terra; il fattoriale di 60 è un numero incredibilmente grande, di 81 cifre, pari agli atomi di cui è composto l'universo osservabile. A causa della rapidità sorprendente con cui la funzione fattoriale cresce, già all'inizio dell'Ottocento venne adottata una notazione che fa uso del punto esclamativo: per indicare, ad esempio, il fattoriale di 10, si scrive 10 seguito da un punto esclamativo (10!). Il fattoriale di un numero può essere calcolato con un computer in modo ricorsivo, cioè ricorrendo al calcolo di un altro fattoriale, come in un gioco di scatole cinesi; questo perché il fattoriale di un numero è pari al numero stesso moltiplicato per il fattoriale del numero precedente (ad esempio, il fattoriale di 5 è uguale a 5 per il fattoriale di 4). Per convenzione, poi, si stabilisce che il fattoriale di 0 è uguale a 1. I fattoriali sono molto usati nel calcolo combinatorio: ad esempio, se abbiamo una parola di 5 lettere, ci saranno  $5!$ , cioè 120, modi di anagrammarla, cioè di cambiare l'ordine delle lettere.

### ***Cos'è un quadrato latino?***

Immaginiamo di estrarre da un mazzo di carte i quattro re, le quattro regine, i quattro fanti e i quattro assi, e di voler disporre queste 16 carte in un quadrato  $4 \times 4$ , in modo che su ogni riga e su ogni colonna si trovino tutti i quattro diversi tipi di carte, senza ripetizioni. Ad esempio, vogliamo che sulla prima riga ci siano un re, una regina, un fante e un asso, non importa in che ordine, e la stessa cosa deve accadere su ciascuna delle altre righe e su ciascuna delle colonne. Se riusciamo a ottenere una configurazione di questo tipo, abbiamo creato un quadrato latino. Ovviamente la cosa non riguarda soltanto le carte da gioco, ma qualsiasi insieme di simboli o oggetti: numeri, lettere, colori, e così via. Gli ascoltatori che amano giocare a sudoku si saranno già accorti che il loro passatempo consiste nientemeno che nella creazione di un quadrato latino  $9 \times 9$ , con la complicazione che oltre alle righe e alle colonne bisogna considerare anche le sottogriglie interne  $3 \times 3$ . Torniamo al nostro quadrato di carte di gioco. Ora non vogliamo soltanto che su ogni riga e su ogni colonna si trovino tutti i quattro tipi di carte, senza ripetizioni; ma anche che su ogni riga e su ogni colonna si trovino tutti i quattro semi, senza ripetizioni. Quello che otterremo sarà un quadrato greco-latino, una specie di sovrapposizione tra due quadrati latini. I quadrati latini e i quadrati greco-latini non sono inutili passatempi per matematici, ma trovano importanti applicazioni pratiche in statistica.

### ***Cos'è un quadrato magico?***

In un'incisione realizzata nel 1514 dal celebre artista tedesco Albrecht Dürer, intitolata "Melencolia I" ed esposta alla National Gallery di Washington, compare, assieme ad altri simboli collegati all'alchimia, una specie di tabella quadrata suddivisa in sedici caselle (quattro per lato). In ogni casella c'è un numero e, osservando attentamente l'opera, si nota che le somme dei numeri su ciascuna riga, su ciascuna colonna e su ciascuna delle due diagonali, sono tutte uguali tra loro, in particolare sono pari a 34. Una tabella di questo tipo viene chiamata dai matematici quadrato magico, e il numero uguale a tutte le somme viene di solito chiamato costante di magia. I quadrati magici erano noti già prima di Cristo ai Cinesi, i quali attribuirono a questi oggetti matematici significati religiosi e cosmici; gli Arabi li fecero conoscere in Occidente, dove vennero legati all'esoterismo e considerati come degli amuleti. Un quadrato magico si può ammirare anche accanto all'entrata principale della famosa basilica della Sagrada Familia a Barcellona. Compilare quadrati magici non

è cosa facile. Per la verità, è nota una tecnica banale per costruire di quadrati magici di ordine dispari, cioè con il lato di lunghezza dispari, mentre costruire quadrati magici di ordine pari è in generale più difficile. Per questo tipo di costruzioni, gli studiosi hanno ideato metodi molto ingegnosi, e lo studio di questi oggetti matematici è ancora oggi molto intenso.

### ***Perché i matematici sono molto interessati al gioco degli scacchi?***

L'interesse dei matematici per gli scacchi è legato a diverse ragioni. Potremmo individuare due filoni principali di questo interesse: da una parte, gli spunti offerti dal gioco degli scacchi per costruire enigmi e problemi di carattere matematico; dall'altra, lo studio delle tecniche possibili per automatizzare il gioco, cioè per costruire dei programmi informatici in grado di giocare a scacchi. Per quanto riguarda il primo filone, potremmo citare, ad esempio, il rompicapo delle otto regine: questo enigma, che appassionò anche il famoso matematico Carl Friedrich Gauss, consiste nel disporre otto regine su una scacchiera in modo che nessuna di esse sia minacciata dalle altre. Già Gauss trovò 72 soluzioni possibili; successivamente ne furono trovate altre 20. Un altro celebre esempio di enigma scacchistico è il giro del cavallo: muovere un cavallo sulla scacchiera in modo da fargli toccare tutte le caselle, ciascuna una volta soltanto, tornando alla fine nella posizione di partenza. Qui le soluzioni possibili sono addirittura migliaia di miliardi! Gli informatici hanno escogitato algoritmi molto raffinati per trovare queste soluzioni in modo efficiente. Per quanto riguarda invece i computer giocatori di scacchi, si tratta di uno dei primi campi ai quali sono state applicate le tecniche dell'intelligenza artificiale, già all'epoca dei primi computer elettronici. Nel corso dei decenni, a questa impresa sono stati dedicati enormi sforzi e in tempi recenti sono stati conseguiti risultati straordinari: cito soltanto la famosa partita del 1996 in cui il computer Deep Blue sconfisse l'allora campione del mondo Garri Kasparov.

### ***Cos'è una tassellatura?***

A molti sembrerà strano, ma la matematica studia anche la disposizione delle piastrelle su un pavimento! Solitamente le piastrelle che ricoprono un pavimento presentano una ripetizione continua di alcune forme geometriche: tutto questo senza creare sovrapposizioni né buchi. Una costruzione di questo tipo viene chiamata dai matematici tassellatura e ogni figura usata è detta tassello. Il classico esempio di tassellatura è costituito da una ripetizione di rettangoli o poligoni regolari, ma i tasselli potrebbero essere anche irregolari o avere lati curvilinei. Una tassellatura molto semplice e comune è quella realizzata con esagoni, mentre non è possibile ricoprire il piano con pentagoni. Nulla vieta di concepire anche tassellature dello spazio, dove i tasselli, ovviamente, sono solidi. Lo studio delle tassellature è molto difficile e ancora oggi vengono continuamente scoperte nuove complicate configurazioni. Una tassellatura viene detta periodica se esiste una regione che si ripete sempre identica a se stessa, ma esistono anche tassellature non periodiche, nelle quali le figure non si ripetono mai: un esempio famoso fu scoperto dal matematico Roger Penrose nel 1974. L'arte figurativa e l'architettura hanno utilizzato spesso le tassellature: celebri sono le pavimentazioni che ricoprono molte pareti del complesso dell'Alhambra, a Granada, e non meno suggestive sono le tassellature realizzate dall'artista olandese Maurits Cornelis Escher, dove i tasselli sono spesso figure antropomorfe o animali. Anche la natura offre molti esempi di tassellatura: si pensi ad esempio alla buccia dell'ananas o alle cellette esagonali delle arnie.

# I giacimenti fossiliferi

*“I dinosauri sono gli effetti speciali della natura.”*  
R. T. BAKKER

## **Introduzione**

Argomento di questa serie di Pillole saranno alcuni dei più noti giacimenti fossiliferi mondiali, che offrono un'eccezionale quantità di informazioni sulla vita del passato. Le rocce sedimentarie sono molto spesso zeppe di resti fossili; è esperienza comune, ad esempio, trovarne in abbondanza durante un'escursione in montagna. Esistono però dei luoghi del pianeta particolarmente ricchi, considerati eccezionali per la quantità di esemplari e per il loro perfetto stato di conservazione: in questi casi, mutuando dal gergo minerario tedesco, si parla di Fossil-Lagerstätten, ossia di “giacimenti fossili dall'eccezionale interesse scientifico”. Si possono riconoscere due tipi fondamentali di Lagerstätte: nelle Konzentrat-Lagerstätten («giacimenti per accumulo») sono presenti grandi quantità di resti, in genere le parti dure degli organismi. Classici esempi sono i cosiddetti bone beds, ovvero letti ossiferi, derivanti dall'accumulo di ossa di vertebrati. Nelle Konservat-Lagerstätten («giacimenti per conservazione») prevalgono esemplari in eccezionale stato di conservazione, con molti resti ancora in connessione anatomica e con buona conservazione dei tessuti molli, mineralizzati o sotto forma di impronte. La loro importanza è enorme per ricostruire la storia evolutiva dei principali gruppi di organismi, specie quando in essi è possibile rinvenire un'ampia varietà di fossili, appartenenti a decine o centinaia di specie differenti, sia animali che vegetali.

## **Ediacara**

La scoperta, avvenuta nel 1947 nell'Ediacara Member dell'Australia sudoccidentale, di fossili del Precambriano superiore, può essere considerata un evento fondamentale nella storia della paleontologia. Fino ad allora uno dei grandi dubbi sul processo evolutivo della vita era legato all'apparente “improvvisa” comparsa dei primi organismi complessi nel Cambriano. I ritrovamenti di Ediacara diedero il via a una serie di scoperte di metazoi fossili precambriani anche in giacimenti africani, europei, americani e asiatici. Nel loro insieme questi organismi sono noti comunque come “Fauna di Ediacara”; essa dà il nome a un preciso intervallo stratigrafico, l'Ediacariano, iniziato subito dopo la glaciazione varangeriana, circa 630 milioni di anni fa e terminato con l'inizio del Cambriano, 542 milioni di anni fa, quando la fauna di Ediacara sostanzialmente scompare. Tra i fossili ediacariani, molto diffusi sono i resti di organismi simili a meduse, dalla simmetria radiale e concentrica, del raggio di pochi centimetri, come *Cyclomedusa*. Enigmatici sono i resti di organismi con strutture triradiali che partono dal centro; il più noto di questi è senza dubbio *Tribrachidium*. Molti dei resti appartengono a creature simili a fronde, dotati di una struttura simile a un bulbo, forse per ancorarsi al fondo marino, tra cui *Pteridinium*. Un altro gruppo comprende impronte fossili ovoidali o allungate, con un corpo formato da numerosi segmenti, fino a quaranta in *Spriggina*. Un ultimo “gruppo” è rappresentato da impronte fossili spesse pochi millimetri, ma lunghe anche un metro; tra questi esseri, dotati di simmetria bipolare, la più nota è sicuramente la *Dickinsonia*.

## **Burgess**

Le Argilliti di Burgess sono una formazione del Cambriano medio (513-501 Ma) che affiora nella Columbia Britannica (Canada Sudoccidentale); queste rocce si sono deposte alla base di una scogliera su un fondale fangoso, periodicamente interessato da smottamenti che travolgevano gli organismi, seppellendoli nel sedimento asfittico del fondo. La scoperta del giacimento risale al

1909, ma il reale significato dei ritrovamenti venne compreso solo negli anni '70/ '80, quando si capì che la fauna di Burgess era molto più insolita di quanto ipotizzato: questi fossili, infatti, comprendono oltre 120 specie di invertebrati marini, rappresentati da 8 phylum noti e da 10 o più phyla precedentemente sconosciuti. Molti dei resti mostravano solo una minima somiglianza con animali noti e anche organismi attribuiti a phyla attuali erano forme aberranti, come *Marrella*. Le ricerche portarono anche all'identificazione di uno dei più antichi cordati, *Pikaia*, precedentemente interpretato come un anellide. A partire dagli anni '90, molti fossili sono stati ricollocati tra i gruppi noti; è il caso di *Hallucigenia*, uno degli enigmi di Burgess: originariamente interpretato come un essere che si muoveva su due file di spine simmetriche simili a trampoli e munito di sette bocche dorsali, è stato ora rovesciato e ascritto agli onicofori. Tuttavia, molti animali restano enigmatici e l'argillite continua a fornire sorprese: ad esempio, nel 2010 è stato descritto *Herpetogaster*, un organismo che getta nuova luce sulle origini dei cordati. La diversità e la particolarità della fauna di Burgess ha provocato molte controversie tra i paleontologi riguardo la cosiddetta “esplosione del Cambriano”, un apparente evento improvviso che portò a una rapidissima diversificazione delle forme di vita nei mari.

### ***Bundenbach***

Nella Germania occidentale affiora una formazione di rocce scistose scure, ricche in materia organica, note come Scisti dello Hunsrück (Hunsrückschiefer); nei dintorni di Bundenbach e Gemünden queste rocce, risalenti al Devoniano Inferiore (408-400 Ma), contengono una straordinaria fauna marina, molto ricca e ben conservata grazie alla piritizzazione dei resti. Il giacimento si è originato in seguito a saltuari aumenti del tasso di sedimentazione legati a potenti correnti di torbida che travolgevano gli animali, soprattutto quelli bentonici; le spoglie, quindi, venivano velocemente sepolte allorché la torbida depositava sul fondo il proprio carico. Molti fossili di Bundenbach confermano questi fenomeni: per esempio le braccia delle stelle marine sono spesso tutte allungate nel verso della corrente. Sono oltre 400 le specie descritte; si tratta di organismi adattati alla vita sui fondali, sia mobili sia fissi al substrato. La maggior parte sono echinodermi (come stelle di mare e crinoidi) e molluschi (lamellibranchi, gasteropodi, cefalopodi). Abbondanti sono gli artropodi, come trilobiti e crostacei; meno numerosi, ma significativi sono alcuni invertebrati come gli cnidari, i policheti, i conularidi. Si conoscono, inoltre, una ventina di vertebrati. La presenza di primitive piante vascolari indica infine la vicinanza di terre emerse. Il processo di piritizzazione deve essere stato molto rapido dato che sono perfettamente conservate anche le parti molli, come l'apparato muscolare e digerente degli artropodi. La qualità della conservazione è tale che spesso sono rimasti intatti i più minuti dettagli, come le zampe dei trilobiti, difficili da liberare dalla matrice rocciosa che le ingloba. Fortunatamente, si ottengono ottime immagini radiografiche, in quanto gli esemplari impregnati di pirite spiccano ai raggi x sulla roccia che li racchiude, rivelando anche particolari non visibili all'osservazione diretta.

### ***Mazon Creek***

Il giacimento di Mazon Creek, nell'Illinois (USA), è una delle più note Konservat-Lagerstätten del mondo. Risale alla fine del Carbonifero medio (inizio del Pennsylvaniano, circa 318 milioni di anni fa) ed è costituito da concrezioni di siderite depositatesi in ambiente deltizio; si è formato in un ambiente anossico, in un deposito di fanghiglia sottostante una zona di acque basse, che ha permesso la fossilizzazione delle parti molli degli animali. I fossili di Mazon Creek rappresentano il più importante complesso di invertebrati a corpo molle del Paleozoico superiore e una delle più varie associazioni di vegetali terrestri del Nordamerica; sono noti da oltre un secolo, ma la maggior parte del giacimento fu scoperta in seguito all'apertura delle miniere di carbone, che si trova proprio sotto gli strati fossiliferi noti come Argilliti di Francis Creek; localmente le argilliti sono ricoperte dagli strati di Mecca Quarry, un sottile livello di argilliti nere con vertebrati marini ottimamente conser-

vati. Il giacimento di Mazon Creek possiede una fauna estremamente diversificata, composta da crostacei, insetti, artropodi, meduse, brachiopodi, molluschi bivalvi e polioplacofori, echiuridi, olosturoidi, anellidi policheti. I vertebrati sono scarsamente rappresentati da forme poco note e da una delle più antiche lamprede conosciute. Per quanto riguarda i vegetali, sono stati raccolti decine di migliaia di esemplari, appartenenti a oltre 350 specie e almeno 71 generi; numerosissimi sono i resti delle cosiddette felci con semi. Mazon Creek è anche noto per il ritrovamento di un organismo problematico, il *Tullimonstrum gregarium*, che non ha eguali in altri esemplari fossili o viventi: è costituito da un corpo segmentato, con la coda a paletta e con un'appendice anteriore mobile provvista di occhi.

### ***Trias delle Prealpi Lombarde***

Nel 1965 a Cene, nel bergamasco, una frana ha messo allo scoperto uno strato spesso pochi centimetri, ma ricchissimo di fossili. Lo strato fossilifero è racchiuso nei Calcari di Zorzino, una formazione risalente al Norico (Triassico Superiore, 216,5-203,6 Ma), in genere poco fossilifera. Questa scoperta ha poi guidato al ritrovamento di altri livelli fossiliferi nelle Prealpi Lombarde, sia all'interno del Calcare di Zorzino, sia entro una successione argillosa più recente, l'Argillite di Riva di Solto. Le faune si depositarono sul fondale di profondi bacini in periodi di forte anossia delle acque; la ridotta diversità tassonomica conferma proprio le condizioni estreme dell'ambiente nel quale vivevano. Fra gli invertebrati predominano i crostacei, come *Archaeopalinurus*, una piccola aragosta. Vi sono poi echinidi, ofiure, lamellibranchi, gasteropodi e anellidi. I fossili più spettacolari, comunque, sono i vertebrati, che comprendono grandi predatori come il celacanto *Holophagus* e pesci brucatori di coralli, come *Paralepidotus*. Di notevole interesse, anche se rari, sono i rettili, con specie acquatiche, terrestri ed aeree. Le forme marine sono rappresentate dal *Mystriosuchus*, simile ad un alligatore, e da *Psephoderma*, un placodonte corazzato. Le aree emerse costituivano invece l'habitat di rettili simili a lucertole, come il *Macrocnemus* e il *Langobardisaurus*, piccoli insettivori, e il *Drepanosaurus*, dalla curiosa coda uncinata. Nel 1973 venne portato alla luce quello che tutt'ora è considerato il più grande ritrovamento paleontologico della regione: un rettile volante con un'apertura alare di un metro, ribattezzato *Eudimorphodon ranzii*: fino ad allora si riteneva che questi esseri fossero comparsi sulla Terra soltanto nel Giurassico, 20 milioni di anni più tardi.

### ***Besano – monte San Giorgio***

Posto sul margine meridionale del Lago di Lugano, questo giacimento si estende tanto in territorio italiano (Besano) quanto in territorio elvetico (monte San Giorgio) e risale al limite Anisico-Ladinico (237 Ma fa). Scoperto alla metà del XIX secolo, il corpo fossilifero principale è costituito dagli scisti ittiolitici di Besano; si tratta di un livello di dolomie bituminose spesso pochi metri, deposte entro un profondo bacino marino, al cui fondo vi erano acque pressoché stagnanti e scarsa ossigenazione. Per periodi prolungati il fondo del mare riceveva quasi esclusivamente apporti di materia organica; si formavano così i livelli di scisti bituminosi. Di tanto in tanto, dalla circostante piattaforma carbonatica, si scaricavano nel bacino correnti di torbida, che originavano i livelli di dolomia. I fossili di Besano sono assai vari e comprendono vegetali terrestri e marini, invertebrati e soprattutto vertebrati. Fra gli invertebrati abbondano le ammoniti, molto più rari invece i resti di crostacei, echinodermi e altri invertebrati. I fossili in assoluto più numerosi sono i pesci, sia cartilaginei sia ossei, presenti in decine di specie. È tuttavia alla ricca fauna a rettili che il giacimento deve la sua fama mondiale. Sono state descritte finora oltre 20 specie di rettili, anche nuove per la scienza, comprendenti forme terrestri o semi-acquatiche e forme totalmente marine. *Tanystropheus*, lungo circa 6 m, è senza dubbio l'esemplare più curioso, a causa dell'inusuale lunghezza della coda e del collo. Un altro rettile è il *Ticinosuchus*, un carnivoro di circa 2 m simile a un cocodrillo. I rettili più frequenti nel giacimento sono però gli ittiosauri, soprattutto i primitivi *Mixosaurus*, lunghi oltre un metro. Nel 1993 è stata scoperta una femmina di ittiosauro gravida, con gli embrioni anco-

ra all'interno del tronco; è l'unico resto completo di grande ittiosauro esistente per tutto il Trias.

### **Holzmaden**

Nei pressi di Stoccarda, in Germania, affiorano delle rocce di origine marina del Toarciano (Giurassico Inferiore, 183 Ma), note in geologia come Scisti a Posidonia (Posidonienschiefer), che hanno reso celebre il villaggio di Holzmaden, i cui fossili sono noti fin dal 1598. La roccia fossilifera è una marna scistosa con un elevato contenuto in bitume e pirite, indici di un antico fondo marino scarsamente ossigenato. Tra i fossili, gli invertebrati bentonici sono abbastanza rari, mentre i bivalvi che si rinvenivano in grande abbondanza vivevano fissati ai gusci delle ammoniti o a tronchi galleggianti, così come i crinoidi. Il giacimento fornisce inoltre numerosi cefalopodi conservati in modo eccezionale, completi dei resti delle parti molli, del sacco dell'inchiostro e dei tentacoli. Oltre ad animali, i fossili comprendono i resti di alcuni vegetali continentali, come conifere ed equiseti. Sono comunque i vertebrati, spesso conservati in connessione anatomica, i reperti più spettacolari. Oltre ai pesci cartilaginei (squali) e ossei, è ai rettili che il giacimento deve la sua notorietà. Si tratta in gran parte di forme marine, come i plesiosauri e gli ittiosauri, ma non mancano forme legate all'habitat costiero, come i coccodrilli e gli sfenodonti e altre legate alle terre emerse, come i rettili volanti e un dinosauro. Il simbolo del giacimento è però l'ittiosauro *Stenopterygius*; sono noti soprattutto i resti di femmine gravide, contenenti fino a 13 embrioni, e i cosiddetti "parti fossili", ossia resti perfettamente conservati di femmine morte al momento del parto. Una peculiarità di molti vertebrati di Holzmaden è la conservazione del profilo del corpo, sotto forma di una sottile pellicola di materia organica. Questo ha permesso, fra l'altro, di ricostruire l'originale aspetto degli ittiosauri, con la tipica pinna dorsale e la pinna caudale simile a quella di uno squalo.

### **Solnhofen**

In Baviera affiora un calcare litografico di colore beige che risale al Giurassico Superiore (Tithoniano, 150,8-145,5 Ma); esso contiene alcuni orizzonti fossiliferi, forse i più famosi al mondo: i più noti sono quelli di Solnhofen e di Eichstätt. I calcari di Solnhofen si depositarono sul fondo di una laguna, chiusa dalla terraferma a nordovest e separata dal mare aperto da barriere coralline. La forte evaporazione e la scarsa circolazione con il mare aperto causarono un'elevata salinità con conseguente stagnazione e lo sviluppo di un ambiente di fondo ostile alla vita. Le oltre 600 specie presenti nei calcari di Solnhofen rappresentano vari ambienti: mare aperto, barriera corallina, laguna, ambiente terrestre; molte delle forme marine furono trascinate dal mare in tempesta nella laguna e lì morirono; gli organismi terrestri furono probabilmente trasportati dai corsi d'acqua dolce, dal vento oppure, nel caso di animali come gli pterosauri, da tempeste che li fecero precipitare nella laguna. Tra i fossili si annoverano rettili volanti, rettili marini, pesci, crostacei ed innumerevoli gruppi di altri invertebrati. Solnhofen, tuttavia, deve la propria fama soprattutto all'eccezionale conservazione degli esemplari di *Compsognathus* e *Archaeopteryx*. Il *Compsognathus* era un dinosauro carnivoro, bipede, di piccole o medie dimensioni, perfettamente adattato alla corsa, con zampe posteriori estremamente allungate e anteriori munite di artigli, collo lungo e mobile. Uno dei più antichi uccelli conosciuti, *Archaeopteryx lithographica*, si è fossilizzato in modo così perfetto che si è conservata, attorno allo scheletro, l'impronta di penne sorprendentemente simili a quelle degli uccelli attuali. Questo organismo costituisce un ideale elemento di passaggio tra rettili e uccelli: per questo nel secolo scorso divenne un esempio fondamentale per i sostenitori dell'evoluzione.

### **Pietraroja**

Pietraroja si trova in provincia di Benevento, a circa 800 m di altezza; in prossimità dell'abitato si erge il monte "Civita", composto da rocce calcaree e dolomitiche del Cretacico Inferiore (112-99,6). È qui che nel 1798 venne segnalata per la prima volta la presenza di pesci fossili da parte di Scipione Breislak, un pioniere della geologia italiana. Il giacimento venne a lungo attribuito al Giu-

rassico, fino a quando l'età dei calcari di Pietraraja venne fissata all'Albiano, grazie all'analisi dei microfossili. La fauna del giacimento consiste perlopiù di resti di vertebrati; meno numerosi sono invece i frustoli carboniosi e gli invertebrati. I fossili si presentano appiattiti sulla superficie di strato, così come avviene in altre Lagerstätten la cui roccia è costituita da calcari a grana fine. Si tratta spesso di scheletri interi, ma abbondano anche le ossa e i denti isolati, nonché i resti fecali. La frazione più abbondante della fauna è costituita sicuramente da pesci, presenti con una ventina di specie affini a forme tropicali di altri giacimenti del Mesozoico e del Cenozoico. Al contrario, i resti di vertebrati terrestri sembrano avere un carattere endemico; fino ad alcuni anni fa si conoscevano nel giacimento una sola specie di anfibio e tre di rettili, tutte forme di piccole dimensioni. L'esemplare più straordinario è senza dubbio lo *Scipionyx samniticus*, detto "Ciro", il primo fossile di dinosauro mai rinvenuto in Italia. L'unico scheletro rinvenuto apparteneva a un esemplare giovane in uno stato di conservazione eccezionale; è privo solamente dell'estremità della coda e delle zampe posteriori ed è l'unico dinosauro al mondo di cui sono visibili anche alcune parti molli, come l'intestino, con i resti dell'ultimo pasto, il fegato, la trachea, gli occhi, piccole porzioni della pelle e di fibre muscolari. Quando morì aveva poche settimane di vita e misurava una cinquantina di centimetri.

### ***Mongolia - deserto di Gobi***

Il deserto di Gobi, in Mongolia, è uno dei più ricchi e importanti giacimenti fossili del mondo, dato che la continua e progressiva erosione porta alla luce scheletri di dinosauri e di altri organismi in condizioni di conservazione ottimali, spesso anche molto completi. La sorprendente quantità di scheletri quasi intatti è spiegata con l'ipotesi di violente tempeste che hanno sepolto nel giro di poche ore l'animale; è da notare che il Gobi alla fine del Cretacico doveva già trovarsi in una situazione analoga a quella contemporanea, però dovevano essere presenti, almeno in alcune epoche, anche abbondanti luoghi acquatici. Le prime scoperte paleontologiche nel deserto di Gobi avvennero negli anni '20 del secolo scorso; da allora sono stati rinvenuti numerosi resti di mammiferi, cocodrilli, tartarughe, lucertole, pesci e soprattutto dinosauri (scheletri e uova). Questa ricca fauna vanta infatti ben cinque dei sette sottordini in cui si suddividono i dinosauri. In particolare, varie e molto interessanti sono le forme carnivore, come il *Tarbosaurus*, versione asiatica del *T-rex*. Tra i dinosauri-struzzo (*Coelurosauria*), presenti anche in America, *Gallimimus* è il genere di maggiori dimensioni, ma è presente anche il piccolo *Oviraptor*. Tra gli erbivori, infine, molto abbondanti sono i *Protoceratops* e numerosi sono i dinosauri corazzati. Uno dei ritrovamenti più clamorosi fu proprio quello di due scheletri completi di un *Velociraptor* avvinghiato in un combattimento mortale ad un *Protoceratops*. Inoltre sono venuti alla luce anche molti nidi fossili, composti di numerose uova di forma subellittica, e di alcuni cuccioli probabilmente appena usciti dall'uovo.

### ***Bolca***

Bolca, nei monti Lessini, è senza dubbio il più celebre giacimento paleontologico italiano e uno tra i più importanti al mondo fra quelli del Cenozoico (Eocene Inferiore, 54 Ma). È noto almeno dal 1555; fra i naturalisti che si occuparono di Bolca va ricordato Giovanni Arduino, precursore della geologia stratigrafica. Le rocce fossilifere, affioranti nelle località di monte Postale e della Pesciara, sono rappresentate da un complesso di calcari giallastri ben stratificati, depositatisi nell'Eocene Inferiore in una laguna poco profonda e protetta dalle correnti del mare aperto. Questi strati racchiudono oltre 240 specie di pesci e 250 di vegetali. I pesci di Bolca rappresentano un insieme unico al mondo per l'incredibile varietà di specie; si tratta di forme marine affini a quelle che vivono attualmente nelle acque calde dell'oceano Indiano e del Pacifico. Oltre ai pesci, fra i resti di vertebrati sono da segnalare parti di serpenti e piume isolate di uccelli. Nel giacimento si sono inoltre rinvenuti numerosi invertebrati, come insetti terrestri, anellidi, meduse, cefalopodi e crostacei. La flora di Bolca appartiene ad ambienti marini, di acqua dolce e terrestri e rappresenta un'associazio-

ne floristica affine a quella oggi presente nelle terre emerse e nei mari della regione indopacifica. Il perfetto stato di conservazione dei pesci e la presenza di pirite indicano un'elevata velocità di sedimentazione e a una scarsa ossigenazione delle acque del fondo. L'abbondanza dei pesci fossili, infine, fa ritenere che particolari condizioni ambientali (probabilmente fenomeni di eutrofizzazione dovuti all'improvviso proliferare del fitoplancton) causassero periodicamente la morte dell'ittiofauna. I pesci di Bolca sono presenti nelle raccolte di numerosissimi musei in ogni parte del mondo, a testimonianza dell'elevato valore scientifico di questo giacimento.

### **Messel**

Una delle più importanti Lagerstätte del Cenozoico (Eocene Medio, 50 Ma) è quella di Messel, presso Francoforte sul Meno, in Germania. Risale all'Eocene Medio ed è formata da argilliti bituminose contenenti una fauna straordinaria per conservazione e ricchezza; queste rocce si depositarono al fondo di un antico lago, ampio pochi km quadrati e profondo qualche decina di metri, circondato da una fitta foresta in cui si sviluppò una notevole biodiversità. Probabilmente la regione era geologicamente attiva e periodiche emissioni di gas avrebbero causato la morte degli animali nei pressi del lago; la tranquillità e la scarsità di ossigeno del fondale consentirono poi la perfetta fossilizzazione dei resti organici. Le rocce di Messel contengono resti vegetali e animali. Fra i primi si trova una gran varietà di pollini, spore, foglie, frutti e semi appartenenti a numerose famiglie di felci, conifere e angiosperme, che hanno fornito preziose informazioni sul paleoclima. Gli invertebrati comprendono gasteropodi, spugne, crostacei, ragni e soprattutto molti insetti, spesso con tracce della colorazione originaria. I resti più spettacolari del giacimento sono però i vertebrati, dei quali abbondano scheletri completi di individui a vari livelli di sviluppo. I più frequenti sono i pesci di acqua dolce, più rari gli anfibi; tra i rettili, splendidi sono i resti di tartarughe e coccodrilli, nonché gli scheletri articolati di diverse specie di serpenti. Comuni anche i resti di uccelli, spesso completi delle penne, del contenuto stomacale e delle parti molli. Altrettanto importanti sono i mammiferi, appartenenti a numerosi gruppi differenti: tale varietà, infatti, ci consente di ricostruire meglio la loro evoluzione. Tra di essi sono emersi alcuni esemplari perfettamente conservati di *Darwinius masillae*, un nuovo genere fossile di antico primate, tra i progenitori del genere *Homo*.

## **Dall'origine della massa alla “particella di Dio”**

*“Intendo misurare la massa dei neutrini.” “Davvero?”  
Langdon la guardò esterrefatto. “E come gliela misuri,  
con il centimetro?”  
D. BROWN*

### **Cos'è la massa?**

La risposta ad una simile domanda è meno banale di quanto si possa pensare. La massa entra fin da subito nella descrizione dei corpi come un parametro dinamico essenziale; si parla, in tal caso, di massa inerziale, ovvero una grandezza che rappresenta una misura della resistenza di un corpo alla variazione della propria velocità. Ma la massa risulta anche la sorgente del campo gravitazionale, ovvero una misura dell'attrazione di un corpo su di un altro corpo dotato di massa. La teoria della relatività ha determinato un cambiamento di prospettiva che ha ampliato il significato del concetto di massa; la massa diventa una particolare forma di energia espressa dalla ben nota relazione  $E = mc^2$ , sicché ogni forma di energia diventa sorgente del campo gravitazionale. Inoltre si



evidenza come la massa dipenda dalla velocità: la massa di un corpo cresce al crescere della sua velocità; si comincia così a parlare di massa a riposo di un corpo. Ma questa proprietà fisica diventa un parametro di troppo nel momento in cui ci si rese conto che la Natura si basa su particolari simmetrie nascoste: la massa di un corpo romperebbe queste simmetrie, diventando quel parametro che spezza l'elegante quadro naturale. Sembra dunque che nelle moderne teorie fisiche la massa non possa costituire una proprietà primaria, bensì derivi da un particolare meccanismo, tutto da scoprire.

### ***Chi è il bosone di Higgs?***

L'identità del bosone di Higgs è ben nota ai fisici: è una particella neutra, cioè senza carica elettrica, a spin nullo; in funzione della sua massa sappiamo riconoscere il suo comportamento, come si forma ed in cosa si trasforma. In realtà bisognerebbe chiedersi dov'è il bosone di Higgs; tanti lo cercano, ma nessuno lo trova. Sono diversi anni ormai che i fisici delle particelle danno la caccia al bosone di Higgs nella speranza di un segnale della sua presenza. Fino ad oggi le ricerche non hanno permesso di rivelare sperimentalmente questa particella; per il momento resta una previsione teorica del Modello Standard, frutto di un lavoro che ha animato la comunità dei fisici teorici durante i favolosi anni sessanta. In questi giorni riprenderà la propria attività sperimentale il più grande acceleratore del mondo, l'LHC del CERN di Ginevra; dopo la pausa invernale dedicata a lavori di manutenzione delle macchine, riprenderà l'attività di presa dati e i fisici impegnati nelle collaborazioni internazionali avranno molte più informazioni tra le quali cercare la firma del bosone di Higgs. Uno dei principali motivi che hanno portato alla costruzione dell'LHC è proprio la caccia a questa particella, che si lega, secondo la teoria, al meccanismo per generare la massa di tutte le altre particelle.

### ***Perché è così importante il bosone di Higgs?***

Il bosone di Higgs è importante perché costituisce l'ultimo tassello di un mosaico teorico che fino a questo momento è stato testato sperimentalmente con grande successo; il mosaico in questione è il Modello Standard. Questo modello teorico costituisce l'ossatura della Natura che ci circonda, descrivendo i mattoni fondamentali con i quali costruire tutti gli oggetti che ci circondano e le interazioni che si sviluppano fra questi piccoli blocchetti elementari. In particolare, le interazioni fondamentali della Natura vengono descritte mediante lo scambio di altre particelle, dette mediatrici, in grado di trasportare quelle informazioni che determinano l'interazione stessa fra particelle. Alcuni di questi mediatori sono dotati di massa, in particolare quelli della forza nucleare debole. Di per sé non costituirebbe un problema, ma la teoria sviluppata verso la fine degli anni '60 prevedeva una simmetria particolare tra la forza nucleare debole e quella elettromagnetica, detta simmetria elettrodebole. La simmetria tuttavia aveva una conseguenza spiacevole: i mediatori delle forze coinvolte dovevano essere privi di massa, un'apparente contraddizione con quanto suggerito dagli esperimenti. Serviva un meccanismo in grado di generare la massa dei mediatori della forza debole. Il bosone di Higgs è l'espressione di questo meccanismo, la prova che, in profondità, la Natura è caratterizzata da eleganti simmetrie nascoste.

### ***Cosa si intende per simmetria elettrodebole?***

In Natura esistono quattro forze fondamentali: la gravità, che ci tiene con i piedi ben saldi a terra e determina i movimenti di stelle e pianeti; la forza elettromagnetica, alla base di tutti i fenomeni elettrici e magnetici che ci circondano; la forza nucleare debole, responsabile dei decadimenti radioattivi; infine, la forza nucleare forte, che tiene legati i quarks all'interno dei protoni e dei neutroni. Due di queste forze hanno una radice comune che va oltre i fenomeni che osserviamo in Natura. Nei primi anni '60 venne proposto un modello teorico dove la forza elettromagnetica e quella debole erano unite, due manifestazioni di una stessa interazione di base, la cosiddetta interazione

elettrodebole. In altre parole, a livello profondo le due forze, apparentemente distinte e legate a fenomeni differenti, possono essere pensate come simmetriche, due facce di una stessa medaglia. Il fatto che ci appaiano diverse si lega ad una rottura spontanea di questa simmetria, detta simmetria elettrodebole; è fondamentale sottolineare come questa simmetria profonda della Natura sia molto importante in quanto rappresenta un'unificazione tra forze apparentemente differenti. In altre parole, una simmetria in grado di semplificare il complesso quadro dei fenomeni naturali.

### ***Cosa si intende per rottura spontanea della simmetria?***

Abbiamo parlato nella Pillole precedenti di simmetria elettrodebole e della sua rottura. La rottura spontanea della simmetria è un argomento delicato che va affrontato con un esempio. Pensiamo di essere invitati ad un matrimonio e, al momento del pranzo, di sederci ad un tavolo rotondo apparecchiato in maniera perfettamente simmetrica; le posate si trovano sia a destra che a sinistra del nostro piatto, esattamente alla stessa distanza. Una volta seduti al tavolo potremmo trovarci imbarazzati; quale posata devo prendere? Quella di sinistra o quella di destra? Siamo così chiamati a fare una scelta, una scelta che comporterà inevitabilmente una rottura della simmetria con la quale era stata apparecchiata la tavola. In Natura accade una cosa simile; il campo di Higgs che pervade tutto lo spazio descrive un sistema fisico perfettamente simmetrico, dove la forza elettromagnetica e l'interazione debole sono unite ed indistinguibili; il campo di Higgs, tuttavia, è chiamato a fare una scelta, deve scegliere lo stato di vuoto sul quale costruire i mattoni del mondo che ci circonda. Una scelta che rompe la simmetria iniziale producendo l'universo così come lo vediamo: asimmetrico, dove le forze sono separate e perfettamente distinguibili, dove le particelle acquistano massa; è il cosiddetto Meccanismo di Higgs.

### ***In cosa consiste il Meccanismo di Higgs?***

Il Meccanismo di Higgs è quel particolare processo teorico che genera la massa delle particelle del Modello Standard e quindi degli oggetti che ci circondano. Tale meccanismo prevede l'esistenza di quattro campi che permeano lo spazio circostante, i cosiddetti campi di Higgs. Ad energie sufficientemente alte i mediatori dell'interazione debole risultano privi di massa in quanto non interagiscono con questi particolari campi; tuttavia, quando l'energia scende, per esempio durante il normale processo di evoluzione del nostro Universo, i mediatori della forza debole interagiscono con i campi di Higgs, assorbendoli e acquisendo così massa. Avviene quel processo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole di cui abbiamo parlato nella puntata precedente. Quando i bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$  interagiscono con i campi di Higgs significa che tale simmetria si spezza e le due interazioni, elettromagnetica e nucleare debole, si dividono, apparendo separate come risulta dalle nostre esperienze. Tuttavia, il fotone, mediatore della forza elettromagnetica, rimane senza massa anche dopo la rottura della simmetria, il che significa che uno dei campi di Higgs sopravvive al processo, producendo il famoso bosone di Higgs.

### ***Quando fu sviluppato il Meccanismo di Higgs?***

Siamo agli inizi degli anni '60; la fisica delle particelle elementari attraversa un periodo di grande fervore: è un continuo susseguirsi di risultati teorici e di scoperte sperimentali. I fisici teorici sono impegnati nella comprensione delle interazioni fondamentali, in particolare l'interazione forte alla base dei legami interni al nucleo atomico e l'interazione debole responsabile dei decadimenti radioattivi. Le forze fondamentali della Natura vengono descritte da alcune simmetrie che caratterizzano le particelle coinvolte nell'interazione; fra il 1961 ed il 1962 vengono proposti dei modelli che descrivono l'interazione debole come mediata da bosoni privi di massa. Tuttavia, sperimentalmente, l'interazione debole dovrebbe essere mediata da particelle dotate di massa. Nei primi anni '60, di fronte a questa apparente inconsistenza, diversi fisici teorici studiarono il problema della generazione della massa connessa alla rottura spontanea della simmetria. Dopo alcuni risulta-

ti intermedi, è il 1964 l'anno di nascita del Meccanismo di Higgs. Ma Higgs non è il solo fisico teorico a raggiungere questo risultato. Infatti, nello stesso anno, Englert e Brout, due fisici belgi, ottengono il medesimo risultato. Curiosamente, i due articoli vengono pubblicati sulla stessa rivista; l'articolo di Englert e Brout viene pubblicato nell'agosto del 1964, quello di Higgs nell'ottobre dello stesso anno.

### ***Chi è Peter Higgs?***

Peter Higgs è un fisico teorico britannico, il padre del bosone che da lui prende il nome, la particella più ricercata di questi ultimi anni. Peter Higgs nasce a Bristol nel 1929; studia a Londra, dove consegue il dottorato in fisica nel 1954 presso il King's College. Dopo aver ricoperto diverse cariche presso l'University College e l'Imperial College di Londra, nel 1960 si trasferisce all'Università di Edimburgo: prima come docente di fisica matematica e poi, dal 1980, come professore di fisica teorica. Nel 1996 è andato in pensione ed è ora professore emerito dell'università dove ha ottenuto il suo più grande risultato professionale. Durante la sua carriera ha ottenuto diversi riconoscimenti importanti: nel 1983 è diventato membro della Royal Society, nel 2004 ha vinto il premio Wolf in fisica, nel 2010 il premio Sakurai. Premi prestigiosi conferiti per il suo importante risultato teorico, frutto di un lavoro che lo impegnò nei primi anni '60; Higgs fu capace di mettere insieme, in modo innovativo ed originale, i risultati che emergevano in fisica delle particelle elementari in quegli anni. Tuttavia, come ricorda lo stesso Higgs, quel risultato soffocò lo sviluppo della sua carriera: qualsiasi altro risultato sarebbe stato meno importante del processo che permetteva di rompere la simmetria elettrodebole generando la massa delle particelle elementari.

### ***Chi conìò l'espressione "particella di Dio"?***

L'espressione "particella di Dio" è spesso utilizzata per indicare il bosone di Higgs; è un'espressione particolare che mescola la religione con un problema profondo della fisica contemporanea, la generazione della massa. La massa è una proprietà piuttosto difficile da definire, la cui origine, come visto, implica concetti di fisica piuttosto complessi, legati alle simmetrie nascoste della Natura e ai processi di rottura spontanea di tali simmetrie. L'espressione trova ampio spazio nella divulgazione scientifica, proprio per il suo potere evocativo, ma nasce da un episodio che poco ha che fare con la religione. L'espressione deriva dal titolo di un libro di Leon Ledermann, premio Nobel per la fisica nel 1988; il libro è un viaggio nel mondo subatomico delle particelle elementari, alla scoperta dei costituenti elementari della materia, fino al bosone di Higgs a cui è dedicato il titolo. Tuttavia, il titolo originale era "La particella dannata", in inglese "The goddamn particle". All'editore non piacque e optò, con grande capacità commerciale, per il ben noto titolo "The God particle", togliendo semplicemente un piccolo pezzo dal titolo originale. Questo episodio infastidì Peter Higgs: pur non essendo credente, pensava che il titolo potesse inutilmente offendere la sensibilità di qualche lettore.

### ***Quando fu confermato sperimentalmente il modello elettrodebole?***

Il modello elettrodebole di Weimberg, Salam e Glashow, fondato sul meccanismo di Higgs per la rottura della simmetria tra forza elettromagnetica ed interazione debole, costitutiva, a cavallo tra anni '60 e '70, un risultato teorico molto importante. Esso evidenziava simmetrie profonde della Natura che avevano a che fare con l'unificazione delle forze fondamentali. Il meccanismo di Higgs permetteva di generare le masse dei mediatori della forza debole, i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$ . Questo portava ad una previsione teorica della loro massa. Una volta sviluppato il modello, partì la corsa alla ricerca di queste particelle. A metà anni settanta fu approvato un progetto al CERN di Ginevra per la costruzione di un nuovo acceleratore, il Super Proton-Antiproton Collider. Nel 1981 la macchina entrò in funzione: in due punti dell'anello dell'acceleratore venivano fatti urtare protoni ed antiprotoni e i fisici accumulavano dati fra i quali cercare la firma dei bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$ . I risultati attesi arriva-

rono nel 1983, confermando pienamente il modello elettrodebole; le masse misurate sperimentalmente erano in pieno accordo con le masse previste teoricamente. Un risultato eccezionale, che venne premiato con il Nobel l'anno successivo: è il 1984, è l'anno del Nobel a Carlo Rubbia.

### ***Come si può osservare sperimentalmente il bosone di Higgs?***

Dopo la scoperta dei bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  il Modello Standard delle particelle elementari ottenne altre conferme sperimentali che ne decretarono il successo; anche le ultime particelle che componevano il quadro dei costituenti elementari furono scoperte, fra gli ultimi il quark top nel 1995 e il neutrino del tau nel 2000. Il bosone di Higgs rimane così l'unica particella che manca all'appello. La sua ricerca sperimentale, tuttavia, risulta decisamente più complessa. Il bosone di Higgs è una particella instabile che decade, secondo quanto previsto dal Modello Standard, in due bosoni (per esempio due bosoni  $Z^0$  o due fotoni) o in due fermioni (per esempio due quark); in tal senso, è una particella dal comportamento piuttosto vario, caratterizzata da diversi canali di decadimento. Per poter osservare un bosone di Higgs bisogna osservare i molteplici prodotti del suo decadimento. Tuttavia, il modo in cui si trasforma è determinato dalla sua massa, che non è un parametro fissato dalla teoria. Questo complica la ricerca sperimentale perché i fisici sono costretti a sondare tutti i possibili decadimenti al variare della massa; questo comporta la necessità di accumulare una grande quantità di dati per poter essere sicuri se, per una data massa, il bosone di Higgs esiste in base al segnale previsto dalla teoria.

### ***A che punto è la ricerca del bosone di Higgs?***

La caccia al bosone di Higgs dura ormai da diversi anni e diversi sono stati gli esperimenti che hanno cercato segnali della presenza di questa fondamentale particella. Gli esperimenti del LEP, l'acceleratore che ha preceduto l'LHC al CERN di Ginevra, hanno permesso di confermare molte delle previsioni del Modello Standard, ma il bosone di Higgs non è stata una di queste; i dati accumulati dai vari esperimenti fino al 2000, anno della chiusura di questo acceleratore, hanno permesso solo di fissare un limite inferiore della massa del bosone di Higgs: se tale particella esiste deve avere una massa di almeno  $114,3 \text{ GeV}/c^2$ . Anche il Tevatron, il grande acceleratore statunitense, ha contribuito in questi ultimi anni alla ricerca del bosone più famoso della fisica contemporanea, ma anche in questo caso i risultati non sono stati positivi. Dall'analisi dei dati accumulati in questi anni, i ricercatori che lavorano al Tevatron hanno escluso che il bosone di Higgs possa avere una massa tra i 160 ed i 170  $\text{GeV}/c^2$ . L'LHC, l'acceleratore del CERN di Ginevra, lavora accumulando dati, in attesa di analisi che permettano di fornire qualche nuova informazione sul bosone di Higgs. L'LHC lavorerà sicuramente per altri due anni e rimarrà solo nella caccia all'Higgs; il Tevatron, infatti, andrà in pensione alla fine del 2011.

## **Le costanti fisiche**

*“Milioni di persone hanno visto che la mela cadeva, ma solo Newton si è chiesto perché”.*

*B. M. BARUCH*

### ***Introduzione***

Nelle prossime dodici puntate parlerò delle costanti fisiche, ovvero di quelle quantità che spesso si incontrano all'interno delle formule che descrivono i fenomeni naturali. Le più famose, e

anche le prime costanti utilizzate, sono di origine naturale, ovvero sembrano intrinseche alla natura, sembrano cioè farne parte intimamente e scaturiscono in maniera logica dalle misure sperimentali. Altre costanti, invece, sono nate dalla convenzione tra scienziati, ovvero sono quantità che emergono come risultato di operazioni tra le costanti sopracitate. Siano esse costanti naturali o derivate dalle convenzioni, qualcuna sembra non essere poi così costante, avendo gli studiosi trovato e provato che il loro valore è cambiato dal Big Bang ad oggi. Ovviamente, le variazioni sono così piccole che possiamo considerare il loro valore approssimato, senza che ci siano gravi conseguenze per gli sviluppi delle teorie o delle previsioni sperimentali.

### ***Cos'è la costante di gravitazione universale G?***

La costante di gravitazione universale è la costante di proporzionalità che appare nella legge di gravitazione universale, formulata verso la fine del 1600 da Newton ed esprimibile come  $F = G \cdot (M \cdot m) / r^2$ . La costante di gravitazione universale è una costante della natura, indipendente da qualunque proprietà fisica dei corpi che interagiscono. Il suo valore, determinato teoricamente e validato per via sperimentale è, nel sistema internazionale, pari a  $6,67428 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ . Il valore di questa costante fu misurato per la prima volta dal fisico inglese Henry Cavendish nel 1798, per mezzo di una bilancia di torsione. Dal punto di vista operativo, essa si può definire come l'intensità della forza di interazione tra due corpi sferici, ciascuno di massa pari a 1 kg e posti a distanza di 1 m l'uno dall'altro. La costante G è una grandezza fisica di difficile misura sperimentale, dato che la gravità è una forza molto più debole delle altre interazioni fondamentali e nessun apparato strumentale può essere schermato dall'interazione gravitazionale con l'ambiente circostante. Nel Modello Standard l'interazione gravitazionale è una delle quattro interazioni fondamentali il cui mediatore è il gravitone. L'interazione gravitazionale è responsabile dell'interazione tra oggetti dotati di massa, sorgenti del campo stesso.

### ***Cos'è l'accelerazione gravitazionale g?***

L'accelerazione di gravità è l'accelerazione che un corpo subisce quando è lasciato libero di muoversi in un campo gravitazionale. L'accelerazione di gravità g prodotta dal campo gravitazionale terrestre nei pressi della superficie del pianeta è spesso usata come unità di misura non-SI (Sistema Internazionale) ed è stata posta uguale al valore convenzionale di  $9,80665 \text{ m/s}^2$  dalla terza Conferenza Generale Pesi e Misure nel 1901. Il simbolo è scritto g minuscolo per distinguerlo dalla costante gravitazionale G che compare nelle equazioni di Newton. Il valore convenzionale di g è un valore medio assunto convenzionalmente che approssima il valore dell'accelerazione di gravità prodotta, al livello del mare ad una latitudine di  $45,5^\circ$ , dalla Terra su un grave lasciato in caduta libera. Tale valore viene a volte rappresentato con  $g_0$  quando g viene invece usato per rappresentare l'effettiva accelerazione di gravità locale. L'effettiva accelerazione che la Terra produce su un corpo in caduta varia al variare del luogo in cui questa è misurata. Il valore dell'accelerazione aumenta con la latitudine per due ragioni: 1) la rotazione della Terra, che produce una forza centrifuga che si oppone all'attrazione gravitazionale; questo effetto da solo fa sì che l'accelerazione di gravità sia  $9,823 \text{ m/s}^2$  ai poli e  $9,789 \text{ m/s}^2$  all'equatore; 2) lo schiacciamento della Terra ai poli, che allontana ulteriormente dal centro della Terra ogni corpo che si trova alle basse latitudini facendo sì che la forza di gravità che agisce su di esso sia leggermente inferiore, dato che è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i baricentri del corpo e della Terra. La combinazione di questi due effetti rende il valore di g misurato ai poli circa lo 0,5% più grande di quello misurato all'equatore.

### ***Cos'è la costante di Plank h?***

In meccanica quantistica, la costante di Planck, anche detta quanto d'azione e indicata con h, è una costante fisica il cui valore è equivalente alla quantità d'azione fondamentale (azione = quantità pari al prodotto energia\*tempo). Ha le dimensioni di un'energia per un tempo e, nel sistema di

unità di misura delle unità atomiche, rappresenta l'unità di misura del momento angolare. La costante di Planck permette la quantizzazione di grandezze come l'energia, la quantità di moto e il momento angolare, e la sua scoperta ha avuto un ruolo determinante per la nascita e la successiva evoluzione della meccanica quantistica. La costante prende il nome da Max Planck, che la introdusse in seguito agli studi sullo spettro della radiazione di corpo nero. Il valore della costante è pari a  $6,62606896 \cdot 10^{-34}$  Js. La costante di Planck, insieme alla carica dell'elettrone e alla velocità della luce, è una delle costanti fondamentali con le quali si definisce la costante di struttura fine, detta anche costante di Sommerfeld.

### ***Cos'è la costante di struttura fine $\alpha$ ?***

La costante di struttura fine, indicata con la lettera greca  $\alpha$ , è un parametro che mette in relazione le principali costanti fisiche dell'elettromagnetismo. Essa esprime la costante di accoppiamento che caratterizza l'intensità dell'interazione elettromagnetica. La costante di struttura fine è stata introdotta da Arnold Sommerfeld nel 1916 come misura della deviazione relativistica nelle linee spettrali rispetto al modello di Bohr. Per questo è anche chiamata costante di Sommerfeld. Il suo valore è pari a  $7,2973525376 \cdot 10^{-3}$ . Poco dopo che i calcoli del valore erano terminati, si scoprì un piccolo errore nell'impostazione dei dati, ma si decise ugualmente di pubblicare questo risultato nel 2008, in attesa di più precise misure attese per l'inizio del 2011. Anche se il valore di  $\alpha$  può essere dedotto dal valore delle costanti che compaiono nella sua formulazione matematica, l'elettrodinamica quantistica (QED) permette di misurare direttamente il suo valore attraverso l'effetto Hall quantistico o il momento magnetico dell'elettrone. La QED prevede una relazione tra il rapporto giromagnetico dell'elettrone, o il fattore di Landé, e la costante di struttura fine  $\alpha$ . Essendo adimensionale,  $\alpha$  ha un'importanza fondamentale nella fisica teorica. L'esistenza stessa di questa costante viene interpretata da alcuni scienziati come un indizio dell'incompletezza del nostro sistema teorico attuale. Le costanti non adimensionali sono difatti associate a convenzioni nelle unità di misura e dipendono dalla scelta delle stesse. Una costante adimensionale, al contrario, è indipendente dall'unità di misura e appare come un fattore arbitrario in una teoria. La costante di struttura fine ha una grande importanza nella teoria filosofico-scientifica del principio antropico; difatti, questo parametro adimensionale ha un'influenza fondamentale sull'universo. Se il suo valore fosse diverso anche di poco (circa il 10-20%) dal valore noto, l'universo sarebbe diverso da come lo vediamo e le leggi fisiche non sarebbero come le conosciamo.

### ***Cos'è la costante di Faraday $F$ ?***

In fisica e chimica, la costante di Faraday è la quantità di carica elettrica di una mole di elettroni. È indicata con  $F$  ed è pari a  $F = NA \cdot q$ , dove  $NA$  è il numero di Avogadro (all'incirca  $6,022 \cdot 10^{23}$ ) e  $q$  è la carica di un elettrone (all'incirca  $-1,602 \cdot 10^{-19}$  C). Inoltre, la costante è usata come unità di misura della carica elettrica, con il nome di faraday (che non deve essere confuso con il farad). Il faraday non è più in uso ed è stato rimpiazzato dall'unità di misura Sistema Internazionale di carica elettrica, il coulomb; un faraday equivale a circa 96.485,3415 coulomb. Il valore di  $F$  venne determinato per la prima volta pesando la quantità di argento depositata da una reazione elettrochimica nella quale una corrente elettrica nota venne stata fatta fluire per un determinato periodo di tempo. Questo valore venne usato per calcolare il numero di Avogadro. La ricerca continua, per cercare modi più accurati di determinare  $F$  e, di conseguenza,  $NA$ . Ci sono progetti per usare questo valore per ridefinire il chilogrammo in termini di un numero conosciuto di atomi. Il suo valore è pari a 96.485,30929 C/mol. La costante di Faraday prende il suo nome in onore dello scienziato britannico Michael Faraday.

### ***Cos'è la costante di Stefan $\sigma$ ?***

La costante di Stefan-Boltzmann (o costante di Stefan) è una costante fisica denotata con la

lettera greca  $\sigma$ , che rappresenta la costante di proporzionalità nella legge di Stefan-Boltzmann: l'energia radiata per unità di superficie di un corpo nero nell'unità di tempo è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta. Il valore di  $\sigma$  è  $5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ . Per essere più precisi, in fisica per corpo nero si intende un corpo che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente, un corpo di un certo colore lo è perché riflette parte della luce che lo colpisce. I "corpi bianchi", invece, riflettono buona parte della radiazione che li colpisce, ma ne assorbono sempre una parte. Le caratteristiche di un corpo in emissione sono strettamente correlate con le caratteristiche in assorbimento per cui un corpo nero, assorbitore ideale, è anche a sua volta un emettitore ideale. Per rendere conto della realtà nella legge di Stefan-Boltzmann si usa moltiplicare la costante  $\sigma$  per l'emissività  $\epsilon$ , che dipende dalla superficie del corpo preso in considerazione, oltre che dalla sua temperatura ed è compresa fra 0 (per i corpi idealmente bianchi) e 1 (per i corpi idealmente neri). I corpi reali vengono anche chiamati corpi grigi.

### ***Cos'è la costante dei gas ideali R?***

La costante dei gas (o costante universale dei gas), simboleggiata dalla lettera R, è una costante che mette in relazione la pressione P, la temperatura T, il volume V e il numero di moli n di un gas, secondo l'equazione  $PV = nRT$ , nota come equazione di stato dei gas perfetti, in quanto riferita ad un ipotetico gas ideale, composto da sole particelle puntiformi prive di interazioni attrattive o repulsive tra loro. R rappresenta il lavoro che una mole di gas compie quando si espande alla pressione P costante di un'atmosfera in seguito all'aumento di temperatura pari a 1 Kelvin. Dall'equazione di stato, mantenendo costanti la temperatura, la pressione o il volume si ottengono le equazioni empiriche sviluppate da Boyle, Charles e Gay-Lussac. Il valore di R è pari a  $8,314472 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ . Dalla costante R si ricava la costante dei gas specifica R(barrato) sia per un gas che per una miscela ed è data dalla costante universale dei gas divisa per la massa atomica del gas o della miscela di gas,  $R(\text{barrato}) = R/M$ . È comune rappresentare la costante dei gas specifica con il simbolo R e non R (barrato). In questi casi il contesto o le unità di misura di R dovrebbero chiarire a quale delle sue costanti si faccia riferimento. Per esempio, l'equazione della velocità del suono in un gas è usualmente scritta in termini della costante specifica. La costante specifica per l'aria secca è  $287,05 \text{ J}/(\text{kgK})$ .

### ***Cos'è la costante di Coulomb k?***

Fino alla metà del XVIII secolo, erano noti solo gli aspetti qualitativi della forza elettrica: gli scienziati, quindi, iniziarono a studiarne anche le proprietà quantitative, così che si fece strada l'idea di una somiglianza con la forza di gravità, ovvero una proporzionalità inversa con il quadrato della distanza. Tra il 1777 e il 1785 fu Charles Augustin de Coulomb a provare sperimentalmente che effettivamente la forza elettrica era proporzionale all'inverso del quadrato della distanza. Questo è stato il primo tentativo di capire il funzionamento della forza elettrica. In fisica, la forza di Coulomb è la forza esercitata dal campo elettrico. Essa agisce su oggetti elettricamente carichi ed è operativamente definita dalla legge di Coulomb, la quale esprime quantitativamente l'interazione tra due cariche elettriche puntiformi e ferme nel vuoto. Considerando  $q_1$  e  $q_2$  come cariche puntiformi interagenti nelle posizioni  $r_1$  e  $r_2$ , la forza elettrostatica esercitata da una particella carica  $q_2$  su una carica  $q_1$  vale  $F = k \cdot (q_1 \cdot q_2) / r_{12}^2$ , dove k è la costante di Coulomb pari a  $8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ . La costante di Coulomb K dipende a sua volta da un'altra costante, la costante dielettrica del vuoto  $\epsilon_0$ , secondo la relazione  $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$ .

### ***Cos'è il numero di Reynolds?***

Il numero di Reynolds (Re) è un numero adimensionale usato in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive. Il numero di Reynolds permette di valutare se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare (in corrispondenza del quale si hanno

valori più bassi del numero di Reynolds) o turbolento (in corrispondenza del quale si hanno valori più elevati del numero di Reynolds). Tale passaggio tra regime laminare e regime turbolento può essere previsto sfruttando il diagramma di Moody, con il quale può essere calcolato il coefficiente di attrito viscoso a partire dai valori del numero di Reynolds e della scabrezza relativa. I valori del numero di Reynolds sono da considerarsi "bassi" o "elevati" relativamente ad uno specifico sistema, in cui siano fissate la geometria del corpo investito dal flusso, la natura del fluido e le condizioni operative alle quali avviene l'esperienza. Viene quindi definito numero di Reynolds critico il valore del numero di Reynolds in corrispondenza del quale si ha il passaggio da regime laminare a regime turbolento. Fu il fisico ed ingegnere inglese Osborne Reynolds, nel 1883, ad eseguire per la prima volta in modo sistematico esperimenti sul flusso all'interno di tubi a sezione circolare, osservando che, combinando la velocità media  $U$ , il diametro del tubo  $d$ , e la viscosità cinematica  $\nu$ , in un fattore adimensionale (in seguito chiamato appunto numero di Reynolds) definito come  $Re = Ud/\nu$ , si poteva descrivere la dinamica del flusso. Al variare del fattore, Reynolds individuò così tre differenti tipologie di flusso: per  $Re < 2.000$  si ha un regime stazionario e laminare, per  $2.000 < Re < 10.000$  si ha un regime di transizione e per  $Re > 10.000$  si ha un regime turbolento.

### ***Cos'è la costante di Rydberg $R_M$ ?***

La costante di Rydberg, così chiamata in onore del fisico Johannes Rydberg, è una costante fisica presente nella formula di Rydberg. È stata scoperta nella misura dello spettro visibile dell'idrogeno e costruita sui risultati di Anders Jonas Angstrom e Johann Jakob Balmer. La costante di Rydberg rappresenta il valore del massimo numero d'onda del fotone che può essere emesso da un atomo di idrogeno o, alternativamente, il numero d'onda del fotone con la minima energia richiesta per ionizzare tale atomo. Questa è una delle costanti fisiche determinate con maggior precisione, con una incertezza sperimentale relativa minore di 7 parti per trilione. La possibilità di una sua misura diretta conferma la precisione dei valori delle altre costanti che la definiscono e viene usata nella verifica sperimentale di alcune teorie come l'elettrodinamica quantistica. Ogni elemento chimico ha la sua costante di Rydberg. Per tutti gli atomi simili all'idrogeno (ossia quelli con un solo elettrone sull'orbita più esterna) la costante di Rydberg  $R_M$  può essere derivata dalla costante di Rydberg "all'infinito", come segue:  $R_M = R_\infty / (1 + m_e/M)$ , con  $M$  massa atomica dell'atomo e  $m_e$  massa dell'elettrone. La costante di Rydberg all'infinito, che è la vera costante di partenza, vale  $1,0973731568525 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ .

### ***Cos'è la permeabilità magnetica nel vuoto $\mu_0$ ?***

La permeabilità magnetica, solitamente indicata con la lettera greca  $\mu$ , è una grandezza fisica che esprime l'attitudine di una sostanza a lasciarsi magnetizzare. La permeabilità magnetica si misura in henry al metro (H/m), equivalente a newton all'ampere quadrato (N/A<sup>2</sup>). Quasi tutti i mezzi omogenei hanno permeabilità magnetica costante, ma per alcune sostanze (come ferro, cobalto, nichel) essa ha un comportamento che manifesta una più o meno marcata isteresi, ovvero dipendenza dalle precedenti magnetizzazioni e smagnetizzazioni subite da tali materiali. Le sostanze in cui  $\mu$  ha tale comportamento sono dette ferromagnetiche. Le sostanze con  $\mu$  costante (non ferromagnetiche) si dividono in diamagnetiche ( $\mu < \mu_0$ ) e paramagnetiche ( $\mu > \mu_0$ ), ma comunque il loro valore di permeabilità magnetica differisce dall'unità solo di qualche ppm, a differenza di quanto avviene con il valore della permittività elettrica, il quale può differire di molto da quello nel vuoto e cambia sostanza per sostanza, assumendo però sempre valori maggiori rispetto a quello nel vuoto. La permeabilità magnetica del vuoto si indica con  $\mu_0$  ed è una delle costanti fisiche fondamentali; il suo valore è pari a  $\mu_0 = 1,25663706144 \times 10^{-6} \text{ [H/m]}$ . Un altro modo per esprimere la permeabilità magnetica del vuoto è tramite la permittività elettrica del vuoto (in passato costante dielettrica del vuoto).



### ***Cos'è la costante dielettrica del vuoto $\epsilon_0$ ?***

Nel Sistema Internazionale, la permittività elettrica o costante dielettrica è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico; misura cioè la predisposizione di un materiale a trasmettere il campo. Tale grandezza è determinata dalla capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo e quindi ridurre il campo elettrico totale nel materiale. La permittività elettrica è data dal prodotto tra la permittività relativa  $\epsilon_r$ , numero adimensionale generalmente maggiore di 1 e la permittività elettrica nel vuoto  $\epsilon_0$ , e quest'ultima è una costante che vale  $8,8541878176 \cdot 10^{-12}$  F/m. Maggiore è la costante dielettrica di un mezzo, più esso presenterà caratteristiche isolanti, dato che, se si collocano due corpi di carica opposta alle estremità di una barretta di materiale dielettrico (quindi con costante dielettrica alta) insorge un campo elettrico lungo la barretta, dando così una forza (legge di Coulomb) bassa; al contrario, se tra le due cariche viene posto un materiale conduttore (quindi con costante dielettrica bassa), la carica fluisce attraverso di esso e il campo elettrico si annulla dopo pochi istanti, dando così una forza (legge di Coulomb) alta. Occorre ricordare che i materiali isolanti vengono anche chiamati dielettrici. In chimica, particolarmente importante risulta la valutazione della costante dielettrica che caratterizza un dato solvente, in quanto questa grandezza permette di stabilire quale solvente sia più opportuno per portare in soluzione un dato soluto. Ad esempio, l'acqua possiede costante dielettrica relativa molto elevata (78,5) ed è perciò in grado di solubilizzare i composti ionici o fortemente polari. Di contro, il benzene, con valore della costante dielettrica relativa 2,30, risulta un solvente molto utile per ottenere soluzioni di composti organici poco polari (o apolari) e non idrosolubili.

## **La Luna**

*“Un piccolo passo per un uomo, un balzo gigantesco per l'umanità”.*

*N. ARMSTRONG*

### ***Introduzione***

La Luna è l'unico satellite naturale della Terra. Nei tempi antichi non erano rare le culture, prevalentemente nomadi, che ritenevano che la Luna morisse ogni notte, scendendo nel mondo delle ombre; altre culture pensavano che la Luna inseguisse il Sole (o viceversa). Ai tempi di Pitagora, come enunciava la scuola pitagorica, veniva considerata un pianeta. Durante il Medioevo alcuni credevano che la Luna fosse una sfera perfettamente liscia come sosteneva la teoria aristotelica, ed altri che vi si trovassero oceani (a tutt'oggi il termine mare è impiegato per designare le regioni più scure della superficie lunare). Quando, nel 1609, Galileo puntò il suo telescopio sulla Luna scoprì che la sua superficie non era liscia, bensì corrugata e composta da vallate, monti alti migliaia di metri e crateri. Da quel momento si comprese che esso era un corpo solido proprio come la Terra. Ancora nel 1920 si pensava che la Luna potesse avere un'atmosfera respirabile. Nel 1969, Neil Armstrong e Buzz Aldrin furono i primi uomini a camminare sulla Luna. Successivamente saranno soltanto altri 10 uomini a camminare sulla Luna.

### ***Generalità***

La Luna possiede una massa pari ad 1/81 circa di quella terrestre ed un raggio medio di 1.738 km. La sua densità è di 3,3 kg/dm<sup>3</sup> contro i 5,5 kg/dm<sup>3</sup> della Terra. La forza di gravità è 1/6 di quella terrestre. La superficie lunare presenta grandi distese scure chiamate mari. I rilievi, visti dalla

Terra, si presentano invece più luminosi e sono costituiti da catene montuose e dai bordi rialzati di crateri (alcuni vulcanici, altri da impatto meteorico). Sulla superficie lunare si notano inoltre dei solchi che possono arrivare a parecchie decine di km di lunghezza e a profondità fino a 500 m. La loro origine è incerta (fessure dovute all'antico raffreddamento ed alla relativa contrazione della crosta; canali scavati dalla lava; fratture legate ai movimenti successivi della crosta lunare). Sulla Luna è assente sia l'acqua che l'atmosfera, poiché la piccola velocità di fuga caratteristica della Luna ha permesso a queste molecole di perdersi nello spazio, vincendo la gravità. L'assenza di acqua ed atmosfera ha impedito che la superficie lunare subisse fenomeni erosivi paragonabili a quelli terrestri, in tal modo la crosta lunare conserva praticamente intatto l'aspetto fortemente craterizzato prodottosi miliardi di anni or sono al momento della sua formazione. L'assenza di atmosfera fa inoltre sì che non si abbiano fenomeni crepuscolari.

### ***Moto di rotazione e sistema Terra-Luna***

La Luna ruota attorno al proprio asse da Ovest ad Est in circa 27 giorni terrestri (un giorno lunare dura 27 giorni terrestri). Il periodo di oscurità e quello di luce sono quindi molto lunghi. Se a ciò si aggiunge l'assenza di atmosfera, di nubi, acqua e copertura vegetale si comprende come l'escursione termica sia molto elevata. La temperatura diurna può infatti raggiungere un centinaio di °C, mentre di notte si può arrivare a 150 °C sotto zero. In prima approssimazione la Luna percorre un'orbita ellittica intorno alla Terra, in senso antiorario se osservata dal polo nord celeste. La Terra occupa naturalmente uno dei due fuochi dell'ellisse. Il punto di minima distanza Terra-Luna è detto perigeo (da centro a centro 356.410 km), mentre il punto di massima distanza prende il nome di apogeo (da centro a centro 406.697 km). La massa della Luna non è del tutto trascurabile rispetto alla massa della Terra ed è quindi solo una grossolana approssimazione affermare che la Luna ruota intorno alla Terra. Più correttamente, entrambe ruotano intorno ad un baricentro comune che si trova all'interno della Terra, circa 1.700 km sotto la sua superficie. Per questo motivo Terra e Luna possono essere considerate un sistema gravitazionale doppio.

### ***Moto di rivoluzione e fasi lunari***

Il piano dell'orbita lunare non coincide perfettamente con il piano dell'orbita terrestre o eclittica (sul quale giace anche il Sole), ma è inclinato rispetto ad esso di circa 5°. Il moto di rivoluzione lunare fa sì che essa cambi continuamente la sua posizione relativa rispetto al Sole ed alla Terra. Si individuano usualmente 4 posizioni fondamentali: a) congiunzione: la Luna si trova tra il Sole e la Terra e noi osserviamo la metà non illuminata della Luna. La fase lunare è detta di Luna nuova o novilunio. Durante il novilunio la Luna sorge, culmina e tramonta con il Sole. b) opposizione: la Terra si trova tra la Luna ed il Sole e noi osserviamo la metà illuminata della Luna. La fase lunare è detta di Luna piena o plenilunio. Durante il plenilunio la Luna sorge quando tramonta il Sole, culmina a mezzanotte e tramonta al sorgere del Sole. c) quadrature: sono le due posizioni intermedie tra congiunzione ed opposizione. Luna, Terra e Sole formano i vertici di un triangolo rettangolo. Le posizioni di congiunzione ed opposizione prendono il nome di sizigie o sigizie. Naturalmente, in ognuna di queste posizioni è possibile osservare la Luna diversamente illuminata dal Sole. Le diverse condizioni di illuminazione osservabili dalla Terra sono dette fasi lunari. Quando la Luna si trova nelle due quadrature l'emisfero lunare che noi osserviamo risulta per metà illuminato e per metà oscuro. Le due fasi lunari sono dette primo quarto e ultimo quarto. Dalla fase di novilunio a quella di plenilunio si ha Luna crescente. Nella fase contraria si ha Luna calante.

### ***Mese sidereo e Mese sinodico***

Il tempo necessario affinché la Luna compia una rivoluzione completa di 360° intorno alla Terra, ritornando nella stessa posizione rispetto ad una stella fissa, è detto mese sidereo. Esso ha una durata di circa 27,32 giorni terrestri. La Luna ruota intorno al suo asse impiegando lo stesso

tempo che impiega a compiere una rivoluzione intorno alla Terra. La conseguenza di tale curiosa coincidenza è che la Luna rivolge sempre la stessa faccia alla Terra. L'emisfero nascosto della Luna si presenta più ricco di crateri di piccole dimensioni, mentre sono praticamente assenti i grandi mari che caratterizzano l'emisfero rivolto verso la Terra. Quest'ultimo, a causa dell'attrazione gravitazionale terrestre, risulta inoltre leggermente più protuberante. Il mese sinodico o lunazione è il tempo necessario affinché la Luna raggiunga nuovamente una fase lunare dello stesso segno. Ad esempio, l'intervallo di tempo tra due Lune piene consecutive. In altre parole il mese sinodico rappresenta il tempo necessario perché la Luna raggiunga nuovamente la stessa posizione relativa rispetto al Sole ed alla Terra. Il mese sinodico dura circa 29,53 giorni terrestri. Poiché il mese sinodico dura 29,53 giorni, un anno non contiene un numero intero di lunazioni. In un anno giuliano si possono susseguire 12 lunazioni complete con l'avanzo di circa 11 giorni; di conseguenza, le fasi lunari non si ripetono ogni anno alla stessa data, ma solo ogni 235 lunazioni, corrispondenti a circa 19 anni tropici. Tale ciclo è detto ciclo aureo o di Metone (astronomo greco del V sec. a. C.).

### ***La Luna e le maree***

A causa del suo moto di rivoluzione intorno alla Terra, la Luna non sorge, culmina e tramonta sempre alla stessa ora tutti i giorni, ma con circa 50 minuti di ritardo ogni giorno. In altre parole la Terra completa una rotazione intorno al suo asse rispetto alla Luna in 24 h e 50 m circa (giorno lunare). La Luna è la principale responsabile (assieme al Sole) dei fenomeni mareali che interessano l'idrosfera. Questa, pensata per semplicità come un guscio sferico di spessore uniforme, si deforma sotto l'azione della Luna assumendo la forma di un ellissoide di rotazione avente l'asse maggiore orientato lungo la direzione Terra-Luna. In tal modo, osservando il sistema Terra-Luna dal polo nord celeste, possiamo individuare 2 zone di alta marea in corrispondenza dei punti in cui la Luna è allo zenit e al nadir e due zone di bassa marea nei punti intermedi, dove la Luna appare sull'orizzonte, in procinto di sorgere o di tramontare. L'asse maggiore dell'ellissoide di marea tende a rimanere sempre allineato con la Luna, cosicché la Terra compie una rotazione rispetto ad esso in un giorno lunare (24 h 50 m). In altre parole, basse ed alte maree si alternano ogni quarto di giorno lunare (6 h 12,5 m).

### ***Mese draconico, retrogradazione dei nodi ed eclissi***

Essendo l'orbita lunare inclinata di circa 5° rispetto all'eclittica, la Luna compie metà del suo percorso di rivoluzione sopra il piano dell'eclittica e metà sotto. I due punti di intersezione, in cui la Luna attraversa il piano dell'eclittica, sono detti nodi e la linea che li congiunge è detta linea dei nodi. La linea dei nodi rappresenta l'intersezione tra il piano dell'eclittica ed il piano dell'orbita lunare. La Luna compirà un'orbita rispetto ad un nodo in un intervallo di tempo che è detto mese draconico o draconico pari a 27 d 5 h 5 m 35,8 s. La regressione della linea dei nodi porta periodicamente questi ultimi ad occupare le posizioni di sizigie. Quando ciò avviene, si producono le condizioni necessarie al manifestarsi del fenomeno delle eclissi. Infatti, quando la Luna si trova contemporaneamente in sizigie e in uno dei due nodi, Luna, Sole e Terra si trovano ad essere allineati. Nel caso l'allineamento sia perfetto si parla di eclissi totali, nel caso ciò non avvenga e la Luna in sizigie si trovi solo nelle vicinanze di un nodo si possono produrre eclissi parziali. In realtà l'eclisse è un fenomeno per cui un astro entra nel cono d'ombra di un altro. Sono dunque propriamente eclissi solo quelle di Luna, mentre le eclissi di sole sono in effetti occultazioni (per cui un astro passa davanti ad un altro e lo occultata).

### ***Eclissi di Luna***

Quando la Luna si trova in opposizione e in un nodo essa è destinata a scomparire completamente nel cono d'ombra della Terra. Naturalmente, durante le eclissi, la Luna si trova sempre in plenilunio. Quando la Luna attraversa il cono d'ombra, l'eclisse è visibile da tutto l'emisfero terre-

stre notturno. Poiché l'ombra della Terra è quasi 3 volte più grande della Luna, un'eclissi totale di Luna può durare oltre 100 minuti. Affinché si produca un'eclissi di Luna è necessario che la Luna ed un nodo si trovino contemporaneamente in opposizione. Se la linea dei nodi fosse ferma rispetto alle stelle fisse, i nodi si verrebbero a trovare in opposizione ogni sei mesi (alternativamente il nodo ascendente e discendente) e potrebbero pertanto verificarsi non più di due eclissi lunari all'anno. Poiché la linea dei nodi si muove di moto retrogrado di circa  $20^\circ$  all'anno, i nodi si presentano in opposizione con periodicità leggermente inferiore ai 6 mesi e, quindi, a volte possono presentarsi le condizioni per eclissi lunari anche tre volte all'anno.

### ***Eclissi di Sole (occultazione)***

L'eclissi o occultazione solare si produce ogniqualvolta la Luna ed un nodo si trovano in congiunzione. La Luna è in grado di oscurare il Sole in quanto possiede lo stesso diametro apparente della nostra stella. Nel caso però in cui la Luna si trovi in apogeo e la Terra in perielio, il diametro apparente del Sole risulta maggiore di quello lunare e si producono le cosiddette eclissi anulari, in cui un anello luminoso del disco solare compare dietro al bordo lunare. Essendo il cono d'ombra della Luna molto meno esteso di quello terrestre, le eclissi solari sono visibili solo in una stretta area ampia da 200 a 300 km che si sposta da ovest verso est per migliaia di chilometri, attorniata da una vasta zona di penombra. Per un osservatore che si trovi a percorrere il diametro di tale zona oscura l'eclisse può durare fino a 7 m 30 s. A differenza delle eclissi lunari, le eclissi solari possono verificarsi ai due passaggi consecutivi della Luna in prossimità di un nodo in congiunzione. Per questo motivo si possono avere fino ad un massimo di 5 eclissi di Sole all'anno. In un anno si verificano un minimo di due eclissi (entrambe di Sole) ed un massimo di 7 (5 di Sole e due di Luna; eccezionalmente 4 di Sole e 3 di Luna). Le eclissi solari sono dunque in assoluto più frequenti, ma relativamente ad un osservatore particolare risultano più frequenti le eclissi di Luna, in quanto visibili sempre da tutti gli osservatori dell'emisfero notturno.

### ***Librazioni***

Si è detto che poiché la rotazione e la rivoluzione lunare hanno la stessa durata di circa 27 giorni, la Luna rivolge sempre la stessa faccia alla Terra. In realtà noi possiamo vedere circa il 59% della superficie lunare. Ciò è dovuto ad oscillazioni periodiche della Luna, dette librazioni. Le librazioni si distinguono in vere e apparenti. Le librazioni vere o fisiche sono dovute all'attrazione che la Terra esercita sul rigonfiamento equatoriale della Luna e ad irregolarità nel moto di rotazione lunare. Le librazioni apparenti o geometriche si possono suddividere in: librazioni in longitudine - dovute al fatto che, mentre il moto di rotazione della Luna avviene a velocità costante, in modo regolare ed uniforme, il moto di rivoluzione è più veloce in perigeo e più lento in apogeo. In tal modo noi possiamo scorgere di volta in volta una piccola fetta di superficie lunare normalmente non visibile, alternativamente ad est e ad ovest ( $\pm 7,5^\circ$ ); librazioni in latitudine - dovute al fatto che l'asse di rotazione lunare è inclinato di  $6^\circ 41'$  rispetto alla perpendicolare all'orbita della Luna. Poiché l'asse mantiene costante la sua orientazione rispetto alle stelle fisse (come avviene anche per l'asse terrestre), durante il suo moto di rivoluzione la Luna ci mostra alternativamente il suo polo nord ed il suo polo sud ( $\pm 6,7^\circ$ ); librazioni parallattiche o diurne - dovute al fatto che la distanza Terra-Luna non è trascurabile rispetto alle dimensioni della Terra. Osservando la Luna quando sorge e tramonta e si trova appena sopra l'orizzonte ci poniamo alle due estremità di una base parallattica costituita approssimativamente dal diametro terrestre e ciò consente di scorgere  $\pm 1^\circ$  di superficie lunare.

### ***Ipotesi sull'origine della Luna***

I campioni lunari prelevati dalle missioni Apollo hanno indicato che la Luna si è formata 4,5 miliardi di anni fa, contemporaneamente dunque alla Terra ed al resto del sistema solare. L'analisi chimica dei campioni ha inoltre dimostrato che esistono alcune differenze sostanziali rispetto alla

Terra. La Luna possiede infatti una quantità minore di elementi volatili (K, Na, B, etc) mentre è particolarmente ricca di sostanze non volatili o refrattarie (Al, Ca, Th, Lantanidi). Tuttavia, rocce terrestri e rocce lunari presentano lo stesso rapporto fra l'isotopo leggero dell'ossigeno ( $^{16}\text{O}$ ) e gli isotopi pesanti ( $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ ). Ciò fa ritenere che si siano formate nella stessa regione del sistema solare, poiché il rapporto tra gli isotopi dell'ossigeno è molto diverso nelle meteoriti, soprattutto in quelle che provengono da regioni lontane del sistema solare. Sulla base di tali risultanze possiamo enunciare le varie ipotesi che nel tempo sono state avanzate sull'origine del nostro satellite: ipotesi della fissione, della cattura, dell'accrescimento e dell'impatto, che vedremo nelle prossime Pillole.

### ***Ipotesi della fissione e della cattura***

Prevede che dalla Terra allo stato primordiale semifluido si sia staccata una porzione di magma, a causa del rapido moto di rotazione. Molti scienziati ritengono infatti che inizialmente la Terra avesse un periodo di rotazione estremamente breve, dell'ordine di qualche ora. Da allora ad oggi la Terra avrebbe rallentato la sua velocità di rotazione, frenata dall'attrazione gravitazionale della Luna. Una variante successiva dell'ipotesi della fissione prevede che la Terra abbia addirittura aumentato inizialmente la sua velocità di rotazione a causa dello sprofondamento del materiale metallico verso il centro durante il processo di formazione del nucleo. L'aumento di velocità avrebbe generato la forza centrifuga necessaria al distacco del materiale destinato a formare il nostro satellite. L'ipotesi della cattura prevede che la Luna sarebbe un corpo formatosi in un'altra zona del sistema solare, catturato gravitazionalmente mentre passava casualmente accanto alla Terra. Tale ipotesi presenta il vantaggio di poter spiegare la diversa inclinazione dell'orbita lunare e la sua diversa composizione chimica, ma si tratta di un'ipotesi altamente improbabile. Un corpo celeste che passasse infatti casualmente vicino alla Terra dovrebbe possedere una traiettoria ben precisa per essere catturato. Anche lievi differenze porterebbero a un impatto o a una spinta gravitazionale con sorpasso (effetto fionda, simile al cosiddetto "gravity assist" sfruttato dalle sonde interplanetarie).

### ***Ipotesi dell'accrescimento e dell'impatto***

Secondo tale ipotesi, la Luna si sarebbe formata attraverso un processo analogo a quello attraverso il quale si formò il nostro pianeta. In altre parole, il materiale meteorico inizialmente presente sull'orbita terrestre si sarebbe condensato a formare un pianeta doppio. In tal caso, però, la struttura interna e la composizione chimica della Luna dovrebbero essere analoghe a quelle terrestri. Tale ipotesi non spiega dunque perché la Luna possieda un nucleo metallico così piccolo e le sue rocce presentino abbondanze chimiche così diverse. L'impatto meteorico prevede invece che la Luna si sia formata a causa di un impatto della Terra con un gigantesco meteorite. L'enorme quantità di detriti scagliati in orbita si sarebbero poi aggregati a formare la Luna. Recentemente tale ipotesi sta trovando un certo consenso in quanto permette di giustificare numerose evidenze osservative che gli altri modelli non sono in grado di spiegare. Possiamo infatti ipotizzare che: a) durante l'impatto il nucleo metallico, più pesante, del meteorite si sia fuso con la Terra, mentre solo i materiali più leggeri siano andati a formare i frammenti dai quali si condensò la Luna; b) il meteorite avesse una composizione inizialmente simile a quella terrestre, ma durante l'impatto l'enorme liberazione di energia abbia consentito solo agli elementi meno volatili di partecipare alla costituzione del nostro satellite; c) l'impatto sia avvenuto non centralmente, ma secondo un angolo tale da imprimere alla Terra un moto di rotazione molto rapido, tale da giustificare il suo elevato momento angolare.

# Dolomiti: leggende e geologia

*“La prima notte di Luna piena i Salvani si misero al lavoro: stavano filando i raggi della Luna. Quando ebbero finito, tutto fu luminosamente bianco.”*

*LA LEGGENDA DEI MONTI PALLIDI*

## **Introduzione**

In questa serie di Pillole ci occuperemo di un argomento un po' particolare, perché cercheremo di dare una spiegazione, da un punto di vista geologico, all'origine di alcune leggende delle Dolomiti. Premesso che io sono un geologo e non un linguista, una leggenda può essere definita come un racconto che si basa su elementi reali trasformati dalla fantasia e che vuole celebrare fatti o personaggi o spiegare una caratteristica dell'ambiente. Poiché questi racconti narrano fatti di cui spesso si è persa ogni testimonianza fisica e materiale, un geologo può a volte trarne degli interessanti spunti per le proprie ricerche, così come avviene grazie a molti toponimi (ad es., nello Zoldano, in pochi chilometri si incontrano i paesi di Fusine, Fornesighe e Forno di Zoldo, tutti indicanti antiche attività di fusione e lavorazione dei metalli e quindi la presenza di miniere). Le leggende delle Dolomiti sono moltissime, ma noi, come detto, vedremo soltanto alcune tra quelle che hanno maggior attinenza con la geologia. Certe sono decisamente famose, altre magari meno, ma praticamente tutte sono accomunate da alcuni elementi ricorrenti: la presenza di esseri mitologici (quali i giganti o gli gnomi) o dotati di poteri sovrannaturali, l'abbondanza di metalli preziosi (in particolare oro e argento, ma anche gemme) e la ricorrenza del numero 7 (sia per indicare periodi di tempo che per gruppi di persone). Ritroveremo questi 3 fattori al termine di questo ciclo di Pillole e ci riserveranno, spero, una piccola sorpresa. Ma, come nei migliori romanzi gialli, non sveliamo ora l'assassino.

## **La leggenda dei Monti Pallidi**

Iniziamo la nostra analisi con uno dei racconti più famosi, la leggenda dei Monti Pallidi; secondo quanto narrato, il biancore notturno delle pareti dolomitiche sarebbe da attribuire all'azione dei Salvani che, per guarire dalla nostalgia di casa una principessa proveniente dalla Luna, filarono i raggi lunari e ne ricoprirono i monti. In realtà, il “candore” della roccia è intimamente legato alla sua composizione; la dolomia, infatti, è una roccia monomineralica, ossia costituita prevalentemente da un solo minerale, la dolomite, che, se pura, è bianca; l'aggiunta di varie impurezze legate all'ambiente deposizionale e l'alterazione meteorica fanno sì che la dolomia appaia bianca, grigiastra o giallastra, al più rosata. La cosa curiosa, secondo me, è che la dolomia (o, meglio, le dolomie) rappresenta soltanto una porzione della storia geologica delle Dolomiti, all'incirca una ventina di milioni di anni rispetto alle centinaia complessive, mentre per tutto il tempo restante si sono formate rocce diverse per origine, composizione e per aspetto esteriore, che sono comunque una caratteristica del paesaggio, ma hanno trovato scarso o nullo spazio nella tradizione orale. Solo per citare alcuni esempi, si va infatti dal verde della formazione di Livinallongo, al rosso delle Arenarie di Val Gardena, al giallo della Formazione di San Cassiano, al nero delle rocce vulcaniche, ecc. In alcuni casi estremi, come per la Formazione di Travenanzes, si nota una fitta alternanza di colori all'interno della stessa unità stratigrafica; in pochi centimetri si passa dal rosso cupo al bianco, al grigio ecc. e, naturalmente, al cambio di colore corrisponde anche una variazione di litologia.

## **La leggenda di Re Laurino (1).**

Questo racconto, forse il più famoso sulle Dolomiti, vuole spiegare il fenomeno dell'enrosadira, ossia la colorazione rosata assunta dalle pareti di dolomia al tramonto. Il re, che viveva nel suo

giardino di rose sul Catinaccio o Rosengarten, appunto, scoperto dai suoi nemici proprio a causa di quelle piante, le maledisse, facendo sì che diventassero invisibili giorno e notte, ma dimenticò il tramonto, per cui per pochi attimi sono ancora osservabili proprio al calar del sole. Le pareti del Catinaccio, che durante il giorno appaiono grigie, al tramonto, magicamente, assumono la tipica tinta rosata che, estesa a tutte le Dolomiti, conferisce un aspetto davvero poetico. In questo caso la spiegazione non è, ovviamente, magica, ma nemmeno geologica. A volte si sente dire e, ahimè, anche insegnare nelle scuole, che le Dolomiti sono rosa perché contengono i coralli! Al di là dell'assurdità intrinseca in questo sillogismo, sfido chiunque a trovare i coralli nella Dolomia Principale. In realtà, si tratta di un effetto chiamato *scattering*, o di diffusione ottica; in pratica, poiché al tramonto i raggi del sole devono attraversare una porzione maggiore di atmosfera, le componenti blu della luce vengono "bloccate" dalle particelle dell'aria, mentre quelle a maggior lunghezza d'onda, ossia la componente rossa, raggiungono la superficie terrestre e quindi il nostro occhio. L'effetto è più evidente su pareti bianche (lo si può osservare anche sui muri di casa), mentre su rocce più scure o coperte da vegetazione, come ad esempio nelle Alpi Occidentali, non risalta. L'apporto geologico a questa leggenda, come per quella dei Monti Pallidi vista l'altra volta, risiede quindi ancora nella composizione delle rocce dolomitiche.

### ***La leggenda di Re Laurino (2)***

Il fenomeno dell'enrosadira, di cui ci siamo occupati nella Pillola precedente e che consiste nell'apparente colorazione rosata assunta dalle Dolomiti al tramonto, non deve essere confuso con altri fenomeni in cui si ha una reale variazione di colore nei minerali. In questi casi, infatti, non si tratta di un semplice effetto ottico, ma di qualcosa intimamente legata alla struttura chimico fisica degli stessi minerali. Il primo e più diffuso di questi è il pleocrosimo, variazione di colore dovuta al diverso assorbimento della luce a seconda della direzione di propagazione nel cristallo; risulta particolarmente evidente studiando le sezioni sottili di roccia al microscopio polarizzatore ed è un elemento diagnostico per il riconoscimento dei minerali; non mancano comunque i casi osservabili ad occhio nudo: gli esempi più classici sono dati dalla cordierite (chiamata anche, per l'appunto, di-croite), il cui colore varia dal blu scuro ai toni del bruno, o dall'andalusite, che mostra variazioni di tinte dal giallo-verde al rosso-bruno. In questi casi è sufficiente ruotare il cristallo rispetto alla sorgente di luce per osservare il fenomeno. Molto più raro è, invece, il metamerismo, ossia una variazione di colore che si osserva nel minerale al variare della sorgente luminosa; l'esempio migliore è quello dell'alessandrite, una varietà di crisoberillo che si presenta verde alla luce del sole e rossa se posta sotto una lampada. Questi giochi di colore sono molto apprezzati in ambito gemmologico e il taglio della pietra deve assolutamente tenerne conto, al fine di esaltare questo particolare aspetto.

### ***I Crodères (1)***

Quest'oggi parliamo di un popolo che vive sulle montagne, i Crodères: esseri del tutto simili agli uomini, ma privi di sentimenti perché il loro cuore è di pietra. Io ritengo che l'origine di questo mito sia da rintracciarsi nel profilo frastagliato delle nostre montagne, caratterizzato da numerose guglie grandi e piccole che sono uno degli elementi più caratteristici delle Dolomiti. È esperienza comune, per chi va in montagna, vedere modificato il paesaggio semplicemente spostandosi di pochi metri o al variare della luce: ecco quindi che lì dove si osservava una sporgenza o un rilievo ora non si nota nulla e viceversa. L'osservazione di questo fenomeno, in assenza di spiegazioni scientifiche, può avere convinto i nostri avi che fossero le guglie stesse a spostarsi e che quindi non si trattasse di roccia, ma di esseri viventi. È una forma di pareidolia, ossia quel fenomeno per cui il nostro cervello tende a riconoscere ovunque figure familiari, in particolare umane. La particolarità dello skyline dolomitico è da attribuirsi alla geologia. Le pareti di Dolomia Principale, roccia abbastanza rigida, poggiano invariabilmente sulla Formazione di Travenanzes, che mostra invece un comportamento plastico per l'alto contenuto in argilla. È stato dimostrato sperimentalmente che una roc-

cia sottoposta a una deformazione basale omogenea tende a fratturarsi; ecco che il peso stesso delle pareti di dolomia schiaccia le argille sottostanti che si espandono lateralmente in ogni direzione; questa estensione determina tensione nella roccia sovrastante, che si frattura secondo linee intersecantesi a vario angolo, isolando porzioni di roccia che si traducono poi in guglie e torrioni.

## **I Crodères (2)**

Riguardo alla leggenda dei Crodères a cui abbiamo fatto riferimento la volta scorsa, attribuendo la sua origine al profilo delle montagne, c'è però anche un'altra spiegazione: muovendosi sui nostri monti ai piedi delle grandi pareti dolomitiche, si possono ritrovare gli unici resti che questo popolo ci ha lasciato, ovvero i loro cuori di pietra! Si tratta in realtà dei Megalodonti, ossia molluschi fossili risalenti al Triassico, caratteristici della Dolomia Principale. Questo gruppo di organismi appartenenti a diversi generi, lontani cugini delle attuali vongole, hanno una conchiglia la cui forma ricorda quella di un cuore, specialmente in alcune specie, tanto che anche il loro nome scientifico si ispira a questa caratteristica, ad esempio nel genere *Dicerocardium*. Sempre ai Megalodonti è legata anche un'altra leggenda; poiché in sezione i gusci ricordano l'impronta di una capra, la loro abbondanza nelle rocce venne interpretata come una serie di impronte impresse dal demone durante le sue scorribande sulle pendici dei monti. Non c'è da meravigliarsi se i fossili sono spesso al centro dei miti; non va dimenticato che la spiegazione della loro origine rappresenta un traguardo relativamente recente per la scienza, quindi il ritrovamento di resti di organismi sconosciuti o comunque al di fuori del loro contesto abituale, destava evidentemente una certa curiosità e il bisogno di trovare una spiegazione per così dire plausibile. Un esempio: quando nell'antica Cina si rinvennero le prime ossa fossili di dinosauro, esse furono interpretate come i resti dei dragoni, elemento divenuto una caratteristica della cultura cinese.

## **Il Coccodrillo delle Buse Mole**

Anche nella puntata odierna rimaniamo in tema di fossili. Parliamo non di una leggenda in senso stretto, ma di una credenza che si è tramandata tra i vecchi cavaatori di arenaria nella zona compresa tra Libano di Sedico e Bolzano Bellunese. Qui, per secoli, sono state cavate le pietre da mole, ossia le coti che venivano poi esportate in tutta Europa e non solo, in quanto particolarmente adatte ad affilare le armi da taglio. Durante l'estrazione poteva capitare di imbattersi nei resti fossili di organismi particolari, gli antenati degli odierni delfini, ossia gli odontoceti che hanno reso celebre la formazione delle Arenarie di Libano in ambito paleontologico. Poiché i cavaatori, noti localmente come molàs, non avevano cognizioni di anatomia comparata o di paleontologia dei vertebrati, interpretavano spesso questi resti come gli scheletri di antichi coccodrilli, soprattutto quando si rinvenivano i crani, che presentavano un muso allungato e dotato di numerosi denti affilati. È proprio grazie alla secolare attività di cava che è stato possibile, a partire dalla fine del XXVIII secolo, il recupero e lo studio degli odontoceti del Miocene Bellunese ad opera di alcuni tra i più grandi pionieri della geologia moderna, quali il Catullo: negli anni sono stati raccolti i resti appartenenti a 139 esemplari, ascrivibili a 16 specie differenti, di cui 12 esclusive del Bellunese. Si tratta di una collezione molto importante, almeno la seconda in Europa e una tra le prime al mondo, di mammiferi marini miocenici e, attualmente, è conservata presso il museo dell'Università di Padova.

## **Il Lago di Agordo**

Quest'oggi, nella nostra rassegna delle leggende dolomitiche spiegate dalla geologia, ci dedichiamo ai laghi, altra peculiarità del paesaggio montano. Fino a qualche decina d'anni fa, nell'Agordino si sentiva parlare dell'antico lago di Agordo, relegando però la sua esistenza al mondo delle leggende. In particolare, nel racconto si attribuiva a San Martino un miracolo; il santo, per salvare un bambino che stava annegando nel lago, impugnò la propria spada e con un fendete tagliò l'argine, facendo defluire le acque e creando una profonda incisione che ancora oggi si chiama "Tagliata di



San Martino". Anche altri toponimi sembrano legati all'esistenza di un lago; Voltago, ad esempio, significherebbe "volta del lago", ossia luogo in cui il bacino presentava una curva. Se si percorre la conca in cui sorge Agordo, si può facilmente osservare come del presunto lago non vi sia traccia apparente. Sta di fatto che, a causa dell'erosione legata all'alluvione del 1966, lungo il corso del Cordevole emersero dei livelli di sedimenti inequivocabilmente lacustri, entro i quali si rinvennero anche dei tronchi in posizione di crescita. Le successive ricerche e i diversi studi compiuti nel corso degli anni, anche di recente, hanno quindi stabilito che qui in passato esisteva un lago, in seguito scomparso probabilmente per l'interramento operato dal Cordevole e dai suoi affluenti. La cosa curiosa è che le datazioni archeometriche, operate soprattutto sui resti vegetali, hanno fornito un'età dello specchio d'acqua compresa tra 5.880 e 5.330 anni dal presente; ci si può chiedere, quindi, come la sua presenza sia potuta rimanere nella memoria così a lungo.

### ***Cornia e Cordova***

Rimaniamo anche in questa puntata in ambito di miracoli, come nella Pillola precedente sul lago di Agordo, ma questa volta parliamo di intervento divino punitivo, per così dire. Chi risale la Valbelluna, prima di imboccare la stretta valle del Cordevole si trova ad affiancare una vasta distesa di massi, che vanno dalle dimensioni delle ghiaie fino a blocchi più grandi di una casa. Sotto questo grande macereto si troverebbero i resti della pieve di Cornia e della città di Cordova, distrutte da una frana scatenata dall'ira divina per punire l'avidità degli abitanti. Addirittura, lo storico Piloni, nella sua *Historia di Belluno* riporta la data esatta dell'evento: il 7 gennaio 1114, in occasione di un forte terremoto che effettivamente sembra essersi verificato in tutto il Nordest (nel 1117 però). Anche l'antica cartografia, riferibile al XVI-XVII secolo, riporta il nome Cordova, posto proprio in vicinanza dello sbocco del Cordevole in Valbelluna e sempre in prossimità di un convento (l'attuale Certosa di Vedana). Quello che oggi sappiamo con certezza è che, pur non potendo escludere crolli in tempi storici, questa distesa di massi, con un volume di circa 100 milioni di mc ed estensione di alcuni km quadrati, è da collegarsi ad una frana avvenuta durante l'ultima fase glaciale, circa 20.000 anni fa, quando nella conca del Mas stazionava la parte terminale del ghiacciaio del Cordevole, ormai disgiunto da quello del Piave; la frana, staccatasi dal Monte Peron, sarebbe caduta sopra al ghiacciaio e quindi dispersa in modo caotico con il ritiro dello stesso. È quindi chiaro che non può esistere alcuna città sepolta sotto le cosiddette Masiere di Vedana e la presunta ricchezza di Cordova è forse un richiamo alle vicine miniere di Val Imperina, il cui minerale doveva transitare da qui per raggiungere Venezia.

### ***Miniere e minatori***

Oggi facciamo una breve introduzione alle leggende legate all'attività mineraria e all'importanza che questa ha avuto nel passato. La regione dolomitica, infatti, è molto ricca di mineralizzazioni, spesso modeste, ma che in passato hanno avuto un peso importante nell'economia locale (e hanno fatto la fortuna della Repubblica di Venezia). È sufficiente ricordare le miniere di Valle Imperina, presso Agordo, che per secoli hanno fornito prima piombo e argento, quindi rame e infine pirite per la produzione di acido solforico. È quindi normale che molti dei racconti popolari diffusi nella nostra terra abbiano come argomento principale le miniere e chi vi lavorava; spesso, anche quando non si parla strettamente di questo, il protagonista è comunque un minatore o canopo (da un termine tedesco che significa, appunto, minatore), magari impegnato in attività le più varie possibili. Anche il quasi costante riferimento ai metalli preziosi, specie oro e argento, è una naturale conseguenza di questa situazione. C'è da dire che nelle Dolomiti non esistono miniere d'oro, benché questo metallo sia presente in piccolissime proporzioni incluso nella pirite, mentre l'argento è presente in una certa quantità come sottoprodotto della lavorazione del piombo; ma nei tempi passati, qualsiasi fosse il minerale estratto, esso era paragonabile all'oro per il peso sociale che aveva, se si considera che una miniera poteva dare da vivere alla popolazione di un intero paese. Ecco spiegato

perché nella tradizione orale si parla sempre di miniere d'oro o argento, anche dove questi metalli non sono mai stati presenti; invece, i minerali utili più abbondanti nell'area dolomitica sono (o sono stati) la galena argentifera, la blenda, la pirite, la calcopirite e la siderite.

### ***L'Aurona***

Una delle leggende più famose che riguardano le ricchezze del sottosuolo dolomitico è quella dell'Aurona, il paese delle miniere e dei tesori. Alle pendici del massiccio del Padon si trovava una possente porta d'oro che era l'ingresso al regno sotterraneo; questo era illuminato da 1.000 piccole lampade che pendevano dalle volte, ovunque vi erano oro e pietre preziose e i nani che vi abitavano continuavano a scavare per trovare altro metallo. Ancora oggi il toponimo Aurona esiste; indica un piccolo torrente che sgorga proprio alle falde del Monte Padon ed è lungo questo corso d'acqua che, secondo la tradizione, si troverebbe l'ingresso al regno. C'è da dire che tutta la catena del Padon, che si trova subito ad est della Marmolada (Passo Fedaiia) è di origine vulcanica, come si denota immediatamente dal colore nerastro delle rocce che la compongono; molto spesso le mineralizzazioni presenti nella regione dolomitica si trovano associate proprio alle rocce vulcaniche, specialmente dove queste vengono in contatto con rocce carbonatiche. È questa la situazione che si può osservare attorno al Padon, dove infatti sono presenti delle mineralizzazioni che, seppur non importantissime, in passato sono state sfruttate. A differenza di quanto potrebbe far pensare il nome Aurona, però, non si trattava di miniere d'oro, bensì di rame; il toponimo origina dalla parola *auramen* e non *aurum*. Situazioni analoghe si ritrovano, ad esempio, in val Gares; anche qui, accompagnati alle rocce vulcaniche, si trovano minerali di rame che vennero abbondantemente sfruttati in passato.

### ***La Delibana (1)***

Un'altra leggenda molto famosa legata alle miniere delle Dolomiti, dopo quella relativa all'Aurona che abbiamo analizzato la volta scorsa, è quella della Delibana. La leggenda della Delibana ha avuto origine nelle miniere del Fursil, vicino Colle Santa Lucia e narra del sacrificio di una fanciulla per garantire la ricchezza della miniera; in pratica, quando il minerale si esauriva, si rendeva necessario rinchiudere nella miniera una giovane di nobili origini per sette lunghi anni; allo scadere del settimo anniversario, né un giorno prima, né uno dopo, la giovane poteva tornare alla luce del sole e la montagna avrebbe ricominciato a mostrare i propri tesori. Anche se forse non tanto da giustificare un sacrificio umano, le miniere del Fursil erano in passato molto importanti, tanto da richiedere l'intervento di Federico Barbarossa, nel 1177, per dirimere, tramite una bolla imperiale, l'annosa questione sui diritti di sfruttamento delle stesse. L'importanza e la fama del Fursil risiedevano nel particolare tipo di ferro che vi veniva estratto; esso conteneva una percentuale di manganese piuttosto elevata, tale da impedirgli di arrugginire e, per questo, era adattissimo per la fabbricazione delle armi; soprattutto le spade, forgiate nelle fucine di Belluno, erano così apprezzate da essere esportate in tutta Europa, fino alla Scozia. Questo spiega perché la zona avesse un'importanza strategica, oltre che economica, fondamentale e, quindi, si capisce quale doveva essere il ruolo del Castello di Andraz, edificato poco lontano dalle miniere, vero e proprio punto nevralgico negli equilibri politici nel medioevo.

### ***La Delibana (2)***

La leggenda della Delibana, di cui abbiamo parlato la volta scorsa, oltre ad avere un evidente collegamento con la geologia e, in particolare, con la presenza di minerali utili entro le rocce delle Dolomiti, riserva anche una sorpresa, che di scientifico non ha molto, ma che merita di essere qui riportata a conclusione di questa carrellata di Pillole. Secondo quanto proposto dallo studioso Giuliano Palmieri, dalla leggenda della Delibana avrebbe tratto abbondante ispirazione un altro racconto, ben più famoso e la cui diffusione ha ampiamente valicato i confini provinciali. Proviamo ad arrivarci assieme per deduzione: abbiamo visto che gli elementi sempre presenti nelle leggende

connesse alla geologia sono gli esseri fantastici, come possono essere dei nani, i metalli preziosi e quindi le miniere, e il numero 7. A questi aggiungiamo un castello (quello di Andraz) e il sacrificio di una giovane per la bramosia del potente di turno. Teniamo in considerazione che i canopi, ossia i minatori, erano spesso dei bambini, o comunque persone di bassa statura per meglio muoversi entro le gallerie; inoltre vestivano con una specie di cappuccio che aveva il compito di preservarli dai colpi alla testa. Mettendo assieme tutti questi elementi non si può non pensare alla favola di Biancaneve e i sette nani, che a questo punto dovrebbe chiamarsi, per correttezza, Delibana e i sette canopi. Come si vede, le Dolomiti non finiscono mai di regalarci sorprese.

## I paradossi matematici

*“Un matematico è un cieco in una stanza buia alla ricerca di un gatto nero che non è lì.”*

C. R. DARWIN

### **Introduzione**

Le Pillole che vorrei somministrarvi nei prossimi giorni parleranno di un argomento affascinante e divertente: i paradossi matematici. Cos'è un paradosso? È un'affermazione che ci sembra assurda perché contraddice il senso comune. In alcuni casi, si tratta di conclusioni coerenti dal punto di vista logico, ma difficilmente accettabile dal punto di vista intuitivo; in altri casi si tratta di vere e proprie contraddizioni, e in questo caso i logici usano il termine “antinomia”. I paradossi non sono soltanto giochi o rompicapi per passare il tempo: in alcuni casi sono questioni molto profonde che hanno tormentato le menti degli studiosi fin dall'Antichità. Alcuni semplici paradossi, come quello di Achille e della tartaruga, quello del barbiere o quello del mentitore, di cui parleremo, hanno portato a progressi intellettuali importantissimi nella storia della matematica, della logica e della filosofia. Anche per noi i paradossi possono costituire potenti stimoli per la riflessione, oltre che giochi intellettuali raffinati e appassionanti.

### **Cos'è il paradosso di Achille e la tartaruga?**

Il filosofo greco Zenone di Elea, vissuto nel V secolo avanti Cristo, raccontò questa storia. Achille, detto più veloce, assurdamente sfidato da una tartaruga in una gara di corsa, ritiene doveroso concederle dieci metri di vantaggio. Nel tempo che Achille impiega per percorrere quei dieci metri, la tartaruga percorre un metro. Achille ha ora solo un metro di svantaggio, ma mentre lui copre questa distanza la tartaruga percorre dieci centimetri. Mentre Achille percorre quei dieci centimetri, la tartaruga avanza di un centimetro, e così via all'infinito. La tartaruga può quindi dire ad Achille: “Non mi prenderai mai! Ogni volta che tu raggiungerai il punto in cui mi trovavo prima, io sarò sempre più avanti di una certa distanza, fosse anche più piccola di un capello!” Ovviamente Zenone sapeva che in realtà Achille avrebbe facilmente raggiunto la tartaruga; eppure il ragionamento sembra ineccepibile. Come si spiega allora il paradosso? L'errore di fondo è quello di ritenere che sommando gli infiniti intervalli impiegati ogni volta da Achille per raggiungere la tartaruga si ottenga una distanza totale infinita, per percorrere la quale Achille deve impiegare un tempo infinito. In realtà questi intervalli diventano sempre più piccoli e la distanza totale è finita. Allo stesso modo è finito il tempo necessario per percorrerla e, proprio in questo tempo, la tartaruga verrà raggiunta da Achille.

### ***Cos'è il paradosso del barbiere?***

Immaginate che un barbiere abbia esposto, nella vetrina del suo negozio, un cartello che recita: “Faccio la barba a tutti gli uomini che non se la fanno da soli, e a nessun altro”. Chi fa la barba al barbiere? Se il barbiere rade se stesso, allora lui non appartiene alla categoria degli uomini che non si fanno la barba da soli, cioè ai clienti del barbiere: ma allora il barbiere non dovrebbe radere se stesso. D'altra parte, se qualcun altro rade il barbiere, allora lui appartiene alla categoria degli uomini che non si fanno la barba da soli, cioè è un ideale cliente di se stesso: ma allora il barbiere dovrebbe radere se stesso. Insomma, in entrambi i casi cadiamo in una contraddizione! Il paradosso del barbiere è una versione intuitiva di un famoso paradosso logico scoperto nel 1900 dal grande matematico e filosofo inglese Bertrand Russell. La scoperta di Russell mise in crisi la teoria degli insiemi formulata pochi anni prima dal tedesco Gottlob Frege, sulla quale avrebbe dovuto basarsi tutta la matematica, ma che aveva il difetto di generare contraddizioni simili a quella esemplificata dal paradosso del barbiere. I logici e i matematici dovettero quindi elaborare teorie molto più sofisticate per dare un fondamento logico alla matematica.

### ***Cos'è il paradosso di Condorcet?***

Supponiamo che nel 2111 si svolgano le elezioni politiche, e che si presentino al voto degli elettori tre blocchi politici, rispettivamente guidati dai tre noti leader politici Rossi, Bianchi e Verdi. La nuova legge elettorale prevede che ogni elettore scriva i nomi dei tre candidati in ordine di preferenza. Dallo spoglio dei voti emerge che il 66,66% degli italiani preferisce Rossi a Bianchi, e che il 66,66% preferisce Bianchi a Verdi. Sembrerebbe ovvio, a questo punto, concludere che le chance di Verdi siano pressoché nulle, e che la maggioranza degli italiani preferisce senz'altro Rossi a Verdi. È così? Anche se può apparire strano, non è detto. È possibile, ed è anche abbastanza facile da dimostrare matematicamente, che un altro 66,66% degli elettori abbiano espresso la loro preferenza per Verdi rispetto a Rossi, contrariamente alle aspettative dettate dalle prime due indicazioni di preferenza. Questo paradosso del voto, noto già nel Settecento, è associato al nome di Jean Antoine Nicolas de Caritat, marchese di Condorcet, studioso di economia e di matematica negli anni della Rivoluzione Francese. Il suo paradosso evidenziò un fatto forse ben noto ai politici di oggi, cioè la difficoltà di progettare una legge elettorale ideale: i desideri della maggioranza, infatti, possono essere contraddittori, cioè in conflitto gli uni con gli altri.

### ***Cos'è il paradosso del compleanno?***

Se in una festa ci sono 23 invitati, che probabilità c'è che almeno due persone tra loro compiano gli anni nello stesso giorno? Contrariamente a quanto suggerisce l'intuito, più del 50%! Con 30 persone, la probabilità supera addirittura il 70% e arriva al 97% con 50 persone. Il fatto sembra difficile da credere perché, considerando che in un anno ci sono 365 giorni, potrebbe sembrare necessaria la presenza di altrettante persone per rendere probabile la condivisione della stessa data di compleanno tra almeno due persone. Eppure se facciamo i calcoli basandoci sulle regole della teoria della probabilità, otteniamo il risultato che abbiamo detto. In questo caso non si tratta certo di un paradosso da intendersi come contraddizione logica, cioè come antinomia, ma semplicemente di un risultato che contrasta con le aspettative dettate dall'intuizione.

### ***Cos'è il paradosso della linea costiera?***

Quanto è lunga la linea costiera dell'Italia? Mille chilometri? Duemila? Cinquemila? Contrariamente a quanto potremmo aspettarci, non esiste risposta univoca ad questa domanda. Supponiamo di voler misurare la lunghezza del litorale del nostro Paese utilizzando un super-righello lungo 100 km e facendo in modo che per ogni tratto misurato entrambe le estremità del righello tocchino la costa. Così facendo, potremmo ottenere una misurazione complessiva, poniamo, di 1.500 km. Non è difficile comprendere che se rifacciamo la stessa operazione utilizzando un righello lun-

go, ad esempio, 10 km, i segmenti misurati saranno più aderenti ad insenature e penisole e la lunghezza totale risulterà maggiore. Se utilizzassimo un righello lungo 10 cm, potremmo seguire tutte le minime irregolarità della linea costiera e la misurazione sarà ancora maggiore. Nasce allora la domanda: quanto deve essere lungo il nostro righello per misurare la vera lunghezza della costa? Non esiste una tale lunghezza, perché ad ogni scala, anche la più microscopica, emergeranno irregolarità e frastagliature nuove che faranno aumentare sempre più la lunghezza misurata. Questo fatto è noto come effetto Richardson, dal nome del matematico inglese Lewis Fry Richardson che lo scoprì. Il motivo profondo è che le linee costiere hanno una natura analoga a quella degli oggetti noti come frattali, la cui caratteristica è di ripetere la propria struttura a tutte le scale.

### ***Cos'è il paradosso del mentitore?***

Se io affermo di essere un mentitore, voi dovrete concludere che, da buon mentitore, ho affermato il falso, e quindi anche il fatto che io sia un mentitore dovrebbe essere falso. Quindi io sono in realtà sincero, ma se lo sono è vera la mia affermazione, in base alla quale io sarei un mentitore. Si innesca così un infinito circolo vizioso, che oscilla tra due affermazioni contrapposte, cioè tra il fatto che io sia bugiardo o sincero. Secondo la leggenda, le origini di questo famoso paradosso risalgono alla figura semi-mitica del filosofo cretese Epimenide, il quale un giorno avrebbe affermato: "Tutti i cretesi sono bugiardi". Il fatto che Epimenide stesso fosse cretese fa ricadere nello stesso ciclo di contraddizioni di prima. L'asserzione di Epimenide viene addirittura citata anche da San Paolo nella Lettera a Tito. Quello del mentitore è il paradosso più famoso della storia della logica e ne esistono moltissime versioni; ne cito una ideata da Aristotele: se un generale ordinasse ai suoi uomini di disobbedire all'ordine che sta impartendo, chiaramente i soldati non saprebbero cosa fare, se obbedire o disobbedire.

### ***Cos'è il principio d'esplosione?***

Il principio d'esplosione è una regola della logica classica ed è chiamato anche legge di Scoto, dal filosofo Giovanni Duns Scoto, vissuto intorno al 1300, che, a causa delle sue sofisticate (o per alcuni cavillose) argomentazioni logiche, venne soprannominato "Doctor Subtilis". Il principio afferma che se per assurdo consideriamo entrambe valide due affermazioni che dicono l'una il contrario dell'altra, allora possiamo dedurre come vera qualsiasi cosa. Ad esempio, supponiamo che siano vere entrambe le affermazioni: "i limoni sono gialli" e "i limoni non sono gialli". Allora, dato che entrambe le frasi sono vere, possiamo dire che i limoni sono gialli; ma quindi possiamo anche dire che "o i limoni sono gialli oppure Babbo Natale esiste". Ma dato che è vera anche l'affermazione "i limoni non sono gialli", siamo costretti ad ammettere che Babbo Natale esiste. Un altro famoso esempio fu proposto dal grande matematico Bertrand Russell: consideriamo vera una affermazione falsa come  $4 = 5$ ; allora se sottraiamo 3 da entrambi i membri dell'uguaglianza otteniamo una nuova uguaglianza:  $1 = 2$ . Ora, io e il Papa siamo due, ma  $2 = 1$  quindi io e il Papa siamo uno, quindi io sono il Papa!

### ***Cos'è il paradosso del sorite?***

In greco antico soros significa "mucchio". Se ho un mucchio di sabbia e tolgo un granello dal mucchio, ovviamente avrò ancora un mucchio. Se tolgo un altro granello e un altro ancora, il mucchio resterà comunque un mucchio. Se però, a un certo punto, dopo aver tolto molti granelli, mi sono rimasti soltanto 10 granelli, non posso più dire di avere un mucchio. Sembra di dover concludere che, tra le tante asportazioni di granelli che ho via via eseguito, ce n'è stata una che ha trasformato il mucchio in qualcosa che non è più un mucchio. Ma qual'è stato questo granello, per così dire, "critico"? Viceversa, se io ho un granello di sabbia, non posso dire di avere un mucchio di sabbia. D'altra parte, se aggiungo un granello a un qualcosa che non è un mucchio, non ottengo certo un mucchio di sabbia. Da queste premesse sembra risultare impossibile costruire un mucchio di sab-

bia! Pare che il paradosso del sorite sia stato proposto dal filosofo greco Eubulide di Mileto, lo stesso che aveva formulato una famosa versione del paradosso del mentitore.

### ***Cos'è il paradosso dell'Hotel Infinito?***

Gli insiemi formati da un numero finito di oggetti hanno proprietà profondamente diverse da quelle degli insiemi formati da un numero infinito di oggetti. Ad esempio, in un hotel "normale", formato da un certo numero finito di stanze, il numero di stanze con numero dispari è ovviamente inferiore al numero totale delle stanze dell'albergo. Se però proviamo a immaginare, come propose il famoso matematico tedesco David Hilbert, un hotel con un numero infinito di camere, questo non è più vero, anche se può sembrare strano: la quantità delle stanze dispari è esattamente uguale alla quantità totale delle stanze. Supponiamo che l'Hotel Infinito abbia tutte le stanze occupate e immaginiamo che arrivi un nuovo ospite: l'albergatore chiederà a ciascuno dei clienti di spostarsi dalla propria camera a quella con il numero successivo, e sistema il nuovo ospite nella camera n. 1. Ma se arriva una comitiva formata da un numero infinito di turisti, come può fare l'albergatore per sistemarli tutti? Semplicemente chiederà a ciascun cliente di spostarsi alla stanza con il numero doppio rispetto a quello della camera precedentemente occupata: così facendo tutti gli ospiti andranno ad occupare stanze con numero pari e tutte le infinite camere con numero dispari saranno disponibili per gli infiniti ospiti della comitiva! Questo dimostra che l'insieme infinito dei numeri naturali dispari è numeroso esattamente quanto l'insieme di tutti i numeri naturali, pari e dispari, anche se il primo è un sottoinsieme del secondo!

### ***Esiste un solo tipo di infinito?***

Anche se può sembrare paradossale, esistono diversi tipi di infinito. Fu il matematico tedesco Georg Cantor a scoprirlo, verso la fine dell'Ottocento. Il paradosso dell'Hotel Infinito, di cui abbiamo parlato nella precedente Pillola, dimostra che i numeri dispari sono numerosi esattamente quanto tutti i numeri naturali. Si tratta, ovviamente, di una quantità infinita, che Cantor chiamò aleph-zero. Se però invece di considerare i numeri naturali, cioè i numeri interi positivi, consideriamo i numeri reali, cioè, per intenderci, i numeri con la virgola, allora parliamo di una quantità sempre infinita, ma più numerosa dell'infinito dei numeri naturali! Cantor chiamò questo infinito, per così dire, superiore, aleph-uno. Cantor dimostrò che esistono infiniti ancora superiori ad aleph-uno, e li chiamò, ovviamente, aleph-due, aleph-tre, e così via, indefinitamente. Possiamo dire quindi che esistono infiniti tipi di infinito!

### ***Che differenza c'è tra il numero 0,9 (periodico) e il numero 1?***

Nessuna: sono esattamente lo stesso numero. È giusto inserire questo argomento all'interno di una serie di Pillole sul tema dei paradossi matematici, proprio perché per molte persone il fatto che la notazione 0,9 (periodico), cioè 0,99999... (con un numero infinito di 9), sia in realtà un modo alternativo di rappresentare il numero 1 è una nozione difficile da accettare, o può addirittura sembrare assurda. Può sembrare strano che lo stesso numero possa essere scritto in due modi diversi, eppure è così. D'altra parte potremo citare altri esempi di scritture diverse dello stesso numero, sulle quali nessuno, credo, avanzerebbe dubbi: ad esempio è chiaro che 3,5 e 3,50 sono lo stesso numero. Tornando alla questione iniziale, molte persone sono portate a credere che il numero 0,9 (periodico) sia leggermente inferiore a 1, e che la differenza possa essere considerata una quantità infinitamente piccola. In realtà secondo la matematica standard non esistono numeri infinitesimi. Si potrebbe quindi dire che i due numeri 0,9 (periodico) e 1 differiscono di una quantità che può essere considerata inferiore a qualsiasi numero  $\epsilon$ , quindi, non può che essere zero. Che ci crediamo o no, due numeri sono quindi lo stesso numero!

### ***Cos'è il principio della piccionaia?***

Il cosiddetto principio della piccionaia, o principio di Dirichlet, dal nome del matematico tedesco che lo enunciò, è la banale osservazione che in una piccionaia con un certo numero di caselle possiamo farci stare al massimo quello stesso numero di piccioni, a meno che non mettiamo più di un piccione in qualcuna delle caselle. Anche se a prima vista il principio della piccionaia può apparire una constatazione ovvia e poco significativa, in realtà da questa regola possono essere dedotti risultati inattesi, addirittura paradossali. Ad esempio, possiamo essere certi che nella provincia di Belluno ci sono almeno due persone che hanno lo stesso numero di capelli! Cosa c'entra la piccionaia? Beh, considerato che molto difficilmente una persona può avere più di 200.000 capelli, possiamo immaginare una "piccionaia virtuale" con 200.000 caselle, a ciascuna delle quali corrisponde un diverso numero di capelli; se assegniamo una persona ad ogni casella, visto che la provincia di Belluno ha circa 214.000 abitanti, ci sarà sicuramente qualche casella alla quale dovremo assegnare più di una persona. Cioè esisteranno sicuramente almeno due persone con lo stesso numero di capelli.