

Riccardo Rossi

FESN – Friuli Experimental Seismic Network

Incontro con Nico Palermo:

Un'ipotesi sui meccanismi di emissione elettromagnetica delle rocce sottoposte a stress

Un martedì sera della scorsa estate, uscito dal lavoro, sono montato in sella al mio scooter e dopo aver naturalmente sbagliato strada e percorso alcuni chilometri in più, come il mio solito, sono riuscito a parcheggiare davanti al laboratorio della Microtelecom, in frazione Lauzacco di Pavia di Udine, un piccolo paese con vocazione vagamente industriale data la presenza di una zona dedicata, posta nel bel mezzo della campagna friulana a fianco della strada statale che raggiunge prima Palmanova, città feudale e poi Grado, località balneare di fama.

Raggiunto il laboratorio di Nico mi sono guardato intorno e ho annusato il forte aroma di tabacco bruciato di sigaretta che sembrava avvolgere, invisibile ogni cosa, come ne costituisse una parte indissolubile. Non era cambiato molto dall'ultima volta che vi ero stato, le scatole vuote del **Perseus**¹, il ricevitore famoso tra i radioamatori di tutto il mondo per le sue caratteristiche professionali, troneggiavano sul tavolo, il computer acceso con la videata del nuovo software in costruzione, anch'esso opera di Nico, come del resto la progettazione del Perseus, mostravano l'intensità del lavoro intellettuale cui erano saldamente e seriamente coinvolti.



Fig. 1 – Il ricevitore Perseus della Microtelecom

Il resto dell'attrezzatura sparpagliata sui tavoli da lavoro e i prototipi, a prima vista insignificanti, non rendono l'idea di quanta tecnologia e pensiero c'è dietro quei piccoli assemblaggi con minuscoli componenti **SMD**² e delle prestazioni mirabili che riescono a fornire.

Le luci al neon, dal sapore ormai antico,

annegavano gli oggetti con la loro luce verdastra e indifferente. Nico mi accompagnò nel suo ufficio, anch'esso simile ai miei ricordi e saturo di oggetti elettronici, di dispositivi, di computer, di appunti, di libri, ma soprattutto di sigarette esaurite e abbandonate sull'ampio portacenere, compagno di elucubrazioni notturne e muto testimone di percorsi mentali per raggiungere obiettivi apparentemente impossibili. Sembra che il fumo sia una costante *nicologica* con cui la creatività dell'ingegnere è costretta a convivere, un po' come la **costante cosmologica**³ di Einstein, che fu il cruccio inevitabile di tutta la sua vita.

A riprova di quanto sopra, sul tavolo del laboratorio, poco prima lo stesso Nico mi aveva mostrato il prototipo di un nuovo "giocattolo". Si trattava di un convertitore di frequenza che permette al Perseus, che ha una gamma di ricezione che parte tipicamente dai 20 kHz circa e raggiunge i 30 MHz, di ricevere le gamme di frequenza superiori giungendo fino alla gamma delle VHF radioamatoriali, cioè 144 – 146 MHz.

Il piccolo contenitore nero e giallo, stilizzato similmente al Perseus riposava accanto al PC e a un campione del famoso ricevitore. Dal retro della scatoletta appariva un'antenna a gommino non molto lunga, anzi apparentemente anche troppo corta se paragonata alla maggior parte delle antenne telescopiche di una tipica radio in FM.

Con questo aggeggio, mi spiegava Nico, gli appassionati di **broadcasting**⁴ possono ascoltare anche le stazioni che normalmente non sono captabili con i tradizionali ricevitori. La possibilità di gestire i filtri tramite il software e il computer infatti, permette di risolvere quei deboli segnali che si nascondono tra una stazione e l'altra e che è impossibile ascoltare con una radio comune.

Le caratteristiche del convertitore unite a quelle del Perseus e al software, che Nico stava implementando, permettevano di raggiungere risultati per me assolutamente incredibili e la semplicità con cui ne parlava, rendevano l'autore di quelle meraviglie in qualche modo strano, alieno, anche lui evidentemente nascondeva qualcosa di impalpabile, di invisibile ai miei occhi. L'ing. Nico Palermo è una persona tutto sommato semplice, che sa ascoltare e sa stare accanto ai meno fortunati e meno dotati radioamatori comuni come me, riuscendo a instaurare un contatto umano che non lascia trasparire le sue altissime competenze, le quali però si manifestano senza tregua non appena inizia a

parlare di qualcosa di tecnico. Il suo esporre i concetti presuppone un minimo di competenze non comuni e la sua familiarità con regole ed equazioni matematiche possono lasciare interdetti. Tuttavia, se si cerca (come ho fatto io) di intuire i concetti tralasciando ciò che le lacune personali non permettono di comprendere appieno, il viaggio sull'astronave di cui riesce ad essere pilota e guida, è affascinante come pochi. Nel nostro primo incontro, di forse un anno addietro, era durato un intero pomeriggio, avevamo parlato di un'infinità di cose legate all'elettromagnetismo, all'energia nucleare, alla propagazione delle onde e a molti altri argomenti correlati. Per me era stata un'importante lezione tecnica che ho cercato di immagazzinare al meglio e su cui ho rimuginato per un po' di tempo prima di ritrovare l'importante equilibrio neuronico.

Stavolta avevo chiesto a Nico un appuntamento per proporgli la mia idea circa un possibile allestimento di stazioni di monitoraggio elettromagnetico da installare nelle zone **sismogenetiche**⁵ esistenti a cavallo tra l'Italia e la Slovenia. Si trattava di un'ipotesi inserita nell'ambito di un progetto **Interreg IV – Italia Slovenia**⁶, inoltrato all'esame della Comunità Europea al fine di ottenere un contributo per la realizzazione di una rete di stazioni tese a rilevare una serie di dati chimico-fisici e ambientali che sarebbero stati analizzati al fine di rilevare eventuali segnali che possano essere considerati **precursori di eventi sismici**⁷. L'idea del progetto non era nuova, un'analoga richiesta di contributo era stata inoltrata dall'**OGS (Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste)**⁸ già due anni prima, ma a causa di alcuni problemi strutturali e formali non era stata accolta.

All'OGS, spiegai a Nico, c'è una ricercatrice: la dott.ssa Anna Riggio, che si dedica da anni a questo tipo di ricerche e sta analizzando in particolare i livelli di gas **Radon**⁹ mediante alcune stazioni di rilevamento poste in Friuli. In più occasioni è stata in grado di trovare correlazioni tra i livelli di questo gas e alcuni eventi sismici verificatisi in zona. L'attuale progetto, per il quale è stato richiesto un contributo con il programma Interreg IV – Italia Slovenia 2011-2013, prevede la realizzazione di una rete di stazioni di monitoraggio di diversi parametri tra cui quelli elettromagnetici, e l'OGS ha proposto alla **FESN (Friuli Experimental Seismic Network)**¹⁰, organizzazione che fa capo al gruppo di **Protezione Civile di Pozzuolo del Friuli**¹¹, di

collaborare a questa ricerca gestendo l'installazione delle stazioni di monitoraggio elettromagnetico e organizzando il convegno finale con cui sarebbero stati esposti i i metodi e i risultati della ricerca. Naturalmente la proposta avanzata dall'OGS, continui, è stata vagliata dall'**Amministrazione comunale di Pozzuolo**¹², la quale ha deliberato l'approvazione del progetto e ha autorizzato il sottoscritto a seguirne le varie fasi, nel caso in cui il progetto venisse finanziato.

A quel punto, raggiungendo il punto cruciale e il motivo della mia richiesta di audizione, ho spiegato a Nico che la mia ipotesi di progetto delle stazioni di monitoraggio comprendeva la possibilità di utilizzare il Perseus quale ricevitore professionale, l'antenna tipica del **Progetto SDT**¹³, un analogo progetto su scala nazionale teso al monitoraggio di segnali elettromagnetici possibili precursori sismici anche con attrezzature amatoriali autocostruite, sotto l'egida dell'**ARI – Associazione Radioamatori Italiani**¹⁴ e in collaborazione con il gruppo FESN, e un semplice computer dove elaborare e immagazzinare i dati rilevati.

Nico, da buon ingegnere con una preparazione solidamente razionale, ha cominciato a ragionare sul progetto, iniziando a immaginare quali potessero essere i possibili meccanismi con cui le rocce siano in grado di emettere **radiofrequenza**¹⁵.

Al fine di aiutare il suo percorso mentale, gli ho accennato degli studi del dott. Adriano Nardi dell'INGV, il quale ha effettuato alcune prove di laboratorio registrando segnali su bande di frequenza intorno ai 10 kHz sottoponendo diversi tipi di roccia a compressione utilizzando delle presse industriali. Lo stesso Nardi, ripetendo l'esperienza in ambiti diversi, quale una cava con del materiale roccioso frantumato tramite esplosivo, ha ottenuto risultati analoghi a quelli di laboratorio. Le sue ricerche, ho affermato, non si limitano agli effetti sperimentati, ma si sono estese con l'installazione di una rete di monitoraggio dello spettro elettromagnetico composta da due **stazioni: una sul monte del Gigo e una a Sassalbo**¹⁶, realizzata in collaborazione con il **Gruppo Scatter del Monte del Gigo**¹⁷, associazione di radioamatori facente capo all'ARI con il quale la stessa FESN collabora nell'ambito della realizzazione del progetto SDT – Segnali dalla Terra.

Il Nardi ha effettuato sperimentazioni con diversi tipi di roccia, comprese quelle **sedimentarie**¹⁸, ottenendo risultati analoghi e questo mi

incuriosiva oltremodo. In che modo la **piezoelettricità**¹⁹, su cui anche Nico poneva solide basi per spiegare il fenomeno, poteva applicarsi alle rocce sedimentarie? La piezoelettricità infatti parte dal presupposto che un cristallo sottoposto a sollecitazione meccanica su due facce, esponga una differenza di potenziale sulle due facce adiacenti quelle sollecitate. Dal mio punto di vista, le rocce sedimentarie, costituite per la maggior parte da sedimenti, pertanto con una percentuale di cristalli ben formati, piuttosto limitata, non poteva presentare fenomeni di piezoelettricità analoghi a rocce con strutture cristalline molto più strutturate e evidenti come i **porfidi**²⁰ o i **graniti**²¹. L'ingegnere ha però corretto subito il mio parere spiegandomi che non è sempre necessario un reticolo cristallino per ottenere il fenomeno piezoelettrico, ogni molecola, infatti, se sottoposta a corrette sollecitazioni meccaniche, poteva presentare delle zone **polarizzate elettricamente**²², inoltre successivi approfondimenti nell'ambito di una discussione con un amico geofisico, mi hanno spinto a ricordare che anche la roccia sedimentaria è costituita da cristalli, anche se di dimensioni piuttosto minute, ma non sempre invisibili a occhio nudo. Sollecitazioni adatte infatti, possono modificare le orbite elettroniche tipiche di una molecola a riposo ed è possibile quindi che tali pressioni consentano la formazione di una leggera polarizzazione. Il passo successivo necessario alla produzione di onde elettromagnetiche quindi, potrebbe essere quello delle vibrazioni molecolari. Le molecole, infatti, vibrano costantemente con una velocità e frequenza che sono funzione della temperatura. Infatti, qualora si riuscisse a ridurre la temperatura di una molecola, o di un atomo, fino a raggiungere un livello molto vicino all'estremo livello di $-273,15^{\circ}$ Celsius, corrispondente a 0° Kelvin, altrimenti detto "**zero assoluto**"²³, l'atomo cambierebbe forma e si trasforma in una specie di plasma divenendo il cosiddetto **condensato di Bose – Einstein**²⁴. La **legge della termodinamica**²⁵ impedisce però alla materia di raggiungere il limite dei 0° Kelvin, punto in cui le particelle atomiche si troverebbero nella condizione di **energia di punto zero**²⁶. Tale stato, ricordavo da una lettura di un "**quaderno**" di "**Le Scienze**"²⁷, è stato effettivamente verificato mediante, per esempio, l'utilizzo di un fascio di luce laser con il quale è stato possibile "**raffreddare**" del materiale ad una temperatura di circa 50 microkelvin molto

vicina quindi a quella dello zero assoluto.

La **vibrazione delle molecole**²⁸, dicevamo, possiede una velocità notevole, dell'ordine dei chilometri al secondo, e quindi una molecola polarizzata che vibra velocemente potrebbe già essere in grado di emettere radiofrequenza. Tuttavia un altro fenomeno ben più importante potrebbe verificarsi in condizioni estreme.

Ho precisato a Nico che la temperatura nel sottosuolo aumenta di circa 30 gradi ogni chilometro (**gradiente geotermico**²⁹) e che una buona parte degli **ipocentri di eventi sismici**³⁰, nel caso di **faglie inverse**³¹ (lombi di roccia le cui fratture tendono a sormontarsi a causa di fenomeni di compressione) e in quelli di faglie normali (lombi di roccia che tendono a scivolare l'una rispetto all'altra a causa di fenomeni di dilatazione), si trovano a profondità di 8 – 15 km, raggiungendo quindi temperature dell'ordine di 200 – 500 gradi Celsius.

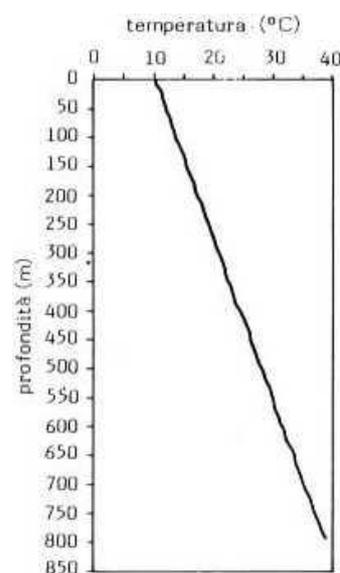


Fig. 2 – Aumento medio della temperatura in funzione della profondità.

In tali condizioni di temperatura e di stress, le rocce, o meglio le molecole, possono essere spinte a liberare elettroni dalla loro orbita prefissata (**orbitale atomico**³²) proprio a causa dello stress. In questa situazione si formerebbero quindi molecole con **lacune**³³, quindi con valenza elettrica positiva, e gli elettroni liberi, a loro volta sarebbero alla ricerca di una nuova orbita percorribile per ritrovare l'equilibrio perduto. Tale situazione, in elettronica, è quella che si forma nei dispositivi a stato solido (diodi, transistor ecc.) in cui una sostanza, tipicamente silicio, germanio o arseniuro di gallio, viene **drogata**³⁴ con una

leggera stesa di impurità di materiali adatti (fosforo, arsenico o boro), che aumentano vistosamente proprio questo fenomeno.

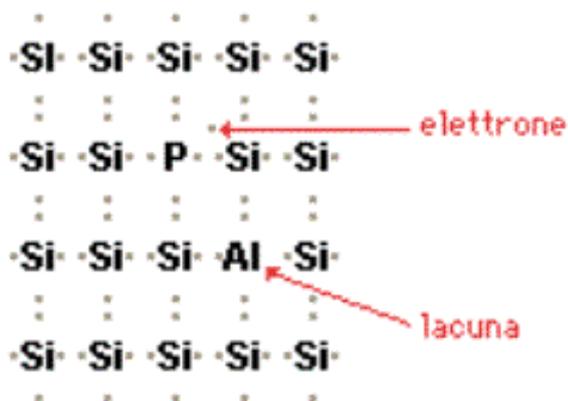


Fig. 3 – Reticolo cristallino drogato con impurità e formazione di lacune e elettroni liberi.

I **diodi**³⁵, in elettronica, sono dispositivi che permettono il passaggio di corrente solo in una direzione grazie proprio all'effetto di polarizzazione dovuto, in linea di massima proprio alla capacità del materiale di produrre elettroni liberi e lacune qualora sottoposto a una differenza di potenziale. Modulando opportunamente la tensione applicata, è possibile quindi ottenere una risposta diversa in funzione della tensione. Lo stesso **transistor**³⁶ si basa su tale principio al punto che si comporta come amplificatore di segnale, in questo modo: modulando con un debole segnale una porta (tipicamente la base), attraverso gli altri due poli del dispositivo passa una corrente (o una tensione) proporzionale all'ampiezza del segnale iniettato, ma con maggiore ampiezza.

Le modalità di funzionamento di tali dispositivi però è soggetta al rumore di fondo che è proprio dovuto al movimento caotico di una parte degli elettroni e delle lacune presenti naturalmente nel dispositivo.

E' quindi possibile che un fenomeno simile possa prodursi anche nelle rocce sottoposte a stress in considerazione anche delle alte temperature in cui sarebbero immerse. Tuttavia, ho proseguito, qualora l'emissione di radiofrequenza fosse dovuta unicamente a questo fenomeno, mi aspetterei che il segnale emesso fosse costante, di basso tenore e difficilmente potrebbe essere così ampio in potenza, da raggiungere la superficie. Mi aspetterei che molte delle onde di radiofrequenza prodotte vengano annullate o attenuate da altrettante analoghe onde in **controfase**³⁷ e quindi la potenza risulterebbe

ridotta o nulla proprio a causa di questo fenomeno di auto-attenuazione. Diversamente, gli studi del dott. **Nardi**³⁸ sembrano suggerire che vi sia un fenomeno di risonanza, in particolare intorno ai 10 kHz che lascerebbe pensare ad un'emissione coerente, quindi con molte onde elettromagnetiche in fase, con il risultato finale di risultare sufficientemente energetica da riuscire a manifestarsi in superficie.

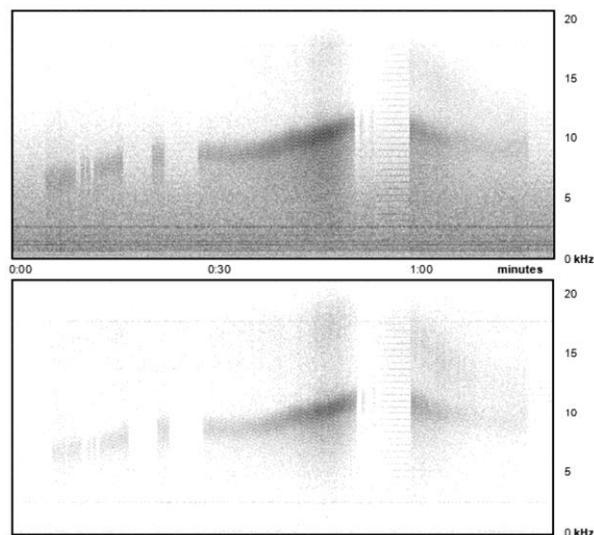


Fig. 4 – Esempio di spettrogramma elettromagnetico registrato in laboratorio a seguito di rottura di calcare massiccio (Nardi e Caputo 2006)

Nico quindi, afferrando la critica, ha proseguito suggerendo che vi possono tranquillamente essere dei fenomeni di **risonanza**³⁹, soprattutto alle frequenze di cui si parlava.

A quel punto ho proposto all'ingegnere la teoria della **dilatanza**⁴⁰, cercando di proporre un'ulteriore strada percorribile per tentare di spiegare il fenomeno.

La dilatanza produce una serie di manifestazioni in superficie di fenomeni che si sviluppano in profondità. Essa prevede i seguenti accadimenti: a seguito di tensioni accumulate negli strati profondi di roccia compatta, si formano in quest'ultima delle microfrazture che, producendo degli interstizi, tendono ad aumentare il volume della roccia. L'aumento del volume produce contemporaneamente due effetti: aumenta l'elasticità della roccia e quindi allontana per un breve periodo la possibilità di una frattura importante e un risucchio di fluidi all'interno degli interstizi che però, al momento della saturazione, restituiscono alla roccia la capacità di trasmettere la tensione a cui è sottoposta, essendo i fluidi di norma praticamente incompressibili. Eliminando i

fluidi l'elasticità introdotta dalla dilatanza, le tensioni proseguono a trasmettersi finché una lacerazione importante della roccia diventa inevitabile e durante questa lacerazione avviene la produzione di fenomeni di spostamento che possono essere di pochi centimetri fino a qualche metro mentre le vibrazioni derivanti scatenano un terremoto di energia paragonabile allo spostamento e all'area di frattura.

A titolo di esempio il terremoto di Sumatra del 26 dicembre 2004 ha generato uno spostamento di faglia di circa 5 metri in altezza per circa un migliaio di chilometri di lunghezza.

Il fenomeno della dilatanza genera fenomeni, dicevo, percepibili in superficie al punto che prima di un evento di dimensioni rilevanti è possibile rilevare spostamenti del terreno in altezza, modifica del getto di sorgenti d'acqua, rilascio anomalo di diversi gas e altri fenomeni, tra cui, sembra, anche attività elettrica ed elettromagnetica. La peculiarità del fenomeno della dilatanza è che avviene prima dei fenomeni sismici rilevanti, a volte anche con tempi notevoli: fino a 15 giorni. La possibilità di predire eventi sismici rilevanti ha spinto la ricerca a studiare approfonditamente questi segnali, tuttavia le varie condizioni geologiche nascoste non permettono di interpretare fino in fondo i segnali rilevabili e questo ha diminuito fortemente l'entusiasmo iniziale dei ricercatori e quindi i relativi finanziamenti in questo campo.

Ulteriori studi cercano di interpretare altri tipi di segnali derivanti dal movimento delle zolle terrestri, uno dei più promettenti sembra essere quello delle misurazioni di superficie con GPS.

ad Haiti durante l'evento sismico a seguito delle misurazioni delle stazioni GPS

Con queste tecniche è possibile verificare lo spostamento superficiale del terreno generando delle mappe di deformazione che possono essere visualizzate allo scopo di rilevare aree più o meno soggette a fenomeni di tensione e quindi generare possibili terremoti al momento in cui queste tensioni non siano più sopportabili dalla roccia.

Tornando al fenomeno della dilatanza, personalmente ritengo che la formazione di lacune possa intaccare la struttura cristallina della roccia generando delle linee di debolezza che successivamente si tramutino in fratture vere e proprie. La possibilità che queste fratture si propaghino lungo le linee o aree di tensione interna, potrebbe generare le condizioni adatte affinché si produca un fenomeno di risonanza. Prima e durante le fratture quindi, le lacune si produrrebbero sia con un effetto a cascata sia con un altro di propagazione. La produzione in cascata di lacune quindi potrebbe produrre zone di debolezza lungo le quali si produrrebbero delle microfratture, queste infine aumenterebbero le tensioni nella roccia generando altre lacune e il fenomeno proseguirebbe fino all'allentamento delle tensioni presenti.

Questo processo potrebbe propagarsi con una velocità ben definita permettendo, il generarsi delle vibrazioni rilevate in forma di onde elettromagnetiche dal dott. Nardi durante le prove, a loro volta generate dalla vibrazione delle lacune e degli elettroni presenti.

Una volta ipotizzati i meccanismi con cui la roccia può generare onde elettromagnetiche coerenti in una frequenza particolare, rimane il problema di come questa radiofrequenza possa raggiungere la superficie mantenendo un livello tale da essere rilevabile dalla strumentazione utilizzata.

La possibilità che un segnale generato in profondità (ad esempio 10 km) possa raggiungere la superficie con un'attenuazione tale da permetterne la ricezione dipende dalle caratteristiche elettriche degli strati di roccia che attraversa nonché dalla presenza di strati d'acqua dolce o salmastra, ovvero di strati di roccia o di terreni con forte presenza di metalli tale da renderne la resistività particolarmente bassa.

E' stato verificato che solo onde elettromagnetiche di frequenza particolarmente bassa può penetrare strati di roccia o strati d'acqua marina. Proprio per questo motivo le

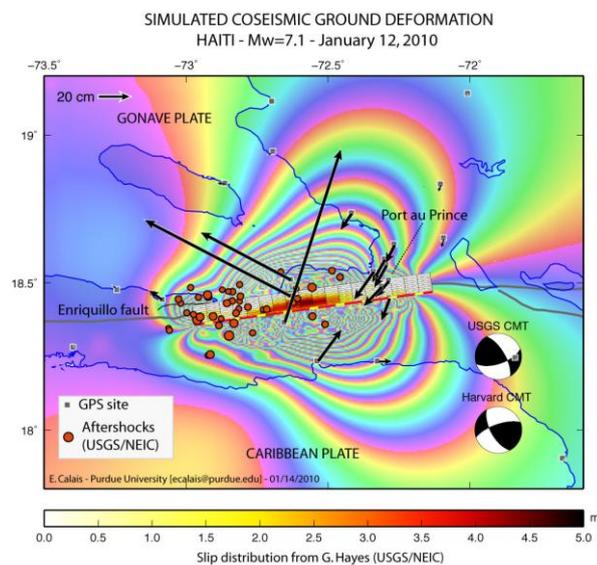


Fig. 5 – *Mappa delle deformazioni del suolo calcolate*

comunicazioni tra la terraferma e i sommergibili vengono effettuate con frequenze dell'ordine dei chilohertz.

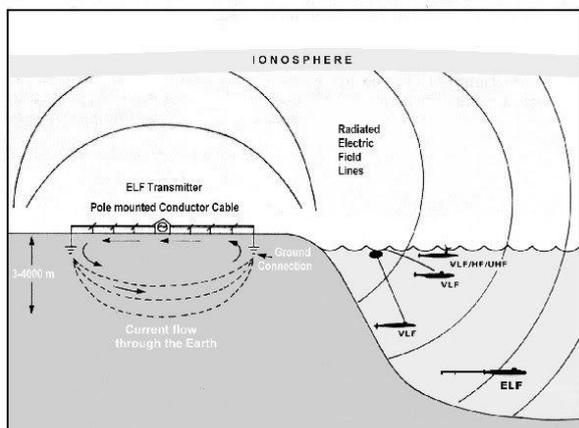


Fig. 6 – Modalità di propagazione e penetrazione delle onde elettromagnetiche

Studi sulla resistività degli strati profondi del pianeta hanno evidenziato la presenza di diversi strati con caratteristiche ben diverse. Inoltre alcuni studiosi hanno ipotizzato che si possa considerare l'interno della crosta terrestre (zona in cui si formano i fenomeni in parola) come omogenea dal punto di vista elettrico. Questo spingerebbe a ritenere che le frequenze rilevate possano essere adatte a superare gli strati di roccia soprastanti e a essere rilevabili in una zona sufficientemente ampia per poter permettere la triangolazione al fine di calcolare la zona di provenienza dei segnali.

La necessità di verificare la presenza di tali segnali e di effettuare prove concrete è limitata in Italia dall'accadimento di eventi potenzialmente utili a questo tipo di ricerca. Il Nardi infatti ritiene che eventi in grado di generare segnali ricevibili debbano essere dell'ordine di 4 – 5 gradi della scala Richter.

Eventi più deboli quindi non avrebbero energia sufficiente a garantire la presenza di segnali rilevabili in superficie.

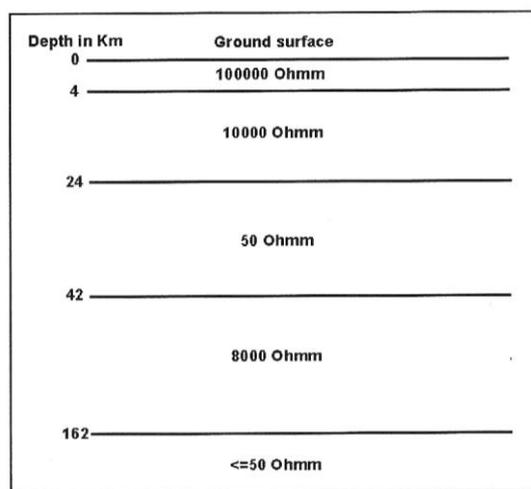


Fig. 7 – Resistività del terreno in funzione della profondità

I tempi necessari alla realizzazione delle verifiche quindi si allungano e la possibilità di avere una rete capillare in funzione senza limiti di tempo prevede dei costi non sostenibili per un normale progetto di ricerca. Tuttavia la costanza e la diffusione dei costi come previsto dal progetto SDT può dare le garanzie necessarie per ottenere risultati concreti e presentabili. In questi concetti e premesse, oltre che sulla gentile collaborazione di molti radioamatori e appassionati, si fonda il progetto Segnali dalla Terra.

Appendice

Riassumendo, la capacità e i meccanismi con cui la roccia è in grado di emettere radiofrequenza sono tutt'ora in fase di studio e non sono stati ancora chiariti.

Esistono diverse ipotesi sui meccanismi di produzione di radiofrequenza da parte delle rocce e chiamano in causa comportamenti a livello molecolare, piezoelettricità oppure interazioni con i fluidi. Al momento la piezoelettricità sembra essere la causa più probabile. Dato che in corrispondenza di grandi eventi sismici le superfici delle aree di frattura possono essere di diversi chilometri quadrati, non è improbabile ritenere che il meccanismo di produzione di energia elettromagnetica possa essere sufficiente a propagarsi in distanza.

E' però anche necessario un meccanismo di risonanza che permetta ai segnali di singole molecole di accomunarsi e sommarsi al fine di produrre un segnale sufficientemente coerente e di potenza tale da poter essere registrabile in superficie.

La possibilità che un segnale sufficientemente potente possa attraversare gli strati di roccia dipende da più fattori relativi agli strati che separano la zona emittente dalla superficie quali: costante dielettrica, conduttività, velocità di propagazione e attenuazione risultante dall'interazione dei parametri citati.

Diversi articoli tecnici (citati in bibliografia) hanno relazionato circa segnali elettrici e elettromagnetici rilevati in superficie in precedenza a eventi sismici rilevanti, tuttavia la materia è ancora molto complessa e dibattuta anche a causa della limitata portata di tali segnali e della loro difficile rilevazione.

Molti degli studi attuali puntano le proprie ricerche sullo spettro più basso delle onde elettromagnetiche anche in considerazione che frequenze dell'ordine dell'Hertz sono potenzialmente le più adatte ad attraversare gli strati di roccia che separano le fonti emissive dalla superficie, si parla infatti di profondità medie intorno a 10 – 15 Km, anche se gli ipocentri di alcuni tipi di eventi sismici possono prodursi anche a livello del suolo ma anche fino a 800 Km di profondità.

Table: 3-4 Typical Dielectric Constant, Electrical Conductivity, Velocity and Attenuation Observed in Common Geologic Materials

MATERIAL	K	σ (mS/M)	v (m/ns)	a (dB/m)
Air	1	0	0.30	0
Distilled Water	80	0.01	0.033	2x10-3
Fresh Water	80	0.5	0.033	0.1
Sea Water	80	3x103	.01	103
Dry Sand	3-5	0.01	0.15	0.01
Saturated Sand	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Limestone	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Shales	5-15	1-100	0.09	1-100
Silts	5-30	1-100	0.07	1-100
Clays	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granite	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Dry Salt	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ice	3-4	0.01	0.16	0.01

Fig. 8 - Tabellina della costante dielettrica, conduttività elettrica, velocità ed attenuazione osservati in materiali geologici

Dalla tabellina sopra riportata si ricava che la capacità di conduzione della roccia è praticamente nulla, comportandosi quindi come un buon dielettrico. Tuttavia, in alcuni tipi di roccia come le sititi, gli scisti e le argille, questa conduttività può aumentare di molto e quindi l'attenuazione aumenta in maniera sensibile causando una potenziale barriera a segnali elettromagnetici che le attraversino.

Inoltre l'acqua, spesso presente sia in forma liquida che solida (ghiaccio) oppure in forma di aggregazione con altre sostanze, può far aumentare la conduttività degli strati rocciosi

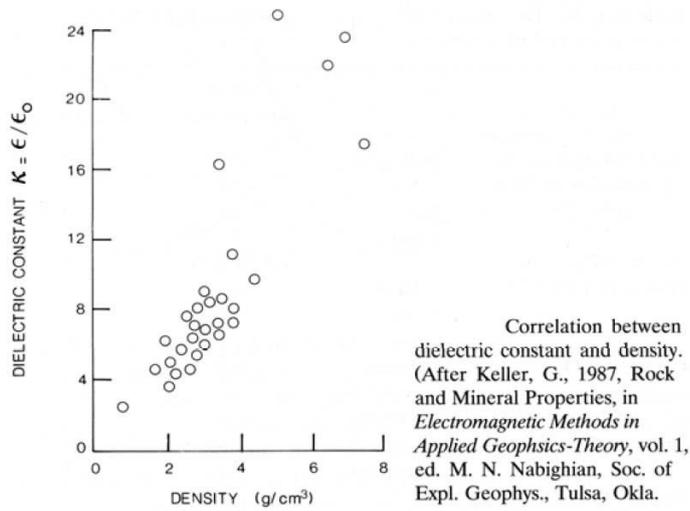


Fig. 9 – Correlazione tra la costante dielettrica e la densità

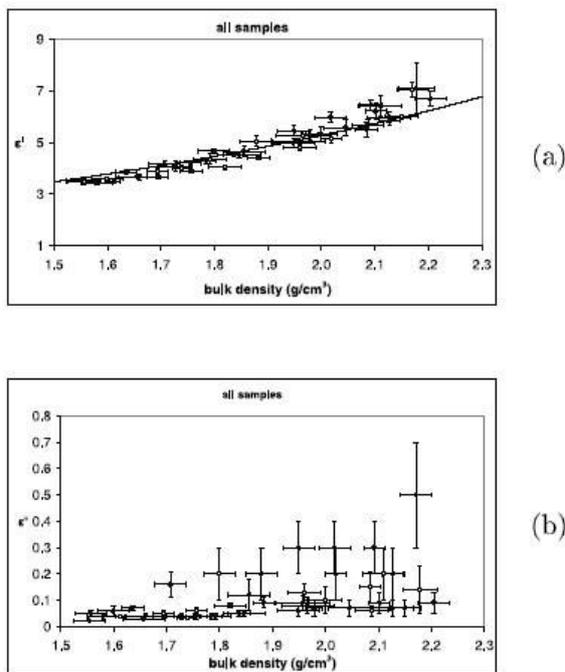


Figure 10. Scatterplots of (a) real and (b) imaginary parts of permittivity measured at 1 MHz for all the samples versus the bulk density. The solid line (Figure 10a) represents the data best fit with a power law function and the constraint $\epsilon' = 1$ at $\rho = 0$.

Fig. 10 – Misurazioni di permittività di roccia compatta nelle sue componenti reale e immaginaria a 1 MHz

Links e approfondimenti

1. Ricevitore Perseus: <http://www.microtelecom.it/perseus/>
2. Componenti SMD - <http://it.wikipedia.org/wiki/SMD>
3. Costante cosmologica - http://it.wikipedia.org/wiki/Costante_cosmologica
4. Broadcasting - <http://it.wikipedia.org/wiki/Broadcasting>
5. Seismogenic layer - http://en.wikipedia.org/wiki/Seismogenic_layer
6. Progetto Interreg IV – Italia – Slovenia - <http://www.ita-slo.eu/ita/>
7. Precursori sismici - <http://it.wikipedia.org/wiki/Terremoto#Prevedibilit.C3.A0>
8. OGS (Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste) - <http://www.ogs.trieste.it/>
9. Radon - <http://it.wikipedia.org/wiki/Radon>
10. FESN – <http://www.fesn.org>
11. Protezione Civile di Pozzuolo del Friuli – <http://www.protezionecivilepozzuolo.it>
12. Amministrazione comunale di Pozzuolo – <http://www.comune.pozzuolo.udine.it>
13. Progetto SDT - http://www.ari.it/index.php?option=com_content&view=article&id=845%3Aparte-il-progetto-sdt&catid=143%3Aprogettiscientifici&Itemid=130&lang=it
14. ARI – Associazione Radioamatori Italiani – www.ari.it
15. Radiofrequenza - <http://it.wikipedia.org/wiki/Radiofrequenza>
16. Stazioni VLF Monte Giogo e Sassalbo http://www.sassalboproject.com/dettaglio_news.php?id=83
17. Gruppo Scatter del Monte del Giogo - <http://www.ik4mgv.it/giogo1.htm>
18. Rocce sedimentarie - http://it.wikipedia.org/wiki/Roccia_sedimentaria
19. Piezoelettricità - <http://it.wikipedia.org/wiki/Piezoelettricit%C3%A0>
20. Porfidi - <http://it.wikipedia.org/wiki/Porfido>
21. Graniti - <http://it.wikipedia.org/wiki/Granito>
22. Polarizzazione elettrica - http://it.wikipedia.org/wiki/Polarizzazione_elettrica
23. Zero assoluto - http://it.wikipedia.org/wiki/Zero_assoluto
24. Energia di punto zero - http://it.wikipedia.org/wiki/Energia_di_punto_zero
25. Condensato di Bose – Einstein – http://it.wikipedia.org/wiki/Condensato_di_Bose-Einstein
26. Legge della termodinamica - <http://it.wikipedia.org/wiki/Termodinamica>
27. Le Scienze – Quaderni n. 125 - Aprile 2002 – Dall'atomo al quark di Enrico Bellone – pagg. 80 e seg.
28. Moto vibrazionale delle molecole - http://ww2.unime.it/dipfisica/Tesine/La_determinazione_della_struttura_molecolare.htm
29. Gradiente geotermico - http://it.wikipedia.org/wiki/Gradiente_geotermico
30. Ipocentri di eventi sismici - <http://it.wikipedia.org/wiki/Ipocentro>
31. Faglie - <http://it.wikipedia.org/wiki/Faglia>
32. Orbitale atomico - http://it.wikipedia.org/wiki/Orbitale_atomico
33. Lacuna - [http://it.wikipedia.org/wiki/Lacuna_\(fisica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Lacuna_(fisica))
34. Drogaggio - <http://it.wikipedia.org/wiki/Drogaggio>
35. Diodi - <http://it.wikipedia.org/wiki/Diodo>
36. Transistor - <http://it.wikipedia.org/wiki/Transistor>

37. Fase - [http://it.wikipedia.org/wiki/Fase_\(segnali\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Fase_(segnali))
38. A. Nardi, M. Caputo - Monitoring the mechanical stress of rocks through the electromagnetic emission produced by fracturing - International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 940–945
- A. NARDI AND M. CAPUTO - A perspective electric earthquake precursor observed in the Apennines - Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 47, n. 1-2, pp. 3-12; March-June 2006
39. Risonanza - [http://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_\(fisica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_(fisica))
40. Dilatanza - <https://icamo.wordpress.com/ingegneria/anno%20A0iii/fond-di-geotecnica/>

Elenco delle figure riprodotte nell'articolo e fonti

Fig. 1 - <http://www.universal-radio.com/catalog/commrxvr/0122.html>

Fig 2 - http://www.geologia.com/area_raga/rocce/metamorfiche/metamorfiche.html

Fig. 3 -
<http://ssw.interfree.it/i%20semiconduttori/TECNOLOGIA%20DEI%20SEMICONDUTTORI.htm>

Fig. 4 - A. NARDI AND M. CAPUTO - A perspective electric earthquake precursor observed in the Apennines - Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 47, n. 1-2, pp. 3-12; March-June 2006

Fig. 5 - <http://blogs.physicstoday.org/newspicks/2010/01/more-science-from-the-haiti-ea.html>

Fig. 6 – R. Romero and V. Lehtoranta, 22 November 1999 -
<http://harp gamer.com/harpforum/lofi version/index.php?t3527.html>

Fig. 7 - Blohm et al. 1977 – C. Thanassoulas - Short term earthquakes prediction – H. Dounias & Co. – Greece

Fig. 8 – 10 - Università degli studi Roma 3 - Metodologie Elettromagnetiche per la geofisica Proprietà elettromagnetiche di suoli e rocce (III) - Anno Accademico 2009/2010 - Docente: Elena Pettinelli - Dipartimento di Fisica “Edoardo Amaldi”

Fig. 9 – Vedi nota in figura

Esempi di articoli scientifici relativi a rilevazioni elettromagnetiche in precedenza a eventi sismici

1. Sergey Prosvimin – Magnetic field polarimetry of seismic sources – MMET '98 Proceedings
2. W. Van Bise and E.A. Rauscher – Detection and analysis of precursor magnetic signatures preceding the Turkey and Greek seismicity – Geophysical Research Abstracts – Vol. 5, 14637, 2003 – European Geophysical Society 2003
3. Y. Ida, M. Hayakawa, A. Adalev, and K. Gotoh - Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the 1993 Guam earthquake . Nonlinear Processes in Geophysics (2005) 12: 157-162 – European Geosciences Union
4. V. N. Pham, Robert J. Geller – Comment on “Signature of pending earthquake from electromagnetic anomalies” by K. Eftaxias et al. – Geophysical Research Letters Vol. 29, NO., 18 1871
5. Yurdanur Tulunay, Ersin Tulunay and Colin Price - Earthquake precursor of space in the Ultra Low Frequency (ULF) range.
6. Masashi Hayakawa, Tetsuya Itoh, Katsumi Hattori, Kiyohumi Yumoto - ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996 - Geophysical Research Letters Vol. 27 NO. 1 Pages 1531-1534 May 15, 2000.
7. D. Enescu - Geomagnetic anomalies . Possible earthquake precursors – Linked with 2004 significant seismic activity in Vrancea (Romania) – Earth Physycs – July 2005
8. Thanassoulas P. C. – Pre-Seismic Electrical Signals (SES) generation and their relations to the lithospheric tidal oscillations K2, S2, M1 (T = 12 hours / 14 days).

Wikipedia – Contenuti delle voci riportate in queste pagine

N.B. considerata la possibilità che questo importante servizio possa essere oscurato in un prossimo futuro, si riporta di seguito il contenuto testuale delle voci citate in questo articolo per un primo approfondimento a disposizione del lettore, nella speranza che wikipedia continui a rimanere libera e a disposizione di tutti coloro che vogliono conoscere e approfondire concetti e conoscenze.

Componenti SMD - <http://it.wikipedia.org/wiki/SMD>

Surface mount technology

La **surface mount technology** (termine mutuato dall'[inglese](#) che in [italiano](#) significa "tecnologia a montaggio superficiale"), in [sigla SMT](#), è una [tecnica](#) utilizzata in [elettronica](#) per l'assemblaggio di un [circuito stampato](#) prevedente l'applicazione dei [componenti elettronici](#) sulla sua superficie senza la necessità di praticare dei fori come invece richiesto nella tecnica classica.

I componenti costruiti secondo le specifiche SMT sono definiti [surface mounting device](#), in sigla SMD.

Caratteristiche

La soluzione SMT offre diversi vantaggi:

- notevole riduzione delle dimensioni dei componenti e quindi minori dimensioni degli apparati;
- massima automazione e velocizzazione delle procedure di montaggio;
- nessuno scarto dovuto alla necessità di taglio dei [reofori](#) eccedenti;
- i componenti possono essere montati su entrambe le facce del circuito stampato.

Un esempio di questa soluzione è il package [TQFP](#), che sfrutta tutti questi vantaggi.

Storia

La tecnologia SMD è stata sviluppata negli [anni sessanta](#) e si è diffusa alla fine degli [anni ottanta](#), grazie anche al lavoro pionieristico svolto all'[IBM](#). I componenti sono stati dotati di piccoli terminali (o estremità) metalliche per saldarli direttamente al [circuito stampato](#). Sul [circuito stampato](#) viene prima depositata una pasta saldante nei punti dove verranno appoggiati i terminali dei componenti SMD, quindi i componenti vengono montati tramite macchinari Pick and Place, ed infine il tutto è passato in un forno ventilato avente un preciso profilo termico, con delle fasi prestabilite secondo dei parametri temperatura-tempo

Costante cosmologica - http://it.wikipedia.org/wiki/Costante_cosmologica

La costante cosmologica (usualmente indicata con la lettera greca lambda: Λ) è il termine aggiunto da Albert Einstein alle sue equazioni della relatività generale allo scopo di ottenere una soluzione statica per il modello cosmologico.

Grazie alle nuove scoperte rese possibili dal telescopio Hubble il ruolo della costante cosmologica è mutato (essa spiega oggi l'accelerazione dell'evoluzione dell'universo), ma la formulazione dell'equazione di Einstein è rimasta invariata.

Definizione

Le [equazioni di campo](#), nella versione "semplice", hanno la forma

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

dove \mathcal{G} è il tensore che descrive la curvatura dello spazio, G la [costante gravitazionale](#) e T è il [tensore stress-energia](#). La modifica proposta da Einstein per soddisfare le condizioni di stabilità fu l'inserimento a sinistra di un termine Λ che compensasse la tendenza a contrarsi (o ad espandersi in altri modelli) dello spazio:

$$\mathcal{G}_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

dove g è la metrica dello [spaziotempo](#). Essendo posta a sinistra, la costante veniva intesa come una proprietà dello spaziotempo.

Necessità di una costante per avere soluzioni statiche

Nel [1917](#), Albert Einstein formulò il primo modello [cosmologico relativistico](#). Questo modello è caratterizzato da uno [spazio](#) di [volume](#) finito ma illimitato; pur non essendo possibile visualizzare un tale spazio chiuso a [tre](#) dimensioni, possiamo ricorrere all'analogia con il caso bidimensionale della [superficie](#) di una [sfera](#). Un tale universo finito è destinato a crollare su sé stesso a causa della propria [gravità](#). Einstein, ritenendo che l'[universo](#) dovesse essere globalmente statico, aveva bisogno di una [forza repulsiva](#) per impedirne il collasso. Egli si rese conto che, per esprimere le [equazioni](#) della [relatività](#) nella loro forma più generale, doveva introdurre una costante aggiuntiva la quale, se maggiore di [zero](#), funge in termini [newtoniani](#) proprio da forza repulsiva e che, assumendo un valore critico, compensa l'implosione dell'universo. Fu per questa ragione che venne introdotto Λ .

Lavori successivi mostrarono però che il modello di Einstein non è stabile: qualunque minima perturbazione ne provoca o il collasso o l'espansione. Inoltre, le osservazioni di [Hubble](#) convinsero gli [astronomi](#), a partire dal [1929](#), che l'universo è in espansione, e il modello di Einstein fu abbandonato dal suo stesso autore.

Costante cosmologica come energia del vuoto

Anche i modelli in espansione possono però includere la costante cosmologica, il cui significato fisico è oggi associato all'[energia del vuoto](#). Le osservazioni mostrano che l'espansione dell'universo sta [accelerando](#), ed indicano in effetti la presenza di una costante cosmologica positiva. Il valore osservato è maggiore di zero, ma enormemente più piccolo di quello che ci si aspetterebbe dal punto di vista della fisica teorica, circa 10^{-120} .

A differenza della costante di Einstein, si ipotizza che questo contributo sia dovuto alla [densità d'energia](#) del vuoto, ρ_{vac} , e si indica in questa maniera:

$$\mathcal{G}_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} + \rho_{vac} g_{\mu\nu})$$

La relazione fra la densità ρ_{vac} e la costante cosmologica è la seguente:

$$\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} \rho_{vac}$$

Ricerca di prove empiriche

La natura della costante cosmologica è dunque un problema ancora aperto, e rappresenta uno degli enigmi più profondi coi quali si confronta la [scienza](#) contemporanea.

Negli anni 2007 e 2008, sono state effettuate dal satellite [Chandra](#) della [Nasa](#) molte osservazioni nello spettro dei [raggi X](#) sull'[ammasso](#) di galassie Abel 85, distante 740 milioni di anni luce dalla Terra. Queste osservazioni hanno permesso di estendere gli studi sull'[energia oscura](#), rivelando come la presenza di questa forma di energia quantistica (legata alla ancora non determinata [materia oscura](#)) possa influire sulla struttura dello [spazio tempo](#) e avvalorare (quanto meno dal punto di vista matematico) la presenza della costante cosmologica intuuta da Einstein ma mai precedentemente dimostrata empiricamente.

Broadcasting - <http://it.wikipedia.org/wiki/Broadcasting>

Per **broadcasting** (corrispondenti alle espressioni italiane: **radioaudizione circolare** oppure **radiodiffusione circolare**) si intende la trasmissione di informazioni da un sistema trasmittente ad un insieme di sistemi riceventi non definito a priori.

L'esempio più classico è costituito da un trasmettitore [radio](#) di grande potenza e da un gran numero di ricevitori montati nelle automobili o nelle case. In questo caso, tutti i ricevitori situati nell'area di copertura del trasmettitore riceveranno il segnale, e il trasmettitore non potrà sapere esattamente con chi ha comunicato.

La trasmissione broadcasting è unidirezionale. Le informazioni sono inviate dal trasmettitore ai ricevitori, senza canale di ritorno e senza sicurezza che le stesse riescano ad essere consegnate.

In opposizione alle comunicazioni broadcasting, ci sono le comunicazioni punto-punto o bidirezionali.

Nel mondo della [radio](#) e nella [televisione](#), il termine broadcasting indica anche il livello di qualità richiesto per trasmissioni commerciali a grande diffusione, e gli strumenti professionali utilizzati per ottenerlo.

Nelle [reti di calcolatori](#), il termine ha un significato simile: un [pacchetto](#) inviato ad un indirizzo di tipo broadcast verrà consegnato a tutti i [computer](#) collegati alla rete (ad esempio, tutti quelli su un segmento di rete [ethernet](#), o tutti quelli di una [sottorete IP](#)).

Seismogenic layer - http://en.wikipedia.org/wiki/Seismogenic_layer

The **seismogenic layer** is the range of depths within the [crust](#) or [lithosphere](#) over which most [earthquakes](#) are initiated. Typically in [continental crust](#) this is in the uppermost 15 km. The base of this layer represents the downwards change in deformation mechanism from elastic and frictional processes associated with brittle faulting to a generally [aseismic](#) zone where [ductile creep](#) becomes the dominant process. The location of this change in deformation style is sometimes referred to as the [Brittle-ductile transition zone](#).

Precursori sismici - <http://it.wikipedia.org/wiki/Terremoto#Prevedibilit.C3.A0>

Alcuni terremoti, specialmente i più forti, sono anche accompagnati, preceduti o seguiti da fenomeni naturali insoliti detti *precursori sismici* come: lampi o bagliori ([luci telluriche](#)); modificazioni improvvise del [campo magnetico](#), [elettrico](#) o della [radioattività](#) locale (emissione di [radon](#)); interferenze nelle comunicazioni radio; nervosismo degli animali; variazione del livello delle falde o delle acque costiere; attività vulcanica. Tutte queste manifestazioni hanno trovato riscontro nelle osservazioni e nelle testimonianze e sono state studiate e in parte confermate dalla [ricerca scientifica](#) che è giunta alla spiegazione di ognuna di esse, anche se, in mancanza di consenso unanime, non costituiscono di fatto misure effettivamente riconosciute e adottate sul fronte della previsione.

Il [terremoto di Haicheng](#) del [4 febbraio 1975](#) è stato storicamente il primo e unico terremoto previsto con tali tecniche^[4], ma in quel caso i precursori sismici di natura geologica furono talmente intensi e regolarmente progressivi da non lasciare alcun dubbio sulla prossimità e imminenza dell'evento.

Già dall'Ottocento sono state inoltre studiate le correlazioni tra le variazioni dell'altezza della [falda idrica](#) e della [gravità](#) locale, oltre che dell'emissione di [radon](#), ma purtroppo allo stato attuale delle conoscenze non sono ancora stati elaborati modelli che permettano di evidenziare segnali utili alla previsione efficace di un terremoto o delle sue possibili caratteristiche, intensità e localizzazione spaziotemporale.

In particolare il radon si forma dal [decadimento radioattivo](#) del [radio](#) ed essendo un [gas nobile](#) non si combina con gli altri [elementi](#) e [composti chimici](#); pertanto gran parte del radon che si forma all'interno delle rocce rimane intrappolato in esse. Se improvvisamente si verificano movimenti, fessurazioni, compressioni e distensioni di rocce, come avviene durante o immediatamente prima di un terremoto, il radon contenuto in profondità affiora sulla superficie terrestre, dove peraltro è già presente in una certa [concentrazione](#), aumentando la concentrazione locale con picchi improvvisi o i cosiddetti "spifferi"^[5]. Nella speranza di poter realizzare un sistema di previsione a breve termine e affidabile dei terremoti, vari studi sono in corso; per tale ricerca si utilizza una rete di rivelatori di radon, opportunamente distribuiti sulla superficie delle zone interessate.

La prevedibilità dei fenomeni sismici è stata oggetto in Italia di discussioni e polemiche fuori dell'ambito scientifico, a seguito del [Terremoto dell'Aquila](#) del [6 aprile 2009](#); in occasione del tragico evento, la stampa riportò con enfasi la notizia secondo la quale [Giampaolo Giuliani](#), un tecnico di laboratorio dell'[INAF](#), nelle settimane precedenti il sisma aveva sostenuto l'ipotesi dell'imminenza di una scossa disastrosa; questa si sarebbe verificata, a suo dire, in marzo, a grandi linee in quella stessa regione; egli basò la sua analisi sull'aumento improvviso di emissioni di [Radon](#)^[6], utilizzando però strumentazioni e metodologie previsionali che non sono state ritenute rigorosamente valide dalla comunità scientifica.

Un'altra ipotesi per la previsione di un terremoto fu quella proposta da [Raffaele Bendandi](#), uno pseudo-scienziato autodidatta, secondo il quale i terremoti come le maree sono dovuti all'influenza della Luna e degli altri pianeti sulla crosta terrestre.^[7] Tale tesi è stata però sempre smentita dagli studi ufficiali nel campo.

Sullo studio dei precursori sismici di origine elettromagnetica si sta attivamente impegnando l'Associazione Radioamatori Italiana (ARI) predisponendo stazioni di ascolto delle emissioni elettromagnetiche in bassa frequenza ELF (Extremely Low Frequency).^{[8][9][10]}

Anche il monitoraggio dell'eventuale [sciame sismico](#) prima di un *mainshock* spesso non sembra portare a risultati concreti in termini di previsione in quanto la stragrande maggioranza degli sciami sismici evolvono senza produrre catastrofi ovvero dissipandosi più o meno lentamente nel tempo secondo la [Legge di Omori](#).^[senza fonte]

Attualmente alcuni [modelli fisici](#) sperimentali di previsione sismica di natura statistica si sono rivelati abbastanza efficaci nel prevedere alcune sequenze di *aftershock*, ma abbastanza deludenti nel prevedere il *mainshock*^[11].

Allo stadio attuale della ricerca sismologica i risultati più concreti per la previsione dei terremoti si hanno dunque per via [statistica](#) nel lungo periodo ovvero consultando mappe di pericolosità che tengono conto dei tempi di ritorno di un sisma in un dato territorio calcolandone dunque la [probabilità](#) di occorrenza. Tuttavia l'intervallo di tempo in cui si ritiene probabile il verificarsi di un sisma è piuttosto esteso, anche decine di anni, rendendo vano ogni tentativo ragionevole di prevenzione tramite evacuazione delle popolazioni.

Esistono tuttavia rilevanti voci fuori dal coro che ritengono possibile la previsione di un terremoto sia attraverso precursori sismici come il radon in alcuni casi sia attraverso raffinati modelli di previsione statistica a medio termine^[12]

Prevenzione

Se all'atto pratico la previsione esatta di un sisma è, allo stadio attuale della ricerca scientifica, ancora lontana, il rimedio più ragionevole e saggio contro i danni materiali ed umani dei terremoti è rappresentato dalla *protezione attiva* ovvero dall'uso di efficaci tecniche *antisismiche* di costruzione di edifici proprie dell'[ingegneria sismica](#) come ad esempio l'[isolamento sismico](#): queste tecniche allo stadio attuale sono in grado di minimizzare i danni anche di terremoti estremamente potenti e sono diffusamente utilizzate in alcune delle aree più sismiche al mondo come il [Giappone](#).

Per individuare zone a significativo [pericolo sismico](#) e a conseguente [rischio sismico](#) si fa usualmente ricorso a studi di sismologia storica e [paleosismologia](#) e a tecniche di [microzonazione sismica](#) fornendo relative mappe di rischio, mentre per valutare gli effetti di un sisma si può ricorrere a tecniche di [simulazione](#) (vedi [simulazione di terremoto](#)).

Studi e credenze

- Durante la [Guerra fredda](#), le onde P sono state studiate per tenere sotto controllo le nazioni che praticavano esperimenti nucleari. Ognuno dei due blocchi studiava i progressi nucleari del blocco contrapposto, grazie all'utilizzo dei sismometri, al punto che i [test nucleari](#) (sotterranei o in atmosfera) furono usati sia dagli [USA](#) sia dall'[URSS](#) come una sorta di *avvertimento* — o *comunicazione indiretta* — nei confronti del nemico.
- La [Chiesa cattolica](#) venera [Sant'Emidio](#) come protettore dal terremoto.

Radon - <http://it.wikipedia.org/wiki/Radon>

Il **radon** (o **rado**, precedentemente **niton**) è l'[elemento chimico](#) che nella [tavola periodica](#) viene rappresentato dal simbolo **Rn** e [numero atomico](#) 86.

Scoperto nel 1898 da [Pierre](#) e [Marie Curie](#), è un [gas nobile](#) e [radioattivo](#) che si forma dal decadimento del [radio](#) (con espulsione di un nucleo di [elio](#)), generato a sua volta dal decadimento dell'[uranio](#).

Il radon è un gas molto pesante, pericoloso per la salute umana se inalato. L'[isotopo](#) più stabile, il ²²²Rn ha una vita media di 3,8 giorni e viene usato in [radioterapia](#). Uno dei principali fattori di rischio del radon è legato al fatto che accumulandosi all'interno di abitazioni diventa una delle principali cause di [tumore al polmone](#)^[1]. Si stima che sia la causa di morte per oltre 20.000 persone nella sola [Unione Europea](#) ogni anno ed oltre 3.000 in Italia. [Polonio](#) e [bismuto](#) sono prodotti, estremamente tossici, del [decadimento](#) radioattivo del radon.

Caratteristiche principali

Il radon è un elemento chimicamente inerte (in quanto [gas nobile](#)), naturalmente radioattivo. A temperatura e pressione standard il radon è inodore e incolore. Nonostante sia un gas nobile alcuni esperimenti indicano che il [fluoro](#) può reagire col radon e formare il fluoruro di radon. Il radon è solubile in acqua e poiché la sua concentrazione in atmosfera è in genere estremamente bassa, l'acqua naturale di superficie a contatto con l'atmosfera (sorgenti, fiumi, laghi...) lo rilascia in continuazione per volatilizzazione anche se generalmente in quantità molto limitate. D'altra parte, l'acqua profonda delle falde, può presentare una elevata concentrazione di ²²²Rn rispetto alle acque superficiali. In Italia l'ente preposto alla misura del radon nelle abitazioni e nei luoghi chiusi sono le [ARPA](#), a cui si può fare riferimento per adottare provvedimenti di bonifica nei casi di superamento dei limiti di legge.

Applicazioni

Il radon viene a volte prodotto da alcuni ospedali per uso terapeutico. Viene pompato il suo gas da una sorgente di [radio](#) e immagazzinato in piccolissimi tubi chiamati semi o aghi e utilizzato poi per la [radioterapia](#). A causa della sua rapida dispersione in aria, il radon viene utilizzato in ricerche idrologiche che valutano le interazioni tra acqua profonda, ruscelli e fiumi.

Ci sono alcune ricerche che studiano come poter utilizzare la misurazione dell'incremento di emissione di radon come precursore sismico^[2], in quanto la sua emissione in atmosfera è fortemente influenzata dalla conformazione geologica, e in caso di variazioni di pressione o di movimenti delle faglie si è notata una variazione delle emissioni del gas. Ad oggi però in letteratura scientifica non risultano studi sul radon come precursore sismico che ne dimostrino un livello di affidabilità tale da renderne possibile l'uso nell'ambito della protezione civile.^[senza fonte]

In [Italia](#) l'impiego del radon come precursore sismico è stato al centro di una polemica nell'ambito delle vicende legate al [terremoto dell'Aquila del 2009](#) fra [Giampaolo Giuliani](#), tecnico del [laboratorio nazionale di fisica del Gran Sasso](#), sostenitore di tali tecniche e altri, scettici, tra cui [Guido Bertolaso](#), allora direttore della protezione civile italiana.^[3]

Radon e salute

Poiché il radon è un gas radioattivo, può risultare cancerogeno se inalato, in quanto emettitore di [particelle alfa](#). La principale fonte di questo gas risulta essere il terreno (altre fonti possono essere in misura minore i materiali di costruzione, specialmente se di origine vulcanica come il [tufo](#) o i [graniti](#) e l'acqua), dal quale fuoriesce e si disperde nell'ambiente, accumulandosi in locali chiusi ove diventa pericoloso. Si stima che sia la seconda causa di tumore al [polmone](#) dopo il [fumo di sigaretta](#)^{[4][5]}, ed alcuni studi evidenziano sinergie fra le due cause^[6].

L'[isotopo](#) più significativo per la dose dell'uomo è il Radon 222, che ha un periodo di dimezzamento di 3.82 giorni. Esso deriva, per decadimento alfa, dalla catena di decadimento dell'Uranio 238 e del Radio 226.

Il radon, in generale, ha una grande volatilità e inerzia chimica: per cui, difficilmente reagisce con altri elementi, e tende a risalire in superficie.

Il radon e i suoi discendenti nella catena di decadimento a loro volta emettono [particelle alfa](#) e un'elevata densità di radiazioni ionizzanti. I livelli di guardia sono 150 Bq/m^3 , corrispondenti a circa 4 pCi/l.

Più alta è la [concentrazione](#) nell'ambiente più alto è il rischio di contrarre il [tumore](#). Un metodo immediato per proteggersi dall'accumulo di questo gas è l'aerazione degli ambienti, soprattutto nei casi in cui questi siano interrati o a contatto diretto col terreno. Questa tecnica risulta spesso però insufficiente o inefficace e, specialmente nei mesi invernali dispendiosa in termini di riscaldamento dei locali. La prima cosa da fare, nei casi in cui si sappia di essere in una zona a rischio, è di effettuare delle misurazioni di concentrazione presso la propria abitazione atte a determinare se questo problema esiste veramente. Infatti non è sufficiente sapere che edifici vicini al nostro sono contaminati da radon poiché l'emissione di questo gas dipende da numerosissimi fattori, difficilmente determinabili a priori.

Secondo alcuni il radon sarebbe una possibile ipotesi per spiegare scientificamente la [maledizione di Tutankhamon](#)^[7], anche se questa ipotesi risulta essere estremamente improbabile e non avvalorata da alcun riscontro scientifico.

La "radon terapia"

Nonostante l'accertata pericolosità del radon, è singolare che in Italia alcune persone sostengano che l'inalazione di radon abbia virtù terapeutiche per le vie respiratorie. Questo avviene in prevalenza nei centri termali che in passato vantavano il "pregio" di avere acque radioattive in cui è disciolto radon in varia concentrazione. Sorgenti con queste caratteristiche più o meno spiccate sono, ad esempio, le terme di Lurisia ([Piemonte](#)) e le terme di Merano^[8] ([Alto Adige](#)). Nessuno studio scientifico ha dimostrato l'efficacia di simili terapie, mentre il danno da basse concentrazioni di radon è bene accertato da migliaia di lavori scientifici da più di vent'anni.^[9]

Thoron [\[modifica\]](#)

Il Thoron rappresenta l'isotopo del Radon con peso atomico 220. Può risultare anch'esso dannoso per la salute umana in quanto, come il ^{222}Rn è un emettitore alfa e si presenta in stato di gas. Poiché il tempo di decadimento è di circa 55 secondi si presuppone che la sua presenza nelle abitazioni sia mediamente minore rispetto al ^{222}Rn in quanto il contributo fornito dal suolo (principale sorgente del gas) viene notevolmente ridotto. In presenza però di rocce o [materiali da costruzione](#) che contengano elevati quantitativi di [Torio](#) si possono rilevare significativi accumuli di Thoron. Attualmente in Italia esistono ancora pochi studi atti a determinare la concentrazione di Thoron all'interno delle abitazioni^[10]. Gli altri isotopi, avendo una vita media estremamente più breve, non sono considerati pericolosi per la salute umana.

La misurazione [\[modifica\]](#)

Per determinare la concentrazione di radon presente in un locale ci si può rivolgere all'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente [ARPA](#) della propria regione oppure ad aziende private che svolgono questo tipo di misure tramite appositi rivelatori. Gli strumenti di misura vanno posizionati preferibilmente nei locali dove si soggiorna più a lungo (tipicamente le camere da letto o il soggiorno). Poiché la concentrazione di radon varia in funzione della distanza dal terreno, ma anche nel corso della giornata o con il variare delle stagioni si utilizzano generalmente dei cosiddetti rivelatori passivi che forniscono dei valori medi in un periodo di tempo sufficientemente lungo (dai tre ai sei mesi). Inoltre, poiché specialmente nel periodo invernale l'abitazione aspira aria - che potrebbe essere ricca di radon - dal sottosuolo per differenza di pressione tra l'interno e l'esterno (effetto camino) e si ha una minore aerazione, è preferibile effettuare le misurazioni in questa stagione.

La bonifica degli edifici inquinati

Nelle situazioni in cui dopo aver effettuato una misurazione si dovesse rivelare una concentrazione di radon superiore ai livelli di riferimento è opportuno effettuare degli interventi di bonifica. Ci sono interventi di facile realizzazione e poco invasivi per gli edifici ed altri via via sempre più pesanti. Alcuni interventi sono volti a limitare o eliminare i punti di infiltrazione, ma di solito si consiglia sempre di accompagnare questi rimedi con metodi di depressurizzazione del suolo per impedire la risalita del gas, in quanto i primi da soli risultano generalmente insufficienti. Un rimedio immediato, anche se non sempre efficace, consiste nel continuo ricambio d'aria degli ambienti. Una corretta quanto continua ventilazione può contrastare gli

accumuli del gas che tendono a far aumentare la concentrazione di radon negli ambienti. Oggi è possibile effettuare uno screening autonomo dei propri locali attraverso dei dosimetri economici.

Normativa italiana

In Italia non c'è ancora una normativa per quanto riguarda il limite massimo di concentrazione di radon all'interno delle abitazioni private. Si può fare riferimento ai valori raccomandati dalla [Comunità Europea](#) di 200 Bq/m³ per le nuove abitazioni e 400 Bq/m³ per quelle già esistenti. Una normativa invece esiste per gli ambienti di lavoro ([Decreto legislativo](#) n° 241, del 26/05/2000) che fissa un livello di riferimento di 500 Bq/m³. Per le scuole non vi sono indicazioni ma si ritiene per il momento di poter assimilare una scuola ad un ambiente di lavoro.

Molti paesi hanno adottato valori di riferimento più bassi: [Stati Uniti](#): 150 Bq/m³, [Regno Unito](#): 200 Bq/m³, [Germania](#): 250 Bq/m³ La [Svizzera](#) ha invece optato per un valore limite prescrittivo di 1000 Bq/m³ e un valore operativo (raccomandato) di 400 Bq/m³, mentre le scuole, per la presenza di bambini e giovani, sono state considerate alla stregua di locali abitativi.

In ogni caso i valori medi misurati nelle regioni italiane variano da 20 a 120 Bq/m³^[11].

Testi sul radon

- Massimo Moroni, *Il Radon*, Editrice il Sole24ore, Milano 2001

Radiofrequenza - <http://it.wikipedia.org/wiki/Radiofrequenza>

La **radiofrequenza**, nota anche con l'**acronimo RF**, indica generalmente un [segnale elettrico](#) o un'[onda elettromagnetica](#) ad alta [frequenza](#) che si propaga nell'etere o in un [cavo coassiale](#). Viene spesso utilizzato per specificare circuiti o sistemi [elettronici](#) che elaborano e gestiscono segnali elettromagnetici ad alta frequenza (es. "amplificatore a RF", "stadio RF"). Nel caso di segnali via etere, con radiofrequenza si intendono onde elettromagnetiche di frequenza compresa tra qualche [kHz](#) e 300 [GHz](#). Le [lunghezze d'onda](#) variano da 100 km (a 3 kHz) a 1 mm (a 300 GHz).

Frequenze

Nome	Simbolo	Estensione	Lunghezza d'onda	Applicazioni
Extremely low frequency	ELF	da 3 a 30 Hz	da 10.000 km a 100.000 km	comunicazioni tra sottomarini
Super low frequency	SLF	da 30 a 300 Hz	da 1.000 km a 10.000 km	distribuzione di energia elettrica (50 hertz e 60 hertz)
Ultra low frequency	ULF	da 300 Hz a 3 kHz	da 100 a 1000 km	rilevamento dei minerali
Very low frequency	VLF	da 3 a 30 kHz	da 10 a 100 km	da 20 Hz a 20 kHz
Low frequency	LF	da 30 a 300 kHz	da 1 a 10 km	trasmissioni internazionali , navigational beacons , lowFER

Medium frequency	MF	da 300 a 3000 kHz	da 100 m a 1 km	navigational beacons , trasmissioni radio AM , comunicazioni marittime e aeronautiche
High frequency	HF	da 3 a 30 MHz	da 10 a 100 m	shortwave , banda cittadina
Very high frequency	VHF	da 30 a 300 MHz	da 1 a 10 m	trasmissioni radio FM , trasmissioni televisive , aviation
Ultra high frequency	UHF	da 300 a 3000 MHz	da 10 a 100 cm	trasmissioni televisive , telefono cellulare , reti wireless , forni a microonde
Super high frequency	SHF	da 3 a 30 GHz	da 1 a 10 cm	reti wireless , radar , satellite links.
Extremely high frequency	EHF	da 30 a 300 GHz	da 1 a 10 mm	microonde data links, radioastronomia , remote sensing , sistemi d'arma avanzati, security scanning

Rocce sedimentarie - http://it.wikipedia.org/wiki/Roccia_sedimentaria

Le **rocce sedimentarie** sono un tipo di [rocce](#) formate dall'accumulo di [sedimenti](#) di varia origine, derivanti in gran parte dalla degradazione ed erosione di rocce preesistenti, che si sono depositati sulla superficie terrestre. Tale terminologia deriva dal latino *sedere*, depositarsi. La disciplina di studio e ricerca è la [sedimentologia](#), e i suoi studiosi sono detti [sedimentologi](#).

Processo sedimentario

Le rocce sedimentarie sono quindi il risultato di un complesso di fenomeni, chiamato processo sedimentario, che si compone di [erosione](#) da parte degli agenti esogeni, trasporto da parte di fluidi (acqua, vento, ghiaccio), [sedimentazione](#) in [ambiente sedimentario](#) marino, continentale o misto e infine [diagenesi](#).

Alterazione o Erosione

I sedimenti, di provenienza, composizione e dimensioni assai variabili, sono il risultato dell'alterazione chimico-fisica e talora biologica operata da vari agenti erosivi che insistono sulla superficie terrestre.

I processi fisici che determinano maggiormente l'alterazione di rocce sono principalmente quelli che generano fratture nell'ammasso roccioso originario a causa ad esempio dell'erosione della roccia. A questi fenomeni si aggiunge non di rado l'azione dell'acqua che infiltrandosi nelle fessure e congelando per effetto delle basse temperature, ingrandisce le fratture disgregando di fatto la roccia circostante; questo fenomeno prende il nome di [crioclastismo](#).

Nei climi molto caldi anche l'elevata temperatura può facilitare il processo di disgregazione: gli intensi cicli di forte raffreddamento e riscaldamento nell'arco della giornata generano nel terreno cicli di espansione e di contrazione molto pronunciati, che provocano l'esfoliazione del terreno; questo fenomeno prende il nome di [termoclastismo](#).

I fenomeni chimici, preponderanti soprattutto nel caso di detriti di piccole dimensioni a causa della loro maggiore [superficie specifica](#), sono principalmente causati dall'interazione tra i componenti della roccia e l'acqua e le sostanze in essa disciolte. Un esempio può essere la dissoluzione di [rocce carbonatiche](#) per effetto dell'acqua con elevate percentuali di [anidride carbonica](#).

Trasporto

Il materiale così alterato viene solitamente trasportato lontano dalla sua roccia madre soprattutto attraverso l'azione delle acque dilavanti, dai fiumi e da altri corsi d'acqua, fino a raggiungere un ambiente deposizionale di bassa energia dove può depositarsi per azione gravitativa. Nel caso di materiali solubili la deposizione avviene in soluzione per poi [precipitare](#) successivamente. Spesso (ma non unicamente) tale ambiente è quello marino, dove i materiali vengono redistribuiti sul fondo marino dal [moto ondoso](#), dalle [maree](#) e dalle correnti. Altri agenti di trasporto possono essere localmente il vento (ad esempio in ambiente desertico), così come i ghiacciai, che possono trasportare materiale sedimentario con il loro lento movimento verso valle.

L'acqua è il più importante agente di trasporto e mezzo fisico nel quale avviene la deposizione: molte delle caratteristiche peculiari delle rocce sedimentarie derivano quindi dalla loro deposizione in ambiente subacqueo.

Sedimentazione

La sedimentazione, quando avviene per effetto gravitativo, genera nei detriti una differenziazione in base alle dimensioni dei granuli. Infatti la loro deposizione è strettamente legata alla forza che l'agente di trasporto ha per continuare a trattenerli in sospensione. Un esempio di questa differenziazione della deposizione può essere l'azione di un corso d'acqua che, avendo inizialmente carattere torrentizio, riesce a trasportare detriti di dimensioni anche importanti; andando verso valle perderà parte della sua energia e i primi detriti ad essere sedimentati saranno quelli di dimensioni maggiori, cioè principalmente le ghiaie. Successivamente si andranno a depositare detriti di dimensioni sempre minori in virtù della sempre minore forza del mezzo, quindi sabbie, limi ed argille. I detriti, nell'azione di trasporto, subiscono anche una modifica della loro forma, dovuta alla reciproca abrasione delle particelle in sospensione, risultando così avere forma arrotondata priva di spigoli vivi. Una volta deposti, i sedimenti vanno incontro ai processi di diagenesi, ovvero quel complesso di trasformazioni chimico-fisiche che avvengono una volta avvenuta la sedimentazione. Tali fenomeni in gran parte sono costituiti dalla litificazione, che trasforma i sedimenti in un ammasso roccioso compatto e coerente, formandosi così la dura roccia sedimentaria così come siamo abituati a conoscerla.

Diagenesi

La [diagenesi](#) avviene come risultato combinato di alcuni meccanismi:

- la [compattazione \(o costipamento\)](#), dovuta al carico [litostatico](#) dei sedimenti sovrastanti, che man mano sedimentano, inducendo sia una diminuzione della porosità ed espulsione dell'acqua dagli stessi che un riarrangiamento reciproco della disposizione dei granuli;
- la [cementazione](#): le acque circolanti nei sedimenti (soprattutto i più grossolani come [granulometria](#)) contengono sostanze cementanti naturali, come il carbonato di calcio o l'ossido di silicio, che depositandosi tra i granuli forma un legante naturale (chiamato in geologia "cemento") che unisce saldamente le particelle sedimentarie.

Col termine [litificazione](#) viene indicata la generalità dei risultati della costipazione e cementazione su di un sedimento sciolto.

- Riequilibri [geochimici](#) tra la composizione mineralogica del sedimento e quella dei fluidi permeanti i pori, nelle rocce carbonatiche è possibile ad esempio osservare la [dolomitizzazione](#) di rocce calcaree che consiste essenzialmente in una parziale sostituzione degli atomi di calcio con quelli di magnesio. Variazioni dei valori di [pH](#) e [redox](#) entro il sedimento determinano la deposizione o dissoluzione di alcuni minerali, la genesi di minerali di neoformazioni e la trasformazione di minerali argillosi. In particolare le variazioni del potenziale redox, modificando lo stato di ossidazione del ferro presente nei sedimenti sono responsabili delle colorazioni rossastre o verdastre o violastre di molti sedimenti.

La [Geologia](#) non fa distinzioni tra la natura sciolta e incoerente del materiale sedimentario al momento della sua deposizione e quella invece caratterizzata da durezza e solidità delle rocce sedimentarie che verranno a formarsi alla fine. Infatti, qualsiasi deposito di materiale sedimentario è considerato comunque una roccia, qualsiasi sia il suo stato fisico, anche se i processi fisici e chimici ai quali il sedimento è sottoposto a partire

dalla sua deposizione tendono a convertire il materiale sciolto in quello che comunemente è conosciuto come "[roccia](#)".

Distribuzione e parametri fisici di formazione

Le rocce sedimentarie non erano presenti nella [crosta terrestre](#) primordiale. La copertura superficiale della Terra è costituita per il 75% da rocce sedimentarie, formando nel complesso uno strato assai sottile. In superficie prevalgono nettamente le rocce sedimentarie (75% delle rocce superficiali) in quanto derivano dall'interazione litosfera-idrosfera-atmosfera-biosfera, e rappresentano le associazioni di minerali più stabili in ambiente superficiale. Qui si hanno caratteristiche ambientali diverse da quelle presenti al momento della formazione delle rocce eruttive o metamorfiche: temperature relativamente basse (circa tra 0° e 150°), pressione bassa (al massimo circa 2 kbar), acqua, ossigeno e anidride carbonica in genere molto abbondanti e attività biogena intensa. Le rocce eruttive e metamorfiche tendono dunque a trasformarsi in rocce sedimentarie.

Classificazione delle rocce sedimentarie

Dal tipo di sedimento, e conseguentemente dalle caratteristiche del processo sedimentario, deriva la principale suddivisione delle rocce sedimentarie in:

[Rocce sedimentarie clastiche](#)

Sono formate da frammenti di altre rocce ([clasti](#)) trasportati dal luogo di formazione, modificati più o meno intensamente e infine depositati. All'interno di questa classe le r.s. vengono ulteriormente suddivise in base alla granulometria dei clasti:

- [conglomerati](#) se il diametro è maggiore di 2 mm (i conglomerati si dividono in *brecce* se i clasti hanno spigoli vivi, mentre sono denominati *puddinghe* se hanno spigoli arrotondati)
- [arenarie](#) se il diametro è compreso tra i 2 mm e 1/16 di mm
- [siltiti](#) se il diametro è compreso tra 1/16 di mm e 1/256 di mm
- [argilliti](#) se le dimensioni sono inferiori a 1/256 mm

Talune classificazioni ricomprendono le siltiti all'interno delle argilliti, definendo quest'ultime come rocce sedimentarie clastiche aventi clasti di dimensioni inferiori a 1/16 di mm.

Rocce sedimentarie chimiche

Formate dalla deposizione sul fondo di sali o altri composti chimici disciolti e contenuti nelle acque marine [\[1\]](#), questi sali precipitano, quando la loro concentrazione nell'acqua marina, aumentando per l'evaporazione dell'acqua, supera il valore massimo di saturazione. Spiccano tra queste rocce le [evaporiti](#) rappresentate in gran parte dal [gesso](#) e dalla [salgemma](#). Si annoverano tra queste rocce anche alcuni calcari e dolomie.

[Rocce sedimentarie organogene o biochimiche](#)

Si originano dalla deposizione e successiva cementazione prevalentemente di esoscheletri (o frammenti di essi) di organismi con guscio carbonatico o siliceo. I fondali marini dei mari profondi sono coperti da un fango formato dai gusci di organismi [planctonici](#) microscopici come i [foraminiferi pelagici](#), i [radiolari](#) e le [diatomee](#). Questi fanghi diagenizzati danno origine a rocce come [calcari pelagici](#), [radiolariti](#) e [diatomiti](#).

Al di fuori della classificazione sopra accennata si ricorda anche la [marna](#), una particolare roccia sedimentaria, piuttosto diffusa nelle [serie stratigrafiche](#) sia alpine che appenniniche, composta da una frazione argillosa (quindi clastica) e una frazione calcarea (di origine chimica od organogena).

Altre classificazioni sono presenti in letteratura, come ad esempio quelle di Folk e Dunham. Esse prendono in considerazione, oltre che gli aspetti tessiturali e strutturali, anche aspetti genetici.

Stratificazione e principio di sovrapposizione

Le **rocce sedimentarie** si presentano in natura tipicamente come livelli definiti, chiamati strati, che sono stati depositi l'uno sull'altro dando luogo così alla stratificazione. In una sequenza stratigrafica i singoli strati sono separati tra loro dai piani di strato. Lo strato costituisce **l'unità stratigrafica** elementare e il **corpo sedimentario** elementare.

Il **principio di sovrapposizione**, uno dei più antichi e importanti principi della Geologia, indica che in una serie stratigrafica indisturbata gli strati più profondi sono anche i più antichi, mentre quelli via via sovrapposti sono quelli con età sempre minore, fino ad arrivare agli strati attuali in via di deposizione che sono all'interfaccia sedimento-acqua o sedimento-aria.

Per meglio capire questo importante concetto, si può fare l'esempio di una pila di vecchi giornali. Il più vecchio sarà il giornale alla base della pila (quello che abbiamo letto per primo e che per primo abbiamo depositato nella scatola della carta straccia). L'ultimo, quello odierno, sarà quello visibile in superficie. Scendendo nella pila, come in una perforazione, troveremo date progressivamente più antiche.

Tipi di stratificazione

Anche se lo strato costituisce il corpo sedimentario elementare, generalmente si intende con il termine di **corpo sedimentario** un insieme di più strati, che possono essere variamente organizzati. Le dimensioni dei corpi sedimentari vanno dalla scala dell'affioramento (metri) a quella del bacino (chilometri). L'organizzazione geometrica degli strati all'interno dei corpi sedimentari risente delle condizioni fisiche di sedimentazione e della morfologia preesistente.

Stratificazione piana. Strati orizzontali, tabulari, con limiti ad andamento sub-parallelo. Si depongono prevalentemente per trasporto orizzontale da parte di correnti e per decantazione (in presenza di una paleo-morfologia pianeggiante).

Stratificazione ondulata. Gli strati tendono ad adattarsi alla morfologia preesistente. Tipicamente si depongono per decantazione e tendono a "drappeggiarsi", assumendo uno spessore minore sui rilievi e maggiore negli avvallamenti. Possono deporsi strati ondulati anche per crescita di organismi biocostruttori (coralli, briozoi, spugne, etc.), in ambiente di piattaforma o di scogliera carbonatica.

Stratificazione inclinata. Successioni di strati depositi originariamente su superfici inclinate, sotto l'azione di fenomeni gravitativi o trattivi (correnti). Tipici esempi sono i depositi di fronte deltizia.

Stratificazione incrociata. Successioni di strati inclinati rispetto a superfici di strato principali. Tipici esempi sono i depositi di spiaggia e i depositi di duna eolica.

Strutture sedimentarie

Oggetti e geometrie di dimensioni inferiori o uguali allo strato si definiscono generalmente strutture sedimentarie. Sono tipiche strutture sedimentarie le **lamine**: elementi di dimensioni da millimetriche a centimetriche, determinati da variazioni di composizione, granulometria e orientazione delle particelle costituenti lo strato, che possono avere origine da diversi processi sedimentari. Le lamine derivano principalmente da processi trattivi, come le correnti, da decantazione e da precipitazione di sali in ambiente evaporitico.

Il tipo di organizzazione geometrica interna agli strati (laminazione) può essere determinato in base ai processi fisici predominanti. In base a tale principio è possibile distinguere:

- laminazione prodotta da correnti unidirezionali
- laminazione prodotta da correnti ondulatorie
- laminazione prodotta da alternanza tra processi trattivi e di decantazione
- laminazione prodotta da decantazione

Note

1. [^] Questi sali provengono dall'alterazione delle rocce affioranti sulla superficie terrestre e vengono trasportati nel mare dalle acque fluviali

Piezoelasticità - <http://it.wikipedia.org/wiki/Piezoelasticit%C3%A0>

Un disco piezoelettrico genera una differenza di potenziale quando deformato (la variazione volumetrica è volutamente esagerata in questa rappresentazione)

La **piezoelettricità** (la parola deriva dal [greco](#) *πιέζειν*, premere, comprimere) è la proprietà di alcuni [cristalli](#) di generare una [differenza di potenziale](#) quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei [nanometri](#).

Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, sulle facce opposte, [cariche](#) di segno opposto. Il cristallo, così, si comporta come un [condensatore](#) al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno, viene quindi generata una [corrente elettrica](#) detta **corrente piezoelettrica**. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae.

Dal punto di vista della struttura cristallina, i materiali piezoelettrici hanno normalmente varie configurazioni geometriche equivalenti dal punto di vista dell'energia, cioè della stabilità del sistema, ma orientate diversamente. Ad esempio il titanato di bario (BaTiO_3) ha una cella di forma romboidale che può allungarsi lungo uno qualsiasi dei tre assi principali. Per fargli acquisire proprietà piezoelettriche il materiale viene riscaldato e immerso in un campo elettrico in modo da farlo [polarizzare](#) e raffreddare. Alla fine del processo il materiale ha tutte le celle deformate nella stessa direzione; è importante notare che solo lungo questa direzione si hanno proprietà piezoelettriche. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae lungo un asse determinato provocando una vibrazione anche violenta. L'espansione volumetrica è facilmente pilotabile ed è strettamente dipendente dalla stimolazione elettrica.

Applicazioni industriali, consumer e scientifiche

La caratteristica di produrre una differenza di potenziale in seguito alla compressione ha diverse applicazioni industriali. La più comune riguarda i normali [accendigas](#) da cucina, dove un cristallo sottoposto manualmente a pressione tramite un tasto fa scoccare una [scintilla](#) senza bisogno di [pile di alimentazione](#). L'invenzione dell'accendigas piezoelettrico da cucina (Flint) risale al 1968 per opera di un ingegnere friulano, Lisio Plozner, fondatore della Bpt (Brevetti Plozner Torino), azienda attiva ancor oggi nella ricerca di prodotti e soluzioni per il miglioramento del comfort abitativo.

I materiali piezoelettrici vengono inoltre impiegati nella costruzione degli *elementi elastici*, organi fondamentali di alcuni strumenti atti alla misurazione delle vibrazioni meccaniche, detti *strumenti sismici*. Le vibrazioni meccaniche producono uno spostamento, velocità ed accelerazione di un ulteriore dispositivo massivo, detto *massa sismica*. La *massa sismica* è rigidamente collegata all'elemento elastico. Uno strumento di questo tipo largamente impiegato è l'[accelerometro al quarzo piezoelettrico](#): si tratta in sostanza di un trasduttore che dà come grandezza in uscita una tensione elettrica proporzionale alla deformazione subita dall'elemento elastico, a sua volta proporzionale all'accelerazione dalla *massa sismica*.

Un'applicazione analoga trova spazio in ambito [musicale](#), dove si utilizzano i cosiddetti *pick up* piezoelettrici, dispositivi in grado di rilevare le variazioni di pressione esercitate da una corda in vibrazione di uno strumento musicale generando un segnale elettrico che poi viene amplificato.

Altri strumenti in cui tali materiali vengono usati sono i microfoni, il più noto dei quali è il microfono al quarzo, il cui funzionamento si basa sul rilevamento delle onde sonore che sono determinate dal susseguirsi di zone di compressione e rarefazione del mezzo in cui si propagano; tali onde di pressione, captate dal microfono, determinano una variazione di potenziale proporzionale alla variazione della capacità (in effetti la piastrina di quarzo può essere paragonata appunto ad un condensatore, a causa della separazione delle cariche elettriche localizzate in zone prossime alle superfici inferiore e superiore). Tale variazione di tensione è poi filtrata e amplificata mediante una catena di misura; eventualmente sul segnale così purificato viene effettuato un campionamento per trasmetterlo dal dominio fisico a quello digitale. Questa applicazione si trova nei microfoni dei [telefoni](#).

In maniera opposta ai microfoni, i materiali piezoelettrici trovano applicazione come altoparlante (nelle vecchie [radio "a cristallo"](#) erano frequenti gli auricolari piezoelettrici), funzionando in maniera opposta, le cui onde sonore vengono generate a seconda della differenza di potenziale ivi applicata.

Un altro tipico materiale piezoelettrico, è la [galena](#), usata come rivelatore nelle [radio a galena](#) (in seguito rimpiazzate dai diodi al germanio), che funzionavano senza bisogno di batterie o generatori di forza elettromotrice.

Materiali con proprietà piezoelettriche vengono inoltre utilizzati in alcuni rivelatori di [pressione](#) e per realizzare [oscillatori elettronici](#), tuttavia la relazione tra compressione e tensione è generalmente molto variabile e richiede una [taratura](#) per ogni dispositivo.

Altri strumenti in cui i materiali piezoelettrici vengono usati sono gli [orologi](#); ancora una volta il materiale più usato è il quarzo: sono rinomati gli orologi al quarzo piezoelettrico, strumenti in cui la compressione periodica del materiale determina una variazione altrettanto periodica della tensione. Il periodo o la frequenza del segnale in uscita opportunamente trattato, viene usato come unità base per contare il tempo; il segnale elettrico, a dire il vero, viene inviato ad una successione di circuiti detti divisori di frequenza, così da poter scegliere un segnale di tensione alla voluta frequenza (in effetti il segnale all'uscita del sistema lamina di quarzo ha una frequenza elevata, normalmente per gli orologi è pari a 32768 cicli al secondo; per tale motivo vengono usati i circuiti divisori di frequenza che, se posti in serie, sono in grado di ridurre la frequenza). Il segnale elettrico così ridotto viene infine inviato ad un contatore elettronico, attraverso il quale è possibile, se il comando è esterno, misurare l'intervallo di tempo intercorso tra due eventi oppure, se si basa sul conteggio del numero dei picchi di tensione, è in grado di determinare il numero degli eventi in un certo periodo di tempo fissato.

L'effetto piezoelettrico viene inoltre utilizzato per azionare il moto degli utensili nelle lavorazioni meccaniche ad ultrasuoni e, recentemente, negli [iniettori diretti](#) dei motori a scoppio e nelle testine delle [stampanti Epson](#) in cui tanti piccoli ugelli allineati, spruzzano l'inchiostro compresso dalla spinta della propria pompa piezo.

Applicazioni in campo medico

- [Sonde Ecografiche](#) - I cristalli piezoelettrici vengono usati come attuatori e sensori in fase combinata. In effetti le sonde ecografiche funzionano come dei piccoli sonar producendo l'ultrasuono e attraverso sensori trasformano l'eco di ritorno in immagini.
- [Litotritori](#) - La vibrazione contemporanea di centinaia di elementi piezoceramici disposti su una superficie concava, o su layer concentrici, genera un'onda d'urto di potenza dipendente dalla curvatura della superficie e dal numero di elementi impiegati.

Grazie all'estrema modularità dell'impulso ottenibile, alcuni litotrittori piezoelettrici possono anche variare la dimensione focale permettendo di selezionare volumi efficaci più adatti alla patologia in trattamento. Disponendo layer piezoelettrici concentrici vengono raggiunte densità di energia di oltre 1,6 mj/mm² e valori assai superiori nei litotrittori piezoelettrici dedicati all'urologia. I cristalli di nuova generazione assicurano una longevità del generatore che supera di norma i 6.000.000 di colpi senza decrescere di potenza o richiedere l'utilizzo di materiale consumabile.

La versatilità della distribuzione dei cristalli ha permesso inoltre di ottenere volumi focali non solo di dimensioni differenti, ma anche con morfologie dedicate:

- Onde focalizzate a volume ellissoidale (trattamenti ESWT – ESWL – TPST)
- Onde focalizzate a volume lineare (trattamenti ESWT – medicina Estetica)
- Onde focalizzate/planare (trattamenti ESWT - Ulcere cutanee).
- Piezochirurgia - Piezosurgery è la nuova applicazione in campo medico che permette di sfruttare le onde ultrasoniche generate tramite un apparecchio piezoelettrico per la chirurgia ossea. Degli speciali inserti permettono di sezionare o tagliare il tessuto osseo preservando al massimo i tessuti molli di cui sono costituite alcune parti nobili quali i nervi, le arterie o le membrane. Questa tecnologia si sta diffondendo molto nel settore dentale grazie alla possibilità di intervenire in zone delicate con la minima invasività chirurgica, soprattutto in implantologia.

Porfidi - <http://it.wikipedia.org/wiki/Porfido>

Il **porfido** è una [roccia vulcanica effusiva](#): le più diffuse sulla [crosta terrestre](#) sono [ignimbriti](#) riolitiche e riodacitiche. 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 (dimensioni 2/4 mm) in percentuale variabile tra il 30/35%. I cristalli più abbondanti sono quelli di [quarzo](#), tanto che alla roccia viene attribuita anche la denominazione di "porfido quarzifero". Notevolmente inferiore è la presenza dei [feldspati](#), esigua è quella delle [miche](#). Il suo colore comunque varia dal grigio chiaro ad un marrone medio.

Applicazioni [\[modifica\]](#)

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](#) (dai [bolognini](#) o [sanpietrini](#) a lastre di modeste dimensioni) come anche utilizzato per rivestimenti, pareti ventilate e targhe nella versione porfido viola della [Val Camonica](#). Questa roccia viene utilizzata per pavimentazioni esterne o stradali perché è dotata di una scabrosità naturale, in quanto ha una superficie polimineralogica ed è composta da minerali aventi parametri di usura differenti.

Luoghi di estrazione

Uno dei più celebri luoghi di estrazione e lavorazione del porfido è il [Trentino](#), ed in particolare nei comuni della [Val di Cembra](#) (il più rinomato paese di estrazione per qualità e bellezza del materiale è Albiano) e sull'[Altopiano di Pinè](#) il cui paesaggio è stato fortemente compromesso dalle enormi cave a cielo aperto, ma anche in provincia di [Varese](#), e in particolare nella frazione di [Cuasso al monte](#), si estrae porfido, in una qualità contraddistinta dal colore rosso. Una varietà pregiata è quella del porfido ornamentale viola, estratto in provincia di Brescia, a [Bienno](#), [Val Camonica](#).

Il porfido nell'antichità

Sarcofago in porfido egiziano, di Costantina, figlia dell'imperatore Costantino

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 (come del resto anche oggi).

In particolare i Romani chiamavano "porfido" (*[lapis porphyrites](#)*) una particolare varietà proveniente dall'[Egitto](#), dopo la conquista di [Augusto](#), del 31 a.C., da cave di proprietà imperiale sul *Mons Porphyrites* o *Mons Igneus*, un massiccio montuoso oggi chiamato [Gebel Dokhan](#) situato ad ovest di [Hurghada](#), nel deserto orientale egiziano. Si tratta di un materiale estremamente duro e difficile da lavorare, già utilizzato dai sovrani egiziani ed estremamente apprezzato, per il suo acceso colore rosso, associato alla dignità imperiale. Il porfido era quindi usato per opere destinate all'imperatore e alla ristretta cerchia della sua famiglia. Dal V secolo il suo colore rosso venne assimilato al culto del corpo di Cristo, riservandone l'uso all'onore dei soli imperatori, secondo una tradizione che si mantenne nell'[Impero bizantino](#) e che poi venne emulata anche da altri regni europei. Per esempio nella [basilica di Santa Sofia](#) a [Costantinopoli](#) la posizione dell'imperatore alle funzioni è segnalata da un disco rosso di porfido. In porfido sono i sarcofaghi della madre di [Costantino I \(sant'Elena\)](#), o, per esempio, il sarcofago di [Federico II](#) nella [cattedrale di Palermo](#).

Graniti - <http://it.wikipedia.org/wiki/Granito>

Il **granito** è una [roccia ignea intrusiva felsica](#), con grana che va da media a grossolana e occasionalmente può presentare megacristalli. Il suo nome deriva dal latino *granum* (a grani), con chiaro riferimento alla sua struttura olocristallina.

Il granito è classificato tramite il [diagramma QAPF](#), nel quale si colloca nel campo delle rocce sovrassature, ossia con contenuti di [quarzo](#) compresi tra il 20 e il 60%. Gli altri minerali fondamentali presenti sono i [feldspati](#) ([ortoclasio](#), [sanidino](#) e [microclino](#)) e il [plagioclasio](#) (con composizioni più [albitiche](#)) e [miche](#) ([biotite](#) e in alcuni tipi di granito [muscovite](#)). Se il plagioclasio è quasi interamente albite il granito prende il nome di [granito sodico](#), se nella roccia è presente anche pirosseno rombico la roccia prende il nome di [granito charnockitico](#). Un'ulteriore varietà di granito sono i [leucograniti](#), nei quali i minerali mafici sono estremamente ridotti. La densità media del granito è di 2,75 g/cm³ con un range che va da 1,74 g/cm³ a 2,80 g/cm³.

Composizione chimica

La composizione media del granito è (in ordine decrescente):^[1]

- [SiO₂](#) — 72,04%
- [Al₂O₃](#) — 14,42%
- [K₂O](#) — 4,12%
- [Na₂O](#) — 3,69%
- [CaO](#) — 1,82%
- [FeO](#) — 1,68%
- [Fe₂O₃](#) — 1,22%

- [MgO](#) — 0,71%
- [TiO₂](#) — 0,30%
- [P₂O₅](#) — 0,12%
- [MnO](#) — 0,05%

Per ottenere questa composizione si sono analizzati 2485 campioni provenienti da tutto il mondo. La percentuale di SiO₂ si riferisce a tutti gli ossidi di [silicio](#) presenti (quindi anche quelli presenti nei [silicati](#)) e non soltanto al quarzo.

Classificazione

Il granito è una roccia ignea intrusiva, si è quindi formato a seguito del lento raffreddamento di un [magma](#) che si è intruso a profondità comprese tra 1,5 e 50 km. Il processo di formazione del granito è comunque tuttora in fase di dibattito ed ha generato varie ipotesi e classificazioni dei graniti.

Classificazione alfabetica

La classificazione alfabetica^[2] distingue in:

- *I-graniti*, derivante da rocce ignee, quindi metalluninosi-alluminosaturi.
- *S-graniti*, derivanti da rocce [crostali](#) sedimentarie o metamorfiche, sono peralluminosi.
- *M-graniti*, derivanti da cristallizzazione frazionata del [mantello](#).
- *A-graniti*, derivanti dall'interazione di un [hot spot](#) con la parte inferiore della crosta.

Classificazione di Pitcher

La classificazione di Pitcher (1979) distingue due tipi di associazioni granitiche: l' *ercinotipa* e l'*andinotipa*. Ulteriori studi hanno portato a definire tre classi di graniti:

- *I-cordigliera o Andinotipi*, rappresentati dai graniti delle [Ande](#), caratterizzato da [plutonismo](#) di lunga durata, hanno origini [calcalcaline](#)
- *I-caledoniani*, provengono da plutonismo breve e intenso,
- *S-ercinotipi*, provengono da plutonismo breve e intenso ma si distinguono per l'abbondante presenza di [muscovite](#), minerale presente a causa del loro [protolito](#) sedimentario.

Classificazione di Pearce

La classificazione di J.A. Pearce tiene conto della concentrazione degli elementi in tracce. Gli elementi in tracce non influiscono le proprietà fisiche del sistema, ma la loro abbondanza è determinata dal loro ripartirsi tra le varie fasi in equilibrio, pertanto sono dei traccianti dei processi di fusioni e cristallizzazione. Si distinguono 4 tipi di formazioni tettoniche in base al contenuto in ppm di Rb, Y, Nb, Ta, Yb:

- *VAG*, volcanic-arc granite
- *Syn-COLG*, syncollisional granite
- *WPG*, withing-plate granite

- *ORG*, ocean-ridge granite

Origine

Particolare di un granito proveniente dallo [Yosemite](#)

L'origine del granito è stata per molti decenni fonte di controversie e accese discussioni. L'ipotesi attualmente più diffusa è quella della genesi per [crystallizzazione frazionata](#). Un'ulteriore ipotesi è quella della genesi per estremo [metamorfismo](#).

Genesi per cristallizzazione frazionata

Secondo questa teoria la formazione del granito va attribuita al lento processo di cristallizzazione frazionata che avviene all'interno della [camera magmatica](#). Tramite questa teoria è quindi possibile spiegare le varie associazioni di rocce che troviamo nei [plutoni](#) come vari stadi dell'evoluzione del magma. Le associazioni plutoniche si possono utilmente schematizzare in due categorie principali:

- *[Associazioni plutoniche calcocaline](#)*
- *[Associazioni plutoniche a graniti dominanti](#)*

In entrambe le associazioni il granito è comunque un punto di arrivo dell'evoluzione, in quanto rappresenta la roccia più differenziata. Questa evoluzione del magma viene rappresentata ottimamente nel diagramma del [sistema granitico](#), dove tramite un [grafico ternario](#) di [SiO₂](#), [albite](#) e [ortoclasio](#) si può seguire il percorso di differenziazione di un magma sovrassaturo.

Genesi per metamorfismo

In opposizione alla genesi per cristallizzazione frazionata alcuni geologi hanno formulato l'ipotesi della genesi per metamorfismo. Questa teoria spiega la formazione del granito grazie al metamorfismo estremo di [anfiboliti](#) e [granuliti](#).

Risalita e messa in posto

La risalita dei magmi dalla zona di origine (generalmente l'[astenosfera](#)) verso la crosta più superficiale avviene principalmente per contrasto di [densità](#). Il movimento del magma nell'astenosfera può quindi essere efficacemente descritto con un modello di flusso in un ambiente poroso saturato con collasso dell'ambiente attraversato (Turcotte e Ahern, 1979). Al raggiungimento della [litosfera](#) il movimento del magma cambia per il comportamento più rigido del mezzo attraversato iniziando quindi a seguire vie preferenziali.

A seconda delle caratteristiche del magma (densità, [viscosità](#), [massa](#) e perdita di calore) l'intrusione si fermerà a diverse profondità. Si distinguono quindi **epiplutoni**, plutoni di altro livello, e **cataplutoni** ossia plutoni di crosta medio-profonda. La messa in posto può, schematicamente, avvenire in due modi:

- **Intrusione forzata**, sono intrusioni che esercitano una spinta sulle [rocce incassanti](#) deformandole.
- **Intrusioni permesse**, sono intrusioni che avanzano per collasso delle rocce soprastanti il magma.

Un tipico meccanismo di intrusione permissiva è lo *'stoping* nel quale le rocce incassanti si frammentano al tetto e ai bordi dell'intrusione liberando spazio per la risalita. Lo stoping è chiaramente riconoscibile ai bordi del [plutone](#) per la grande presenza di [xenoliti](#).

Distribuzione

Località di ritrovamento dei graniti in Italia

In Italia sono assai diffuse rocce granitiche, localizzate nelle [Alpi](#), in [Calabria](#) e in [Sardegna](#). Esse appartengono a due cicli intrusivi distinti, connessi con l'[orogenesi ercinica](#) (fine dell'[era paleozoica](#)) e con l'[orogenesi alpina](#) (nell'[era terziaria](#)) e sono spesso associate, nella medesima massa intrusiva, con rocce ignee appartenenti ad altre famiglie ([sieniti](#), [dioriti](#), ecc.)

Le rocce granitiche intruse durante il ciclo dell'orogenesi ercinica sono quelle affioranti su vaste aree in [Sardegna](#) e in [Corsica](#), per lo più graniti normali, ma talvolta anfibolici o alcalini, con [anfiboli sodici](#), e inoltre i graniti della [Sila](#) e dell'[Aspromonte](#), e quelli situati prevalentemente nella parte esterna dell'arco alpino ([Monte Bianco](#), [Massiccio del San Gottardo](#), ecc.); spesso questi graniti ercinici mostrano tessiture [gneissiche](#), formate per fenomeni di metamorfismo regionale avvenuti, forse a più riprese, dopo la solidificazione delle rocce.

Un'altra serie di rocce ignee acide, di tipo granitico, si è intrusa durante il ciclo dell'orogenesi alpina ([Val Masino](#), [Adamello](#), [Vedrette di Ries](#), [Isola d'Elba](#)). Il granito di [Baveno](#) è largamente usato come pietra da costruzione e ornamentale, analogamente al “ghiardone” della Val Masino, a struttura porfirica, di età terziaria. I graniti della bassa [Val Sesia](#) sono invece di età ercinica. I [plutoni](#) dell'[Adamello](#), delle Vedrette di Ries, della [Cima d'Asta](#), di [Bressanone](#) nel [Trentino-Alto Adige](#), tutti di età terziaria, sono costituiti in gran parte da [adamelliti](#), [granodioriti](#) e [tonaliti](#).

Usi

Alcune [piramidi egizie](#) sono costruite in parte da granito: la [piramide rossa](#) (2600 a.C.) è chiamata così per il colore rosso della sua superficie granitica. La piramide di [Micerino](#) è invece costruita da blocchi di granito e calcare. La [grande piramide di Giza](#) ha un maestoso sarcofago in granito.

Molti templi [indù](#) nel sud dell'[India](#) sono costruiti in granito, soprattutto quelli costruiti durante l'XI secolo sotto la guida del re [Rajaraja Chola I](#).

Il granito è largamente utilizzato anche nell'edilizia moderna, soprattutto nella pavimentazione ed è molto apprezzato nella costruzione di monumenti per la sua ottima resistenza agli acidi; lucidato e pulito è spesso utilizzato nei piani cottura di molte cucine per la sua durabilità ed estetica.

Il granito è una delle rocce maggiormente apprezzate dagli arrampicatori, grazie alla sua grande aderenza e ai suoi sistemi di fratture. Alcune delle località più conosciute per arrampicare sul granito sono: il [parco nazionale di Yosemite](#), lo [Joshua Tree National Park](#), il massiccio del [Monte Bianco](#) (soprattutto nel [gruppo del Mont Blanc du Tacul](#), l'[Aiguilles du Dru](#) e l'[Aiguille du Midi](#)), la [Val Masino](#), la [Corsica](#) e il [Karakorum](#).

Polarizzazione elettrica - http://it.wikipedia.org/wiki/Polarizzazione_elettrica

In [fisica](#), la **polarizzazione elettrica** nei materiali è la presenza di un [dipolo elettrico](#) macroscopico in un [materiale](#) in seguito all'applicazione di un [campo elettrico](#).^[1] La polarizzazione elettrica si manifesta in particolare nei materiali [isolanti](#), e genera la presenza di [carica elettrica](#), detta carica di polarizzazione, sulla superficie ed all'interno di essi.

Polarizzazione elettrica

I dielettrici sono materiali elettricamente neutri e non contengono cariche elettriche libere. La polarizzazione di un dielettrico è la formazione di un dipolo orientato in modo tale da contrastare il campo elettrico esterno: tale dipolo è dato dalle deformazioni della struttura elettronica microscopica degli atomi attorno alla posizione di equilibrio, oppure dal loro orientamento. Questo rende possibile la distinzione di due tipi di polarizzazione: la polarizzazione per deformazione e la polarizzazione per orientamento.

Esistono inoltre alcuni materiali dielettrici particolari, cosiddetti [ferroelettrici](#), che mantengono la polarizzazione anche quando lo stimolo esterno viene a mancare: questi materiali hanno solitamente proprietà [piezoelettriche](#).

Polarizzazione per deformazione

Gli elettroni possono deformare i propri [orbitali](#) spostando leggermente la propria posizione rispetto ai nuclei, formando un dipolo di piccolissima intensità per ogni atomo del materiale: la somma dei dipoli microscopici produce il dipolo totale del solido. Tale fenomeno consiste nel fatto che il nucleo, positivo, subisce una forza elettrica approssimativamente proporzionale al microcampo elettrico all'interno del materiale chiamato campo locale, creando così un momento di dipolo non nullo:^[2]

$$\mathbf{p} = \alpha_d \mathbf{E}_l$$

dove α_d è il coefficiente detto di *polarizzabilità elettronica* per deformazione. Il campo elettrico locale \mathbf{E}_l è il campo agente sull'atomo considerato e non comprende il contributo dell'atomo stesso.

Polarizzazione per orientamento

Molte [molecole](#), in particolare quelle caratterizzate da una configurazione non simmetrica, sono dotate di un [momento di dipolo](#) intrinseco, dovuto sia al tipo di legame, sia all'asimmetria della molecola. Tuttavia tale momento di dipolo è mediamente nullo, dal momento che per un grande numero di molecole l'orientazione dei singoli dipoli è distribuita in maniera casuale. Se è presente un campo elettrico esterno i momenti di dipolo si orientano parallelamente ad esso e il suo valore medio è quindi diverso da zero.^[3]

Il calcolo del valore medio dei momenti di dipolo si effettua con la [funzione di Boltzmann](#), dalla quale si ottiene:^[4]

$$\langle \mathbf{p} \rangle = \frac{p_0^2 \mathbf{E}_l}{3KT} = \alpha_o \mathbf{E}_l$$

dove \mathbf{K} è la [costante di Boltzmann](#), \mathbf{T} è la temperatura in [kelvin](#), e \vec{p}_0 è il momento di dipolo intrinseco. Infine α_o è il coefficiente di *polarizzabilità elettronica* per orientamento.

Polarizzazione nei materiali

A seconda dello stato di aggregazione degli atomi e delle loro caratteristiche, la polarizzazione elettrica in gas, liquidi e nei solidi cristallini si differenzia notevolmente.

Polarizzazione nei gas

Nelle sostanze gassose il campo locale è approssimabile al campo macroscopico, in quanto l'interazione fra le molecole in un gas è debole. Il legame tra il vettore polarizzazione elettrica e il campo elettrico è sostanzialmente lineare, ed approssimativamente si ha solo polarizzazione per orientamento:

$$\mathbf{P} = n\alpha_o \mathbf{E}$$

dove n è il numero medio di molecole per unità di volume.

Polarizzazione nei liquidi

Il comportamento dei liquidi rende necessario distinguere tra liquidi polari e non polari:

Liquidi polari

Per i liquidi polari si ha un effetto di polarizzazione sia per orientamento che per deformazione.^[5]

$$\mathbf{P} = n\alpha\mathbf{E}$$

dove:

$$\alpha = \alpha_o + \alpha_d$$

Liquidi non polari

Per i liquidi non polari si usa, sotto opportune approssimazioni, la relazione di [Lorentz](#) tra il campo elettrico locale e campo elettrico esterno.^[6]

$$\mathbf{E}_l = \mathbf{E} + \frac{\mathbf{P}}{3\epsilon_0}$$
$$\mathbf{P} = n\alpha \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{P}}{3\epsilon_0} \right) = \left(\frac{n\alpha}{\left(1 - \frac{n\alpha}{3\epsilon_0}\right)} \right) \mathbf{E} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$$

dove:

$$\chi = \frac{n\alpha}{\epsilon_0 \left(1 - \frac{n\alpha}{3\epsilon_0}\right)} = \epsilon_r - 1$$

è chiamata [susceptività elettrica](#), mentre ϵ_r è la [permittività elettrica relativa](#) relativa al materiale.

Polarizzazione nei solidi cristallini

All'interno dei metalli gli [elettroni di valenza](#) sono in generale liberi di muoversi liberamente all'interno del solido. Se il metallo viene immerso in un campo elettrico si forma una densità di carica superficiale tale da schermare il campo esterno, e si osserva una corrente che scorre nello stesso senso del campo per un brevissimo periodo di tempo, dopo il quale il metallo ritorna alla condizione precedente alla perturbazione eccetto che sulla superficie. La quantità di carica libera è solitamente tale da schermare qualsiasi campo elettrico costante applicato, e la polarizzabilità elettrica per i metalli è approssimabile a zero.

I materiali [semiconduttori](#), invece, a temperatura ambiente presentano un comportamento metallico per campi elettrici di bassa intensità ed un comportamento dielettrico per campi elettrici più forti.

La [costante dielettrica](#) per i semiconduttori è solitamente molto alta: 13.8 per il [silicio](#), circa 14 per il [germanio](#).

Nei solidi cristallini, infine, il legame tra il vettore polarizzazione elettrica e il campo elettrico esterno dipende anche dalla direzione del campo, e quindi la relazione è la più generale possibile:^[7]

$$\mathbf{P} = \alpha\mathbf{E}$$

Le cui componenti sono:

$$\begin{cases} P_x = \alpha_{11}E_x + \alpha_{12}E_y + \alpha_{13}E_z \\ P_y = \alpha_{21}E_x + \alpha_{22}E_y + \alpha_{23}E_z \\ P_z = \alpha_{31}E_x + \alpha_{32}E_y + \alpha_{33}E_z \end{cases}$$

dove:

$$||\alpha|| = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

è il [tensore](#) di polarizzazione. Se i suoi elementi sono tutti costanti il dielettrico si dice *perfetto*, mentre se si riducono ad uno [scalare](#) si dice *isotropo*.

Vettore polarizzazione elettrica

L'effetto della polarizzazione elettrico può essere descritto riconducendo la polarizzazione dei dipoli microscopici ad una grandezza vettoriale macroscopica, che descriva il comportamento globale del materiale soggetto alla presenza di un campo elettrico esterno. Il vettore *intensità di polarizzazione*, anche detto vettore di *polarizzazione elettrica* e indicato con \mathbf{P} , è il [dipolo elettrico](#) per unità di volume posseduto dal materiale. Definito come il valore medio del momento magnetico proprio \mathbf{P} di N particelle contenute in un volume infinitesimo dV , è espresso dalla relazione:^[8]

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta V} \langle \mathbf{p} \rangle = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{\Delta N} \mathbf{P}_i}{\Delta V}$$

Nella definizione il limite vale per un volume che contenga un numero significativo di atomi tale da poterne calcolare una proprietà media. Il [potenziale elettrico](#) associato al campo elettrico generato in un punto \mathbf{r}' dalla polarizzazione del materiale è la somma dei contributi forniti da ogni elemento di volume dV di materiale posto nel punto \mathbf{r} . Integrando su tutto lo spazio si ottiene dunque:^[9]

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\mathbf{P} \cdot \Delta \mathbf{r}}{|\Delta \mathbf{r}|^3} dV$$

dove $d\mathbf{p} = \mathbf{P}dV$ è il momento di dipolo posseduto dal volume infinitesimo dV di materiale e $\Delta \mathbf{r} = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ la differenza vettoriale tra la posizione \mathbf{r} del volume elementare e il punto \mathbf{r}' in cui è calcolato il potenziale.

Il vettore di polarizzazione, in quanto sorgente di un campo elettrico, deve essere legato ad una certa densità di carica microscopica. Si dimostra infatti che la precedente relazione è equivalente a scrivere:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}}{|\Delta \mathbf{r}|} dV + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{(-\text{div}\mathbf{P})}{|\Delta \mathbf{r}|} dS$$

Confrontando tale espressione con quella del potenziale generato da una distribuzione di carica superficiale e volumica, si evince che la polarizzazione nei dielettrici è descritta da una certa densità di carica di polarizzazione superficiale σ_p e volumica ρ_p legata al vettore di polarizzazione elettrica da:^[10]

$$\sigma_p = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \quad \rho_p = -\text{div}\mathbf{P} = -\nabla \cdot \mathbf{P}$$

La polarizzazione del materiale si manifesta quindi attraverso la modifica della distribuzione di carica associata agli atomi e le molecole che compongono il materiale stesso, la quale è sorgente di un campo aggiuntivo presente all'interno del materiale. Questo è dovuto al fatto che sotto l'azione di un campo elettrico esterno si generano o si orientano i dipoli microscopici presenti nel materiale,

costituiti dalla carica elettrica di atomi o molecole. Nel momento in cui un campo esterno separa spazialmente il [nucleo](#) dalla nuvola elettronica di un atomo, da un oggetto neutro si genera un dipolo, costituito da due cariche uguali in modulo ed opposte in segno. Allo stesso modo, l'orientazione collettiva dei dipoli molecolari genera una distribuzione di carica regolare e non più casuale, che genera un campo non mediamente nullo.

L'azione di un campo elettrico esterno, quindi, genera un campo aggiuntivo all'interno del materiale, dovuto alla modifica della distribuzione di carica nel materiale: se il vettore di polarizzazione è uniforme i singoli dipoli si annullano reciprocamente, e la densità volumica di carica di polarizzazione si annulla. In questa situazione la carica di polarizzazione si manifesta soltanto sulla superficie del dielettrico.

Equazioni di Maxwell per i dielettrici

Introducendo la densità di carica di polarizzazione ρ_p , la prima delle equazioni di Maxwell, che esprime la forma locale del [teorema del flusso](#) per il campo elettrico, diventa:^[11]

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0}(\rho_f + \rho_p) = \frac{1}{\epsilon_0}(\rho_f - \nabla \cdot \mathbf{P})$$

dove ρ_f è la densità di cariche libere e nel secondo passaggio si è utilizzata la relazione tra la densità volumica di carica di polarizzazione ed il vettore di polarizzazione. Si ha quindi:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho_f.$$

L'argomento dell'operatore differenziale è il vettore induzione elettrica, definito come:^[7]

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

E la prima equazione di Maxwell assume la forma:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho - \rho_p = \rho_f$$

La maggior parte dei materiali isolanti può essere trattata come un dielettrico lineare omogeneo ed isotropo, questo significa che tra il dipolo indotto nel materiale ed il campo elettrico esterno sussista una relazione lineare. Si tratta di un'approssimazione di largo utilizzo, ed in tal caso i campi \mathbf{E} e \mathbf{D} sono equivalenti a meno di un fattore di scala:^[12]

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$$

e di conseguenza:

$$\mathbf{P} = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E},$$

La grandezza ϵ_r è la [costante dielettrica](#) relativa, e dipende dalle caratteristiche microscopiche del materiale. Può essere misurata empiricamente e, a partire dagli [anni settanta](#), viene calcolata anche con l'ausilio dei calcolatori elettronici. Se il materiale non è omogeneo, lineare ed isotropo, allora ϵ dipende da fattori come la posizione all'interno del mezzo, la temperatura o la frequenza del campo applicato. In particolare, se il materiale è omogeneo e anisotropo la costante dielettrica diventa una matrice, se non è omogeneo i coefficienti della matrice sono una funzione della posizione, e se non è lineare la costante dielettrica dipende dal campo elettrico, ed in generale anche dal tempo.

Nel dominio delle frequenze, per un mezzo lineare e indipendente dal tempo sussiste la relazione:

$$\mathbf{D}(\omega) = \epsilon(\omega) \mathbf{E}(\omega)$$

dove ω è la frequenza del campo.

Il vettore di polarizzazione per un mezzo non lineare, non omogeneo, non isotropo, dipende a sua volta dal campo attraverso il tensore di polarizzazione.

Zero assoluto - http://it.wikipedia.org/wiki/Zero_assoluto

Lo **zero assoluto** è la [temperatura](#) più bassa che teoricamente si possa ottenere in qualsiasi [sistema](#) macroscopico, e corrisponde a 0 [K](#) (−273,15 [°C](#); −459,67 [°F](#)). Si può mostrare con le leggi della [termodinamica](#) che la [temperatura](#) non può mai essere esattamente pari allo zero assoluto, anche se è possibile raggiungere temperature molto vicine ad esso. Allo zero assoluto le [molecole](#) e gli [atomi](#) di un [sistema](#) sono tutte allo stato fondamentale (ovvero il più basso livello di [energia](#) possibile) e il [sistema](#) ha il minor quantitativo possibile di [energia cinetica](#) permesso dalle leggi della [fisica](#). Questa quantità di energia è piccolissima, ma sempre diversa da zero.

Questa energia minima corrisponde all'[energia di punto zero](#), prevista dalla [meccanica quantistica](#) per tutti i [sistemi](#) che abbiano un [potenziale](#) confinante.

Lo zero assoluto non può essere raggiunto in base a tre leggi fisiche:

- Il teorema di [Nernst](#), anche chiamato [terzo principio della termodinamica](#), afferma che serve una quantità di energia infinita per raffreddare un corpo fino allo zero assoluto. Il raggiungimento dello zero assoluto è contrario all'aumento di [entropia](#) nei sistemi isolati: il principio dell'aumento di entropia in sé non vieta che lo zero assoluto sia raggiungibile nei sistemi aperti. Tuttavia, l'entropia, misurata in joule/kelvin, darebbe luogo a una [forma indeterminata](#) del tipo 0/0, annullandosi il calore o energia (joule) ed essendo posta a zero la temperatura (kelvin).
- [Principio di indeterminazione di Heisenberg](#): energia E e tempo t , o anche impulso P e posizione Q sono variabili canonicamente coniugate. Se un sistema raggiungesse lo zero assoluto, potremmo dire con certezza quale è la sua temperatura T , cioè 0. Ma se conosciamo T , allora conosciamo anche E , cioè l'energia ad essa associata, anch'essa uguale a 0. Analogamente, è nota la posizione del corpo che è fermo allo zero assoluto; dandogli un impulso dall'esterno, sarebbero note entrambe le variabili. Conoscendo E senza incertezze avremmo t infinitamente indeterminato, e conoscendo P senza incertezze avremmo Q infinitamente indeterminato.
- Energia di punto zero: il livello energetico più basso raggiungibile da un atomo è livello energetico del punto zero, che, pur essendo infinitesimo, non è mai nullo. Il sistema avrà sempre una determinata energia di tipo cinetico, un determinato calore e quindi una temperatura poco al di sopra dello zero assoluto.

Nel caso di atomi liberi a temperature prossime allo zero assoluto, la maggior parte dell'energia è in forma di movimento traslazionale e la temperatura può essere misurata in termini di [velocità](#) di tale movimento, con [velocità](#) inferiori corrispondenti a temperature inferiori. A causa degli effetti della [meccanica quantistica](#) la [velocità](#) allo zero assoluto non è esattamente zero, ma dipende, così come l'[energia](#), dalle dimensioni dello [spazio](#) nel quale l'atomo è confinato.

A temperature molto basse, prossime allo zero assoluto, la [materia](#) esibisce molte proprietà inusuali, quali la [superconduttività](#), la [superfluidità](#) e la [condensazione di Bose-Einstein](#). Per poter studiare tali fenomeni, gli scienziati hanno elaborato metodi per ottenere temperature sempre più basse. Al [2005](#), la temperatura più bassa mai ottenuta è stata di 450 [pK](#), o $4,5 \cdot 10^{-10}$ [K](#), conseguita da Wolfgang Ketterle e colleghi al [Massachusetts Institute of Technology](#).

La [Nebulosa Boomerang](#) è stata recentemente scoperta come il posto più freddo conosciuto, al di fuori dei laboratori, con una temperatura di soli −272 °C (1 K). La [nebulosa](#) è a 5.000 [anni luce](#) dalla [Terra](#) (nella costellazione del [Centauro](#)).

Terzo Principio della termodinamica

L'impossibilità di raggiungere lo zero assoluto è una conseguenza del secondo principio della termodinamica, che normalmente è espresso come la proprietà dell'[entropia](#) di un sistema chiuso di non poter mai diminuire. Allo zero assoluto lo stato di disordine molecolare (misurato dall'entropia del sistema) raggiungerebbe il suo valore minimo, definito solo dalla degenerazione dello stato fondamentale. Questo fatto è espresso da quello che nella letteratura scientifica è noto come [terzo principio della termodinamica](#) o *teorema di Nernst*.

Per capire cosa sia lo zero assoluto bisogna tener presente che la temperatura è in qualche modo una misura dell'energia interna di un corpo, intesa come somma di energia cinetica e potenziale. Raggiungere lo zero assoluto significherebbe quindi in qualche modo azzerare l'energia cinetica traslazionale e rotazionale delle molecole che compongono il corpo. A questo punto le molecole che lo compongono si fermano completamente e la temperatura è la più bassa possibile: questa temperatura si chiama zero assoluto.

Lo zero assoluto esiste solo come punto limite asintotico in quanto tale temperatura non è raggiungibile, né teoricamente né tanto meno praticamente. Allo zero assoluto, per esempio, le particelle sarebbero completamente ferme e sarebbero ben determinate sia la loro posizione sia la loro velocità, cosa impossibile per il [principio di indeterminazione](#) della meccanica quantistica. Studi degli [anni cinquanta](#) hanno anche dato una nuova spiegazione dell'impossibilità di raggiungere lo zero assoluto. Il [modello classico](#) delle [molecole](#) descrive le stesse come un [sistema di oscillatori armonici](#) facendole assomigliare ad una [molla](#) infinitamente piccola che vibra in continuo. Per questa rappresentazione, le molecole vengono descritte con la [legge di Hooke](#) $F = -kx$ (F [forza elastica](#) di richiamo; k [costante elastica](#); x [elongazione](#)). Tale modello viene superato con la proposizione del [modello quantistico](#) dove si enuncia che l'[energia di vibrazione](#) è quantizzata e assume valori determinabili con la formula $E_{\text{vibr.}} = (n + \frac{1}{2}) h\nu$ (n [numero quantico](#) vibrazionale che assume valori che vanno da 0 a ∞ ; h [costante di Planck](#) e ν [frequenza](#) della vibrazione)

Nello stato di vibrazione fondamentale (quello che dovrebbe assumere la molecola allo 0 assoluto) l'E risulta pari a $\frac{1}{2}$ si deduce quindi che la molecola è sempre e comunque in vibrazione e non stabile.

Applicazioni e proprietà dei corpi a basse temperature

Gli scienziati mediante l'uso di speciali macchine termiche sono riusciti a portare un corpo ad un solo milionesimo di °C dallo zero assoluto. Alle bassissime temperature effetti quantistici diventano macroscopicamente rilevanti. Per esempio alcuni conduttori a temperature bassissime subiscono una [transizione di fase](#) quantistica ad uno stato in cui cessano di avere [resistenza elettrica](#). Tali materiali sono detti [superconduttori](#) e permetterebbero di eliminare le perdite nelle linee elettriche.

Similmente alcuni fluidi a temperature di pochi gradi sopra lo zero assoluto perdono completamente la viscosità diventando [superfluidi](#).

Le proprietà vibrazionali di alcuni corpi a così basse temperature vengono ad assumere particolarità curiose, che si discostano dalle normali onde. È raggiunto infatti un comportamento discreto tipico delle particelle quantistiche ed è introdotto quindi il concetto di quanto vibrazionale, detto [fonone](#).

Temperatura negativa

Certi sistemi semi-isolati, come un sistema di [spin](#) non interagenti in un campo magnetico, possono raggiungere temperature negative, tuttavia non sono in verità più fredde dello zero assoluto.

Possono essere pensati come sistemi con temperatura più grande dell'infinito. Questo tipo di fenomeno è associato, in particolare, all'inversione di popolazione che si ottiene nelle [cavità risonanti](#) dei [laser](#) convenzionali.

Energia di punto zero - http://it.wikipedia.org/wiki/Energia_di_punto_zero

In fisica, l'**energia di punto zero** (in inglese, zero-point energy, ZPE) è il più basso livello energetico possibile in un sistema quantistico.

Basi fisiche

Dal [principio di indeterminazione](#) di Heisenberg deriva che il [vuoto](#) è permeato da un mare di [fluttuazioni quantistiche](#) che creano coppie di particelle e anti-particelle virtuali che si annichiliscono in un tempo inversamente proporzionale alla propria [energia](#). Il contributo complessivo all'[energia del vuoto](#) risulta così mediamente diverso da zero e pari a

$$\epsilon = \frac{h\nu}{2}$$

dove h è la [costante di Planck](#) e ν è la [frequenza](#) di un generico modo di vibrazione associabile alla lunghezza d'[onda materiale](#) delle [particelle virtuali](#).

Integrando rispetto allo [spazio](#) tutti i contributi dati dalle fluttuazioni quantistiche a tutte le energie e lunghezze d'onda si ottiene una quantità di [energia](#) enorme per unità di volume. Dal momento che l'[energia](#) produce [gravità](#) essa dovrebbe contribuire a determinare in modo significativo il valore della [costante cosmologica](#) che invece risulta di entità molto esigua. Nella realtà dunque, questa enorme [energia](#) viene a elidersi quasi totalmente e non è facile pensare a un modo pratico per estrarla dal suo "background" di vuoto quantistico.

Nella [teoria quantistica dei campi](#), il termine *energia di punto zero* è sinonimo di [energia del vuoto](#). L'esistenza di una [energia](#) non per nulla associata al vuoto è alla base dell'[effetto Casimir](#), previsto nel 1947 e confermato sperimentalmente. Altri effetti derivanti dall'*energia di punto zero* sono la [Forza di van der Waals](#), lo [spostamento di Lamb-Retherford](#), la spiegazione dello spettro di [radiazione di corpo nero](#) di Planck, la stabilità dello [stato fondamentale](#) dell'atomo di idrogeno dal collasso radiativo, l'effetto delle cavità di inibire o aumentare l'[emissione spontanea](#) di fotoni dagli atomi eccitati e la [radiazione di Hawking](#) responsabile dell'evaporazione dei [buchi neri](#).

Condensato di Bose – Einstein – http://it.wikipedia.org/wiki/Condensato_di_Bose-Einstein

Il **condensato di Bose-Einstein** (in sigla *BEC*) è uno stato della [materia](#) che si ottiene quando si porta un insieme di [bosoni](#) a temperature estremamente vicine allo [zero assoluto](#) (0 K, ossia - 273,15 °C). In queste condizioni di grande raffreddamento, una frazione non trascurabile delle particelle si porta nello stato quantistico di più piccola energia, e gli effetti quantistici si manifestano su scala macroscopica.

Questo stato della materia venne predetto per la prima volta, sulla base della [meccanica quantistica](#) da [Albert Einstein](#), basandosi sul lavoro di [Satyendra Nath Bose](#), nel 1925^[1]. Settanta anni più tardi, il primo condensato di questo tipo fu prodotto da [Eric Cornell](#) e [Carl Wieman](#) nel 1995 al laboratorio NIST-JILA dell'Università del Colorado, usando un gas di [rubidio](#) alla temperatura di

170 nanokelvin (nK)^[2]. Cornell e Wieman e [Wolfgang Ketterle](#) hanno vinto il [Premio Nobel](#) per la [Fisica](#) nel [2001](#)^[3].

Attualmente lo studio dei condensati congiunge vasti campi della fisica: la [fisica atomica](#), la [fisica dei molti corpi](#), l'[ottica quantistica](#). Nel mese di novembre del 2010 il primo fotone del condensato di Bose-Einstein è stato osservato^[4].

Teoria

La teoria ha le sue radici nei primi [anni venti](#) quando [Bose](#) si occupava del movimento della luce in [quanti](#) ed ideò una serie di regole per decidere se due [fotoni](#) dovevano essere considerati distinti o meno ([statistica di Bose](#)). Egli sottopose questo lavoro ad [Einstein](#) che, oltre ad apprezzarlo ed a farlo pubblicare, lo applicò anche agli atomi. Dai calcoli risultò che non si manifestavano molte differenze rispetto alle vecchie regole tranne nel caso di temperature molto basse; l'effetto era così sorprendente da far sospettare un errore. Neanche Einstein si rese conto di cosa significava avere tutti gli atomi nello stesso stato. La dimostrazione empirica della teoria venne ottenuta per la prima volta nel [1995](#) da [Eric Cornell](#) e [Carl Wieman](#) all'[Università di Boulder](#) mediante tecniche di [raffreddamento a laser](#) che hanno permesso di portare degli atomi di gas di [rubidio](#) a circa 6×10^{-8} K.

Studi

La distribuzione di velocità conferma la scoperta di un nuovo stato della materia, il condensato di Bose - Einstein di un gas di atomi di rubidio

Il padre dei condensati, pur senza averli realizzati, viene considerato [Daniel Kleppner](#) del [MIT](#). Iniziò ad interessarsi ai condensati a partire dal [1976](#), ispirato dai suoi precedenti studi sull'[idrogeno](#) a [spin](#) polarizzato, che alle temperature vicine allo zero assoluto rimane allo stato gassoso.

I primi a realizzare il condensato furono i suoi studenti Wieman e Cornell, seguiti da [Wolfgang Ketterle](#), [David Pritchard](#), [Randall Hulet](#) e il [premio Nobel](#) [William Phillips](#) con gli atomi [alcalini](#).

Nel giugno del [1998](#) Kleppner osservò con i suoi studenti per la prima volta il condensato di idrogeno, che si rivelò molto più difficile da creare che con gli atomi alcalini.

Gli stessi Eric Cornell e Carl Wieman scoprirono che riducendo la repulsione artificiale il condensato si riduceva di dimensioni (come previsto dalla teoria) per poi esplodere (nell'esperimento vennero espulsi circa un terzo degli atomi), lasciando un piccolo condensato residuo circondato da una nube più calda di atomi. Questo nuovo fenomeno venne battezzato [nova di Bose](#) (il termine *nova* è preso in prestito dall'[astronomia](#), in cui l'esplosione di stelle che collassano viene detta [nova](#) e [supernova](#)). Quindi quando la forza è repulsiva, il condensato si gonfia. Quando la forza è attrattiva invece si comprime e dà vita a una nova di Bose.

Nel [1993](#) si è osservato per la prima volta un condensato formato da [eccitoni](#) all'interno di un [semiconduttore](#) di [ossido](#) di [rame](#). Un eccitone è uno stato legato di un [elettrone](#) e una [lacuna](#) dovuto a fenomeni di eccitazione collettiva in un semiconduttore.

Fisici dell'Istituto di fisica atomica e molecolare dell'olandese [FOM](#) hanno studiato i processi di collasso dei condensati e si è osservato che la condensazione di Bose-Einstein è un processo che ha inizialmente una coerenza locale e solo in seguito la coerenza si estende su tutto il condensato. Gli atomi più caldi si accumulano al centro e quelli più freddi alle estremità del BEC. Quando è raggiunto lo stato di equilibrio il condensato mostra stati oscillatori nella sua forma.

All'[Università di Innsbruck](#) dimostrarono che è possibile con la tecnologia attuale costruire un modello acustico di [buco nero](#) in cui le onde sonore prendono il posto della [luce](#). Il [buco nero](#)

[acustico](#) dovrebbe esplodere in un impulso di fononi come secondo la teoria di [Hawking](#) i buchi neri tradizionali dovrebbero evaporare tramite la [radiazione di Hawking](#).

Alla [Princeton University](#) si ipotizza che la [materia oscura](#) possa esser composta da condensati.

Esperimenti

Nel [1998](#) viene creato il primo condensato di Idrogeno da [Daniel Kleppner](#) e i suoi studenti.

Nel [1999](#) [Lene Vestergard Hau](#) del [Rowland Institute of Science](#) di [Cambridge](#) riuscì a rallentare la velocità della luce a 17 m/s attraverso un gas ultrafreddo. A novembre dello stesso anno Ketterle osservò la luce attraversare un condensato alla velocità di 1 metro al secondo.

Nel [2001](#) il gruppo [INFM](#) del [LENS](#) di [Firenze](#) ha prodotto il primo condensato di [potassio-41](#) tramite una tecnica innovativa di contatto termico con un campione di atomi di rubidio in una trappola magnetica. Così la facilità di raffreddare mediante laser il [rubidio](#) ha fatto abbassare la temperatura fino a 100 nK. Lo stesso anno in un esperimento eseguito dal [NIST](#) (National Institute of Standards and Technology), è stato prodotto un condensato di [rubidio-85](#), a 3 miliardesimi di [kelvin](#): la più bassa temperatura mai ottenuta. I ricercatori così hanno potuto modificare le interazioni atomiche applicando diversi campi magnetici e creando una nova di Bose. In un altro esperimento, è stato creato in un condensato un vortice ad anello (forma insolita ma prevista) creando un "[solitone oscuro](#)". Un [solitone](#) è un'onda che può propagarsi per lunghe distanze senza dissipare nessuna energia.

Nel [2002](#), un gruppo di fisici tedeschi ha proposto, in un articolo, un metodo per indurre un [gas di bosoni](#) ultrafreddi a comportarsi da fermioni, e a non condensare.

Sempre lo stesso anno l'Università di Innsbruck ha creato un condensato di Bose-Einstein di Cesio e un gruppo di fisici italiani ha dimostrato che un BEC può provocare il collasso di un [gas di Fermi](#). La scoperta potrebbe anche aiutare i fisici a trasformare un gas di Fermi in un [superfluido](#), una sostanza priva di viscosità.

Nel [2003](#) all'Università di [Innsbruck](#) in Austria sono riusciti a creare il primo condensato molecolare di [litio](#). Sono stati usati dei [laser](#) per raffreddare la nube gassosa fino a che gli atomi della nube si sono accoppiati in molecole biatomiche di litio. Il condensato conteneva circa 150 000 molecole ed è durato 20 secondi a differenza degli altri BEC della durata di pochi millisecondi.

Nel [2006](#) all'[École polytechnique fédérale de Lausanne](#) (EPFL) viene creato il primo condensato di [polaritoni](#).

Derivazione matematica

Il condensato viene fuori considerando un sistema di [bosoni](#) indipendenti (cioè non interagenti) liberi e massivi. La distribuzione di questi bosoni è la [Bose-Einstein](#):

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon - \mu}{kT}} - 1}$$

Per calcolare il numero totale di bosoni in un dato sistema bisognerebbe sommare su tutti i possibili [livelli energetici](#). Il teorema di Eulero, invece, permette di 'sostituire' la sommatoria discreta in un integrale nello [spazio delle fasi](#), commettendo un errore trascurabile.

$$\sum_{i=0}^{\infty} f(\varepsilon_i) \rightarrow \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int d^3p \int d^3q f(p, q)$$

In questo caso quindi si ottiene:

$$\sum_{i=0}^{\infty} f(\varepsilon_i) = \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int d^3p \int d^3q \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon-\mu}{kT}} - 1}$$

A questo punto consideriamo i bosoni chiusi in un volume V e di energia: $\varepsilon = \frac{p^2}{2m}$, cioè quella di una particella libera. Da cui deriva $p = \sqrt{2m\varepsilon}$. Quindi il numero complessivo di bosoni è:

$$\begin{aligned} N &= \frac{V}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^{\infty} 4\pi p^2 \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon-\mu}{kT}} - 1} dp = \\ &= \frac{V4\pi(2m)^{\frac{3}{2}}}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^{\infty} \sqrt{\varepsilon} \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon-\mu}{kT}} - 1} d\varepsilon \end{aligned}$$

Ma a questo numero non contribuiscono i bosoni appartenenti al primo livello energetico, per i quali si ha $\varepsilon = 0$. Quindi questi sono tutti i bosoni appartenenti ai livelli eccitati N_ε e i bosoni appartenenti al fondamentale si possono scrivere come

$$N_0 = N - N_\varepsilon$$

Dove N è il numero totale.

Si nota inoltre che a temperatura $T=0$ il potenziale chimico μ è nullo e decresce con la temperatura. Si può inoltre supporre che per piccole variazioni di temperatura dallo 0 il potenziale chimico vari poco, in modo tale che si possa approssimare $\mu \simeq 0$.

Ora ragionando a basse temperature, con l'approssimazione di sopra, si può calcolare il numero di bosoni nel livello fondamentale:

$$N_0 = N - N_\varepsilon = N - \frac{V4\pi(2m)^{\frac{3}{2}}}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^{\infty} \sqrt{\varepsilon} \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon}{kT_0}} - 1} d\varepsilon = N - \frac{V4\pi(2m)^{\frac{3}{2}}}{(2\pi\hbar)^3} (kT_0)^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty}$$

L'integrale è un integrale noto, chiamato $K_{\frac{3}{2}} = \zeta\left(\frac{3}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)$. Dove $\zeta(x)$ e $\Gamma(x)$ sono la [funzione zeta di Riemann](#) e la [gamma di Eulero](#). Quindi:

$$\frac{N_0}{N} = 1 - \frac{V4\pi(2m)^{\frac{3}{2}}}{(2\pi\hbar)^3 N} (kT_0)^{\frac{3}{2}} K_{\frac{3}{2}}$$

E si vede che nel limite in cui T_0 tende a 0 i bosoni sono tutti nel fondamentale.

Legge della termodinamica - <http://it.wikipedia.org/wiki/Termodinamica>

La **termodinamica** è quella branca della [fisica](#) e della [chimica](#) ([chimica fisica](#)) che descrive le trasformazioni subite da un sistema in seguito a processi che coinvolgono la trasformazione di [materia](#) ed [energia](#).

La termodinamica classica si basa sul concetto di *sistema macroscopico*, ovvero una porzione di materia fisicamente o concettualmente separata dall'ambiente esterno, che spesso per comodità si assume non perturbato dallo scambio di energia con il sistema. Lo [stato](#) di un sistema macroscopico che si trova all'equilibrio è specificato da grandezze dette *variabili termodinamiche* o *di stato* come la [temperatura](#), la [pressione](#), il [volume](#), la [composizione chimica](#).

Tuttavia esiste una branca della termodinamica, denominata [termodinamica del non equilibrio](#) che studia i processi termodinamici caratterizzati dal mancato raggiungimento di condizioni di equilibrio stabile.

Sistema termodinamico

Breve sviluppo storico

[Sadi Carnot](#) (1796-1832): uno dei padri della termodinamica.

Fu [Sadi Carnot](#) nel [1824](#) il primo a dimostrare che si può ottenere [lavoro](#) dallo scambio di [calore](#) tra due sorgenti a temperature differenti. Attraverso il [teorema di Carnot](#) e la [macchina ideale di Carnot](#) quantificò questo lavoro e introdusse il concetto di [rendimento termodinamico](#).

Nel [1848](#) [Lord Kelvin](#), utilizzando la macchina di Carnot, introdusse il concetto di [temperatura termodinamica assoluta](#) e a lui si deve un enunciato del [secondo principio della termodinamica](#).

Nel [1850](#) [Joule](#) dimostra l'uguaglianza delle due forme di [energia](#) (allora si credeva esistesse ancora il fluido calorico).

A questo punto si era posto il problema che, se era possibile ottenere calore dal lavoro in modo totale, non era possibile ottenere l'inverso! A questo risultato approda anche [Clausius](#) che nel [1855](#) introdusse la sua [disuguaglianza](#) per riconoscere i [processi reversibili](#) da quelli [irreversibili](#) e la funzione di stato [entropia](#).

Nel [1876](#) [Willard Gibbs](#) pubblicò il trattato "*On the Equilibrium of Heterogeneous Substances*" (*Sull'equilibrio delle sostanze eterogenee*) in cui mostrò come una [trasformazione termodinamica](#) potesse essere rappresentata graficamente e come studiando in questo modo l'energia, l'entropia, il volume, la temperatura e la pressione si potesse prevedere l'eventuale spontaneità del processo considerato.

Il caso della termodinamica è emblematico nella storia e nell'[epistemologia](#) della scienza: si tratta infatti di uno di quei casi in cui la pratica ha precorso la teoria stessa: prima è stata ideata la [macchina a vapore](#), poi è stato sistematizzato il suo funzionamento teorico attraverso i suoi principi di base.

Sistemi termodinamici

Un "sistema termodinamico" è una qualunque porzione dell'universo a cui ci si sta interessando come oggetto d'indagine (la rimanente parte dell'universo si definisce invece **ambiente**). Questa porzione di spazio è separata dal resto dell'universo, cioè dall'ambiente esterno, mediante una superficie di controllo (superficie reale o immaginaria, rigida o deformabile), ed è sede di trasformazioni interne e scambi di materia o energia con l'ambiente esterno. Questi stessi scambi causano perciò la trasformazione del sistema, poiché esso passa da una condizione di partenza ad una differente. In pratica un sistema si trasforma quando passa da uno stato d'equilibrio iniziale ad uno finale. L'ambiente rimane invece generalmente "inalterato", poiché il sistema rispetto ad esso è talmente piccolo che uno scambio di energia o materia risulterebbe influente per l'ambiente rispetto alla totalità degli stessi al suo interno, altrimenti non si parlerebbe di ambiente ma di un altro sistema (al quale l'ambiente per definizione non corrisponde).

Gli scambi di materia o energia possono avvenire sotto forma di calore o lavoro. Questi due concetti non sono delle proprietà intrinseche del sistema, ma sussistono nel momento in cui esso interagisce con l'ambiente, cioè scambia energia con l'esterno. Quindi un sistema non possiede calore o lavoro, bensì energia; ogni variazione di energia è poi esprimibile in termini di *calore*, se il passaggio di

energia è dovuto ad una differenza di temperatura tra ambiente e sistema, e lavoro (per qualunque variazione energetica che non sia dovuta alla differenza di temperatura, come ad esempio una forza meccanica che provochi uno spostamento, un trasferimento di energia elettrica o elastica).

Si possono distinguere vari tipi di sistemi, in dipendenza dal modo di scambiare energia con l'esterno:

- sistemi *aperti*: scambiano energia ([calore](#) e [lavoro](#)) e [materia](#) con l'ambiente.
- sistemi *chiusi*: scambiano energia, ma non materia con l'ambiente.
- sistemi *isolati*: non scambiano né energia né materia con l'ambiente; l'universo è quindi per definizione un sistema isolato, non essendoci un "ambiente esterno" di riferimento con cui scambiare materia o energia.

In un sistema isolato una trasformazione può avvenire ugualmente non tramite scambi di materia o energia ma tramite **fluttuazioni** delle stesse.

I bordi dei sistemi termodinamici, e quindi i sistemi stessi, si possono classificare nel modo seguente:

- Sulla base dello scambio di calore in:
 - [Sistemi adiabatici](#), se non consentono lo scambio di calore;
 - Sistemi diatermici, se invece lo consentono;
- Sulla base dello scambio di lavoro in:
 - Bordi rigidi, se non consentono lo scambio di lavoro;
 - Bordi flessibili, se invece lo consentono;
- Sulla base dello scambio di materia in:
 - Bordi permeabili, se consentono il passaggio di ogni specie chimica
 - Bordi semipermeabili, se consentono il passaggio di alcune specie chimiche
 - Bordi impermeabili, se invece non consentono il passaggio di alcuna specie chimica.

Un sistema aperto ha bordi permeabili o semipermeabili, diatermici e flessibili. Un sistema isolato ha bordi impermeabili, rigidi e adiabatici.

Coordinate termodinamiche

Le proprietà termodinamiche usate per descrivere un sistema sono dette *coordinate termodinamiche*. Dato un certo numero di coordinate, esse possono essere:

- indipendenti, se è possibile modificare il valore di ciascuna di esse senza determinare una variazione del valore delle altre;
- dipendenti, se variando il valore di una di esse anche le altre coordinate vengono modificate.

È tipica della termodinamica la distinzione fra [proprietà intensive ed estensive](#):

- estensive, se dipendono dalle dimensioni del sistema (ad es. massa, volume, capacità termica);

- intensive, se non dipendono dalle dimensioni del sistema (ad es. pressione e temperatura);
- specifiche: rapportando una proprietà estensiva con le dimensioni del sistema (tipicamente la massa, ma anche il numero di moli o il volume) si ottiene una proprietà intensiva che è detta la corrispondente *specifica* della proprietà estensiva corrispondente: possono essere considerate tali il volume specifico, la densità ("massa specifica") e il calore specifico.

Secondo un noto *postulato di stato*, date due proprietà intensive indipendenti, lo stato di un sistema semplice risulta completamente determinato.

[Temperatura](#), [volume](#), [pressione](#) e numero di [moli](#) sono tipici esempi di coordinate termodinamiche.

Trasformazioni termodinamiche

Quando un sistema passa da uno stato di equilibrio ad un altro, si dice che avviene una [trasformazione termodinamica](#): si distingue tra *trasformazioni reversibili*, ovvero quelle trasformazioni che consentono di essere ripercorse in senso inverso (si ritorna precisamente al punto di partenza, ripercorrendo all'indietro gli stessi passi dell'andata), e *trasformazioni irreversibili*, ovvero quelle trasformazioni che, se ripercorse all'indietro, non faranno ritornare al punto iniziale, ma ad uno diverso. Perché una trasformazione sia reversibile è necessario che essa avvenga abbastanza lentamente da permettere al sistema di termalizzare (il sistema deve passare attraverso infiniti stati di equilibrio termodinamico). Le trasformazioni termodinamiche possono essere anche dei seguenti tipi:

- *Isobare*, se la pressione si mantiene costante;
- *Isocore*, se il volume si mantiene costante (e il lavoro scambiato tra sistema ed esterno è dunque nullo);
- *Isoterme*, se la temperatura si mantiene costante;
- *Adiabatiche*, se il calore totale scambiato è nullo;
- *Isoentropiche*, o *adiabatiche reversibili*, se la variazione di entropia è nulla;

I principi della termodinamica

I principi della termodinamica vennero enunciati nel corso del [XIX secolo](#) e regolano le trasformazioni termodinamiche, il loro procedere, i loro limiti. Sono dei veri e propri assiomi, non dimostrati e indimostrabili, fondati sull'esperienza, sui quali si fonda tutta la teoria che riguarda la termodinamica.

Si possono distinguere tre principi di base, più un principio "zero" che definisce la temperatura, e che è implicito negli altri tre.

Principio zero

Quando due sistemi interagenti sono in equilibrio termico, condividono alcune proprietà, che possono essere misurate dando loro un preciso valore numerico. In conseguenza, quando due sistemi sono in equilibrio termico con un terzo, sono in equilibrio tra loro e la proprietà condivisa è la [temperatura](#). Il principio zero della termodinamica dice semplicemente che, se un corpo "A" è in equilibrio termico con un corpo "B" e "B" è in equilibrio termico con un corpo "C", "A" e "C" sono in equilibrio tra loro.

Tale principio spiega il fatto che due corpi a temperature diverse, tra cui si scambia del [calore](#), (anche se questo concetto non è presente nel principio zero) finiscono per raggiungere la stessa temperatura. Nella formulazione cinetica della termodinamica, il principio zero rappresenta la tendenza a raggiungere un'[energia cinetica](#) media comune degli atomi e delle molecole dei corpi tra cui avviene scambio di calore: in media, come conseguenza degli urti delle particelle del corpo più caldo, mediamente più veloci, con le particelle del corpo più freddo, mediamente più lente, si avrà passaggio di [energia](#) dalle prime alle seconde, tendendo dunque ad uguagliare le temperature. L'[efficienza](#) dello scambio di energia determina i [calori specifici](#) dei materiali coinvolti.

Primo principio

Quando un corpo viene posto a contatto con un altro corpo relativamente più freddo, avviene una trasformazione che porta a uno stato di equilibrio, in cui sono uguali le temperature dei due corpi. Per spiegare questo fenomeno, gli scienziati del [XVIII secolo](#) supposero che una sostanza, presente in maggior quantità nel corpo più caldo, passasse nel corpo più freddo. Questa sostanza ipotetica, detta [calorico](#), era pensata come un fluido capace di muoversi attraverso la materia. Il primo principio della termodinamica invece identifica il calore come una forma di energia che può essere convertita in lavoro meccanico ed essere immagazzinata, ma che non è una sostanza materiale. È stato dimostrato sperimentalmente che il calore, misurato originariamente in [calorie](#), e il lavoro o l'energia, misurati in [joule](#), sono assolutamente equivalenti. Ogni caloria equivale a 4,186 joule.

Il primo principio è dunque un principio di [conservazione dell'energia](#). In ogni [macchina termica](#) una certa quantità di energia viene trasformata in lavoro: non può esistere nessuna macchina che produca lavoro senza consumare energia. Una simile macchina, se esistesse, produrrebbe infatti il cosiddetto [moto perpetuo di prima specie](#).

Il primo principio viene tradizionalmente enunciato come "In un sistema chiuso si ha che:

$$\Delta U = Q - L$$

dove U è l'[energia interna](#) del sistema.

Per energia interna si intende la somma delle energie cinetiche e di interazione delle diverse particelle di un sistema. Q è il calore scambiato tra ambiente e sistema (positivo se fornito al sistema, negativo se invece ceduto dal sistema) e L il lavoro compiuto (positivo se compiuto dal sistema sull'ambiente, negativo invece se compiuto dall'ambiente sul sistema). La convenzione dei segni risente del legame con lo studio dei motori termici, nei quali il calore viene trasformato (parzialmente) in lavoro.

Formulazioni alternative ed equivalenti del primo principio sono:

- Per un sistema aperto, $q-w=\Delta E$, ove per ΔE si intende la variazione di energia totale, che altro non è che la somma delle variazioni dell'energia interna, dell'energia cinetica e dell'energia potenziale possedute da quel sistema. Si vede che per un sistema chiuso le variazioni di energia cinetica e potenziale sono nulle per cui ci si riconduce alla relazione precedente.
- Per un ciclo termodinamico, $q=w$, dal momento che la variazione di energia totale è nulla, dovendo il sistema, al termine di ogni ciclo, ritornare nelle stesse condizioni di partenza.

Secondo principio

Esistono diversi enunciati del [secondo principio](#), tutti equivalenti, e ciascuna delle formulazioni ne mette in risalto un particolare aspetto. Esso afferma che « è impossibile realizzare una [macchina ciclica](#) che abbia come unico risultato il trasferimento di calore da un corpo freddo a uno caldo»

(enunciato di [Clausius](#)) o, equivalentemente, che « è impossibile realizzare una trasformazione il cui risultato sia solamente quello di convertire in lavoro meccanico il calore prelevato da un'unica sorgente» (enunciato di [Kelvin](#)). Quest'ultima limitazione nega la possibilità di realizzare il cosiddetto *moto perpetuo di seconda specie*. L'[entropia](#) totale di un sistema isolato rimane invariata quando si svolge una trasformazione reversibile ed aumenta quando si svolge una trasformazione irreversibile.

Terzo principio

È strettamente legato al secondo, e in alcuni casi è considerato come una conseguenza di quest'ultimo. Può essere enunciato dicendo che « è impossibile raggiungere lo [zero assoluto](#) con un numero finito di trasformazioni» e fornisce una precisa definizione della grandezza chiamata [entropia](#). Esso afferma inoltre che l'entropia per un solido perfettamente cristallino, alla temperatura di 0 kelvin è pari a 0. È facile spiegare questo enunciato tramite la termodinamica molecolare: un solido perfettamente cristallino è composto da un solo *complessioma* (sono tutti i modi di disporre le molecole, se le molecole sono tutte uguali indipendentemente da come sono disposte, macroscopicamente il cristallo è sempre uguale) e, trovandosi a 0 kelvin, l'energia vibrazionale, traslazionale e rotazionale delle particelle che lo compongono è nulla, per cui, dalla legge di [Boltzmann](#) $S = k \ln(1) = 0$ dove 1 sono i complessiomi (in questo caso uno solo).

Gradiente geotermico - http://it.wikipedia.org/wiki/Gradiente_geotermico

Viene chiamato **gradiente geotermico** la variazione di [temperatura](#) all'incremento della profondità entro la [crosta terrestre](#); questo parametro viene generalmente indicato con il valore dell'aumento della temperatura in gradi [Celsius](#) ogni 100 m di profondità. Talvolta viene usato il termine **grado geotermico** indicante quanti metri di profondità sono necessari per avere un incremento di un grado di temperatura. Esso è inefficace per la misura del flusso geotermico terrestre perché non prende in considerazione la decadenza radioattiva degli elementi litosferici.

Si tratta di un'unità di misura essenzialmente utilizzata per scopi applicativi, così definita per averla espressa con cifre facilmente utilizzabili anche in calcoli manuali, e minimo numero di cifre decimali significative da considerare. La sua valutazione lungo una distanza di 100 m permette anche di avere un parametro con la minimizzazione dei possibili errori casuali, strumentali e di lettura nella stima decimale delle temperature.^[1]

Descrizione

Schema dell'andamento della temperatura nel sottosuolo in funzione della litologia

La temperatura misurata all'interno della [Terra](#), non è costante, ma il suo valore cambia in funzione della profondità in cui è misurato o stimato e di alcune condizioni geologiche locali e regionali.

Gradiente geotermico nella [Litosfera](#)

Profilo superficiale

Scendendo dalla [superficie terrestre](#) fino ad una certa profondità (normalmente variabile fra 5 – 20 m) la temperatura misurabile varia durante l'anno in funzione della temperatura media meteorologica, fino ad una profondità dove la temperatura registrata rimane costante per tutto l'[anno](#) con un valore pari alla temperatura media annuale locale. È quindi possibile definire una superficie di *omotermita* che normalmente segue nel sottosuolo il [profilo topografico](#) sovrastante, con

smussamenti delle asperità altimetriche e locali variazioni riconducibili a fenomeni geologici circoscritti.

Queste variazioni locali possono avere origine diversa, di seguito sono presentati alcuni casi:

- Infiltrazioni di acque fredde dalla superficie, come venne riscontrato durante la perforazione del tunnel del [Monte Bianco](#), ove le temperature misurate in [galleria](#) risultarono inferiori a quelle previste, causa raffreddamento della roccia per infiltrazioni verso il basso delle acque fredde di fusione del [ghiacciaio](#) sovrastante. Viceversa la [galleria stradale del San Gottardo](#) non gode di tale raffreddamento, come è possibile notare tenendo d'occhio il termometro della temperatura esterna nella strumentazione dell'automobile durante l'attraversamento del tunnel.
- Presenza di [permafrost](#), che funge da [volano](#) termico raffreddante il [suolo](#). Analisi di gradienti di temperatura in aree con permafrost condotte in [Polonia](#) hanno permesso di osservare che l'effetto del permafrost è osservabile fino a qualche centinaio di metri di profondità.^[2]
- Campo [geotermico](#) o anomalia geotermica osservabile direttamente sul terreno: in questo caso le linee isoterme intersecano direttamente la superficie topografica.

Profilo profondo

Al di sotto della superficie omeoterma la temperatura terrestre aumenta con un incremento che, mediamente corrisponde a circa 3 °C ogni 100 m di profondità, ma può variare sensibilmente in funzione della posizione in cui ci troviamo.

Il campo normale di variazione del gradiente geotermico solitamente è compreso fra 1,5 °C/100m e 5,0 °C/100m.

Il valore del gradiente geotermale è funzione della [conduttività termica](#) delle [rocce](#), rocce molto porose, quindi includenti elevati volumi di acqua sono caratterizzate da bassa conduttività termica.

Calcolo del gradiente geotermico

Al di sotto della superficie di omotermia, il gradiente geotermico, può essere calcolato, conoscendo (o stimando) le temperature a due profondità con la seguente formula:

$$\text{GradienteGeotermico} = \frac{100 * (T2 - T1)}{D2 - D1}$$

con

- $T2$ = Temperatura misurata alla profondità $D1$;
- $T1$ = Temperatura misurata alla profondità $D2 < D1$.

Ipocentri di eventi sismici - <http://it.wikipedia.org/wiki/Ipocentro>

L'**ipocentro** (o **fuoco**) è il punto all'interno della [Terra](#) ove inizia a propagarsi la frattura che origina un [terremoto](#).

L'ipocentro si trova immediatamente sotto l'[epicentro](#) e la distanza tra epicentro e ipocentro è detta *profondità focale*.

A seconda della profondità dell'ipocentro si distinguono:

- **Terremoti superficiali**, profondità da 0 a 70 [km](#).
- **Terremoti medi**, profondità da 70 a 300 km.
- **Terremoti profondi** oltre i 300 km.

La profondità focale può raggiungere i 700 km; meno profondo è l'ipocentro e maggiori sono gli effetti del terremoto in superficie.

Faglie - <http://it.wikipedia.org/wiki/Faglia>

La **faglia** è una [frattura](#) (planare o non planare) della [roccia](#) che mostra evidenze di movimento relativo tra le due masse rocciose da essa divise. La superficie lungo cui si è verificata la frattura si chiama *superficie di faglia* oppure *piano di faglia*, o anche *specchio di faglia*. Le rocce in prossimità di una faglia risultano spesso intensamente frantumate e si parla in questo caso di [rocce di faglia](#) quali le [cataclasiti](#) o le [miloniti](#).

Come si formano

Dal punto di vista [reologico](#), in prima approssimazione le rocce possono comportarsi in maniera [fragile](#) oppure in maniera [duttile](#). Nel primo caso si ha la formazione di una faglia; nel secondo di una [piega](#).

Di solito il comportamento [fragile](#) si ha in condizioni di bassa [temperatura](#) e [pressione](#), quindi a basse [profondità](#), mentre il comportamento [duttile](#) delle rocce è caratteristico di zone con temperature e pressioni alte, condizioni che si trovano quindi a profondità maggiori.

Comportamenti [fragile](#) e [duttile](#), spesso associati, dipendono anche dalla velocità dell'applicazione dello [stress tettonico](#) e dalla presenza di fluidi quali l'acqua all'interno della porzione di [crosta terrestre](#) interessata.

Le rocce che si comportano [fragilmente](#), se sottoposte ad uno sforzo eccessivo, si deformano superando il campo elastico fino ad arrivare ad un *punto di rottura* (comportamento fragile). Le due parti di roccia che così vengono a separarsi determinano la dislocazione e, riacquistando molto velocemente il loro volume originario, generano una serie di [onde](#) che danno origine ai [terremoti](#) ([teoria del rimbalzo elastico](#)).

La *faglia* deve presentare evidenti segni di movimento relativo, cosa che le distingue ad esempio dalle [diaciasi](#).

Il processo di formazione e sviluppo della faglia nonché dei terremoti stessi è in generale noto come [fagliazione](#).

Il comportamento di una faglia può essere studiato con tecniche di analisi proprie della [meccanica della frattura](#).

Tipi di faglie a movimento semplice

Tipi di faglie - immagine [USGS](#)

Il piano di faglia può formare, rispetto al [piano orizzontale](#), angoli variabili da 0° ([sovrascorrimenti](#)) a 90° (faglie trascorrenti).

Spesso in natura è possibile rilevare faglie con movimenti complessi risultanti da uno spostamento sia verticale che orizzontale. La componente verticale e orizzontale della dislocazione, ricavabile ad esempio da marcatori stratigrafici, è detta rigetto (rispettivamente verticale e orizzontale).

Per la classificazione delle faglie dirette e inverse è utile definire il concetto di tetto e di letto o muro. Il primo è la massa rocciosa sovrastante il piano di faglia, il secondo quella sottostante al piano stesso.

faglie dirette o normali

una faglia si dice diretta quando il tetto scende rispetto al muro. In questo caso il settore di [crosta terrestre](#) è interessato da un regime tettonico distensivo o divergente (ad esempio in occasione dell'apertura di un [rift](#)). Solitamente tali faglie presentano un piano avente inclinazione elevata, attorno ai 60°.

faglie inverse

una faglia si dice inversa se il tetto sale rispetto al muro. In questo caso il settore di crosta risulta raccorciato a causa di un campo di stress tettonico compressivo. Gli angoli del piano di faglia sono piuttosto bassi (attorno ai 30°). Nel caso di angoli molto bassi o nulli si parla di sovrascorrimenti.

faglie trascorrenti

una faglia si dice trascorrente se il piano è verticale con spostamento orizzontale relativo delle masse rocciose. Tali faglie sono distinte in destre o sinistre; il senso è determinabile ponendosi sulla linea di faglia e osservando il senso della dislocazione del blocco roccioso che si ha di fronte.

Le [faglie trasformati](#) descritte nelle zone [dorsali](#) dalla [tettonica delle placche](#) sono solo apparentemente simili alle faglie trascorrenti; in realtà il loro senso è opposto a quello che appare osservando semplicemente lo spostamento dei vari settori di dorsale.

Se un sisma si verifica su una faglia non nota ovvero che non raggiunge la superficie si parla di *faglia cieca*.

Tipi di faglie a movimento complesso

faglie transpressive

faglie che presentano un moto complesso con componente sia orizzontale e trascorrente, che verticale e compressiva, determinate da un regime tettonico locale di tipo compressivo.

faglie transtensive

faglie che presentano un moto complesso con componente sia orizzontale trascorrente, che verticale e distensiva, determinate da un regime tettonico locale di tipo distensivo.

Queste deformazioni spesso creano particolari strutture tettoniche chiamate strutture a fiore.

Sistemi di faglie



Horst e Graben - immagine [USGS](#)

Le faglie sono raramente isolate: di solito sono associate in sistemi o famiglie che i [geologi](#) rilevano in base ad immersione del piano, regime tettonico che le ha generate, direzione di sviluppo, ecc.

Quando sono così numerose, le faglie possono essere tutte parallele tra loro, oppure possono essere disposte in modo da formare tra loro determinati angoli, argomento che interessa ad esempio la [geologia applicata](#) nelle indagini sulla stabilità dei versanti rocciosi.

Una tipica associazione di faglie dirette, presente ad esempio in [Sardegna](#) nel [Campidano](#), è quella che determina una fossa tettonica anche conosciuta nella letteratura scientifica tedesca come [Graben](#): due sistemi paralleli di faglie dirette, aventi immersione opposta, provocano l'abbassamento della sezione di crosta tra essi interposta (*fossa*) rispetto alle due parti laterali.

Se due o più fosse tettoniche si fiancheggiano, i settori che le separano, rimasti relativamente sollevati, prendono il nome di pilastri tettonici o [Horst](#).

Alle fosse tettoniche corrispondono vere depressioni morfologiche che vengono chiamate [rift valleys](#). La più celebre struttura di questo tipo è la [Great Rift Valley](#) dell'[Africa Orientale](#), nella [regione dei Grandi Laghi](#).

Mitigazione

L'individuazione di faglie attive definisce la pericolosità sismica di una Regione. Le zone sismogenetiche sono caratterizzate da lineamenti tettonici il cui movimento determina rilasci di enormi quantità di energia che si propaga sotto forma di vibrazione sismica. Per un'area sismogenetica, la catalogazione dei [terremoti](#) storici risulta essere fondamentale al fine di determinare, su basi probabilistiche, la severità del terremoto prodotto e il suo tempo di ritorno. La definizione della pericolosità o [rischio sismico](#) di un'area è alla base di qualsiasi studio di [microzonazione](#) e di mitigazione.

Orbitale atomico - http://it.wikipedia.org/wiki/Orbitale_atomico

Un **orbitale atomico** è una [funzione d'onda](#) ψ che descrive il comportamento di un [elettrone](#) in un [atomo](#) ^[1]. In base al [principio di indeterminazione di Heisenberg](#) non è possibile conoscere simultaneamente [posizione](#) e [quantità di moto](#) di una particella come l'elettrone. Le funzioni d'onda descrivono quindi il comportamento dell'elettrone in senso probabilistico. La funzione d'onda ψ in sé non ha un particolare significato fisico, mentre il suo quadrato ψ^2 è legato alla probabilità di trovare l'elettrone in una qualsiasi zona di spazio attorno al nucleo dell'atomo. La "forma" degli orbitali atomici si ottiene con opportuni grafici tridimensionali, che rappresentano le zone dello spazio attorno al nucleo dove l'elettrone può trovarsi con elevata probabilità. In [chimica](#) si distingue, in generale, tra orbitale atomico ed orbitale molecolare; in [fisica](#) invece il concetto di orbitale viene usato per descrivere un qualsiasi insieme di [autostati](#) di un sistema.

Base quantomeccanica

In [meccanica quantistica](#) ed in [chimica quantistica](#) è necessario generalizzare il concetto [classico](#) di [orbita](#) per renderlo compatibile col [principio di indeterminazione di Heisenberg](#). Infatti la meccanica quantistica prevede che non sia possibile associare contemporaneamente ad una [particella](#) una [posizione](#) ed una [quantità di moto](#) ben definita. Il concetto di orbita di un elettrone è sostituito da quello di orbitale, ossia la parte dello spazio entro la quale è massima la probabilità di trovare una particella. In questo contesto non ha senso studiare la traiettoria seguita da un corpo ma

se ne studiano gli [autostati](#). Formalmente un **orbitale** è definito come la [proiezione](#) della [funzione d'onda](#) sulla [base](#) della posizione.

Questa nomenclatura è stata introdotta dopo il [modello atomico](#) proposto da [Niels Bohr](#) e l'[esperimento di Rutherford](#).

L'emissione di una radiazione durante la rotazione degli elettroni intorno al nucleo portava alla conseguenza teorica per la quale l'elettrone avrebbe dovuto perdere gradualmente energia fino a collassare sul nucleo con un movimento a [spirale](#), fenomeno che in realtà non si osserva sperimentalmente. Inizialmente si postulò l'esistenza di un'infinità discreta, di un numero finito di orbite possibile, senza che vi fosse un modello fisico, in grado di giustificare questo assunto. Bohr fornì una spiegazione in base al [dualismo onda-particella](#): due [onde](#) in fase si sommano, mentre due onde in opposizione di fase si annullano.

I movimenti di elettroni lungo orbite fuori fase, cresta d'onda contro ventre, sarebbero distrutti dal fenomeno dell'[interferenza](#). Per cui, possono avere luogo solo movimenti a lunghezza d'onda in fase, che definiscono gli orbitali, e, per essere in fase, sono multipli interi di un valore base, la [costante di Planck](#).

Orbitali atomici

Solitamente in chimica, per favorirne la visualizzazione, un **orbitale atomico** viene approssimato con quella regione di spazio attorno al nucleo [atomico](#) in cui la probabilità di trovare un elettrone è massima (massima [densità di probabilità](#)) ed è delimitata da una superficie sulla quale il modulo dell'ampiezza della funzione d'onda è costante (generalmente [normalizzata](#) a [uno](#)).

La forma di un orbitale *s* (orbitale sferico) e di uno dei tre orbitali *p* (orbitali a doppia asola). Al centro degli assi si trova il nucleo. L'asse *z* è perpendicolare al piano di lettura.^[2]

In altre parole, una regione di spazio attorno ad un nucleo atomico in cui la probabilità di trovarvi un elettrone è massima (di solito superiore ad un limite convenzionalmente fissato nel 90%) è usata per rappresentare graficamente un **orbitale atomico** di quell'elettrone.

Visivamente, tale orbitale può essere meglio rappresentato mediante una nuvola la cui intensità del colore è proporzionale alla *densità di probabilità* di trovare l'elettrone in quel punto e con forme tali da comprendere il 95% della probabilità elettronica. Quest'ultima, in ogni punto dello spazio attorno al nucleo, è pari al quadrato del [modulo](#) della funzione d'onda dell'elettrone nel punto stesso.

Considerando il [campo coulombiano](#) di simmetria [sferica](#), moltiplicando il quadrato della funzione d'onda ψ^2 per il [volume](#) elementare $d\tau$, uguale in questo caso a $4\pi r^2 dr$, è possibile calcolare la probabilità che ha un elettrone di trovarsi in uno spazio sferico definito dallo spessore dr della sfera di raggio r . In particolare, usando la forma Pdr , risulta $P = 4\pi r^2 \psi^2$ e questo valore di P viene definito **funzione di distribuzione radiale**.

Un orbitale può possedere **nodi**, definiti come spazi nei quali il valore della [funzione d'onda](#) cambia segno. Ciò corrisponde ad un valore della funzione di distribuzione radiale, e di conseguenza della probabilità di trovare un elettrone, nulla. Essi possono essere di due tipi: *nodo radiale* (la probabilità è nulla ad un determinato raggio dall'origine) o *nodo angolare* (la probabilità è nulla ad un certo angolo dall'origine).

Il numero e l'estensione degli orbitali atomici è deducibile dalla soluzione dell'[equazione di Schrödinger](#) per un elettrone confinato nella buca del [potenziale elettrico](#) generato dal nucleo ed è correlato ai [numeri quantici](#) che identificano il [livello energetico](#) in cui si trova l'elettrone stesso.

- Il [numero quantico principale](#) n , che può assumere valori [interi](#) non inferiori a 1,^[3] definisce il livello dell'[energia](#) ([autovalore](#) dell'[equazione di Schrödinger](#)), l'estensione dell'orbitale ed il [numero](#) totale di nodi, considerando come nodo anche una superficie sferica a distanza infinita dal nucleo;
- Il [numero quantico azimutale](#) (o numero quantico angolare) l , che può assumere valori interi positivi compresi tra 0 ed $n-1$,^[3] a cui è legato il numero di nodi non sferici e, indirettamente, la simmetria dell'orbitale;
- Il [numero quantico magnetico](#) m_l , che può assumere valori interi compresi tra $+l$ e $-l$,^[3] a cui sono legati il tipo di nodo - planare o conico - la sua orientazione nello spazio e la molteplicità degli orbitali.

Il numero totale dei nodi in un orbitale è dato da $n-l$. Di questi, l sono nodi angolari (e quindi il loro numero dipende esclusivamente dal tipo di orbitale; ad esempio gli orbitali **d** hanno sempre 2 nodi angolari) e dunque $n-l-1$ sono i nodi radiali.

In base al [principio di esclusione di Pauli](#), ogni orbitale può contenere al massimo [due](#) elettroni, dato che essi sono [fermioni](#).^[4] Gli orbitali vengono riempiti partendo da quelli ad energia minima (**stato fondamentale**) e riempiendo, via via, quelli ad energia superiore; se sono presenti degli orbitali *degeneri* (ovvero più [autostati](#) per un unico autovalore, come ad esempio i [tre](#) orbitali p) gli elettroni si distribuiscono preferenzialmente in modo da occuparne il maggior numero.

La disposizione degli elettroni negli orbitali atomici costituisce la [configurazione elettronica](#) di un atomo, dalla quale dipendono la reattività, la *valenza* e la [geometria](#) delle molecole che questi va a comporre.

Esempi

- [idrogeno](#): 1 elettrone nell'orbitale $1s \rightarrow 1s^1$
con un [elettrone spaiato](#), è in grado di formare un legame semplice con gli altri atomi
- [elio](#): 2 elettroni nell'orbitale $1s \rightarrow 1s^2$
non ha elettroni spaiati, non è in grado di formare legami con gli altri atomi
- [azoto](#): 2 elettroni nell'orbitale $1s$, 2 nel $2s$, 3 nel $2p \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^3$
con tre elettroni spaiati - uno in ogni orbitale $2p$ - è in grado di formare tre legami ([ammoniaca](#): NH_3)
- [ossigeno](#): 2 elettroni nell'orbitale $1s$, 2 nel $2s$, 4 nel $2p \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^4$
con due elettroni spaiati - un orbitale $2p$ ne alloca due, gli altri due uno ciascuno - è in grado di formare due legami ([acqua](#): H_2O).

Il modello, però, costruito così semplicemente, non è perfettamente compatibile con i dati sperimentali. Se, ad esempio, l'[azoto](#) lega tre atomi a sé tramite i suoi orbitali p , allora l'[ammoniaca](#) dovrebbe avere i suoi legami a 90° di distanza l'uno dall'altro. Sappiamo, dai dati sperimentali, che non è così; l'[angolo](#) formato da due legami N-H è di circa 107° .

Il [carbonio](#) ha la seguente configurazione elettronica: $1s^2 2s^2 2p^2$ - due elettroni spaiati negli orbitali p ; però l'unico composto del carbonio in cui questi scambia due legami è l'[ossido di carbonio](#), $\text{C}=\text{O}$: in tutti gli altri suoi composti il carbonio forma con gli atomi vicini [quattro](#) legami.

Orbitali atomici ibridi

Gli orbitali atomici convenzionali vengono ottenuti risolvendo l'equazione di Schrödinger per sistemi idrogenoidi (ovvero un nucleo carico positivamente attorno al quale orbita un unico

elettrone). Questi formano una [base](#) completa per descrivere tutti gli stati del sistema. Tuttavia, quando ci sono due o più elettroni che interagiscono fra di loro, questi orbitali non sono più [autostati](#) del sistema. Invece che definire un nuovo insieme di orbitali, per ogni possibile numero di elettroni attorno al nucleo, si preferisce, solitamente, descrivere tutti i sistemi come [combinazione lineare](#) degli orbitali, ottenuti per atomi idrogenoidi. In chimica queste combinazioni vengono solitamente chiamate *orbitali ibridi*.

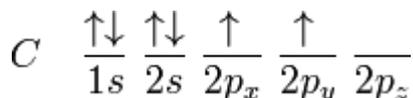
$s + p \rightarrow$ due orbitali ibridi sp allineati lungo l'asse dell'orbitale p originario che puntano in direzioni opposte, quindi con un angolo di 180° fra loro

$s + 2p \rightarrow$ tre orbitali ibridi sp^2 che giacciono sul piano formato dai due orbitali p di partenza e puntano ai tre vertici di un triangolo equilatero, quindi con un angolo di 120° fra loro

$s + 3p \rightarrow$ quattro orbitali ibridi sp^3 che puntano ai quattro vertici di un tetraedro, quindi con un angolo di $109,5^\circ$ fra loro

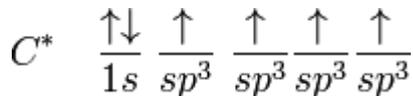
L'ibridazione porta ad avere un gruppo di orbitali *degeneri* in cui gli elettroni andranno a distribuirsi occupandone il più possibile; prendiamo l'esempio del [carbonio](#), la cui [configurazione elettronica](#) stabile è:

$$1s^2 2s^2 2p^2$$



E diventa, in ibridazione sp^3 :

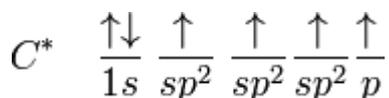
$$1s^2 2(sp^3)^4$$



In questa configurazione ibrida, il carbonio presenta quattro elettroni spaiati, ognuno in un orbitale sp^3 , configurazione che spiega i quattro legami formati dal carbonio nei suoi composti e la geometria tetraedrica delle molecole in cui compare (vedi [alcani](#)).

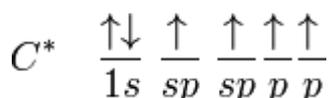
Invece, in ibridazione sp^2 , solo due orbitali p vengono ibridati (vedi [alcheni](#)):

$$1s^2 2(sp^2)^3 2p^1$$

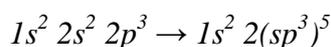


Analogamente, in ibridazione sp , solo un orbitale p viene ibridato (vedi [alchini](#)):

$$1s^2 2(sp)^2 2p^2$$



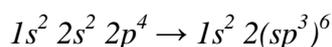
Similmente all'ibridazione sp^3 del carbonio, la configurazione elettronica dell'[azoto](#) cambia in questo modo:



Allocare [cinque](#) elettroni in quattro orbitali sp^3 significa avere un orbitale completo di due elettroni e tre orbitali contenenti un elettrone spaiato. Questo spiega non solo i tre legami che l'azoto forma nei suoi composti, ma anche l'angolo di 107° tra due legami - l'orbitale che ospita i due elettroni tende a comprimere gli altri tre, distorcendo la regolare geometria del tetraedro.

I due elettroni allocati nell'orbitale non coinvolto nel legame possono essere però impiegati per formare un [legame dativo](#), tale comportamento è alla base del comportamento [basico](#) dell'[ammoniaca](#) e delle [ammine](#).

Ultimo esempio è l'[ossigeno](#), la cui configurazione elettronica cambia in questo modo:



Allocare [sei](#) elettroni in quattro orbitali sp^3 significa avere due orbitali completi di due elettroni ciascuno e due orbitali contenenti un elettrone spaiato. Questo spiega i due legami che l'ossigeno forma nei suoi composti ed anche l'angolo di 105° tra i due legami, tipico della [molecola d'acqua](#) - i due orbitali completi non impegnati nei legami tendono a comprimere gli altri due, distorcendo la regolare geometria del [tetraedro](#) in misura ancora maggiore a quanto visto nell'esempio precedente.

L'ibridazione è un processo che richiede energia, dato che gli orbitali p si trovano ad un livello energetico leggermente superiore a quello dei corrispondenti orbitali s , tuttavia questa energia è ampiamente compensata dalla maggiore stabilità dei legami che l'atomo ibridato è in grado di formare.

Le ibridazioni tra orbitali s e p non sono le uniche esistenti. Gli elementi di transizione possono formare ibridi più complessi (es. d^2sp^3), tipici dei [composti di coordinazione](#).

Lacuna - [http://it.wikipedia.org/wiki/Lacuna_\(fisica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Lacuna_(fisica))

In [elettronica](#) la **lacuna elettronica**, chiamata anche semplicemente **lacuna**, è, insieme all'[elettrone](#), uno dei due portatori di [carica](#) che contribuiscono al passaggio di corrente elettrica nei [semiconduttori](#).

La lacuna ha in valore assoluto la stessa carica dell'[elettrone](#), ma contrariamente a quanto accade a questa particella, la sua carica è positiva. Analogamente a come è definita la massa dell'elettrone all'interno di un semiconduttore (in approssimazione della massa efficace), la massa di una lacuna varia a seconda del materiale e del livello energetico cui appartiene, ma è sempre maggiore di quella degli elettroni nel medesimo materiale. Altra caratteristica peculiare delle lacune è che la loro [mobilità](#) è minore di quella degli elettroni: nel silicio il rapporto tra la mobilità degli elettroni e quella delle lacune vale all'incirca 2.5 - 3.

Per quanto sia conveniente considerare le lacune come dei reali portatori di carica positiva, è importante ricordare che la lacuna è una [quasiparticella](#), schematizzabile come la mancanza di un elettrone all'interno di un semiconduttore.

Ad esempio, quando un cristallo di [silicio](#) (tetravalente) viene drogato con specie [atomiche](#) che, come il [boro](#), hanno solo [tre](#) elettroni nello strato di valenza, uno dei [quattro](#) legami del silicio rimane libero. Gli elettroni adiacenti possono quindi con una certa facilità spostarsi ed andare ad occupare questa posizione *libera*; questa posizione viene quindi chiamata anche *vacanza* o *lacuna*.

Un osservatore esterno, concentrandosi sul movimento di carica, vedrebbe una carica positiva che si sposta, anche se ciò non è altro che il risultato dello spostamento degli elettroni nel senso inverso.

La descrizione della lacuna come una particella con carica positiva è comunque molto utile e permette di descrivere facilmente ed accuratamente il comportamento dei semiconduttori.

In [fisica dello stato solido](#) si descrive inoltre uno stato legato tra lacuna ed elettrone, che prende il nome di [eccitone](#).

Drogaggio - <http://it.wikipedia.org/wiki/Drogaggio>

Con il termine **drogaggio**, nell'ambito dei [semiconduttori](#), si intende l'aggiunta al semiconduttore puro ("intrinseco") di piccole percentuali di [atomi](#) non facenti parte del semiconduttore stesso allo scopo di modificare le proprietà elettroniche del materiale. Il drogaggio in genere aumenta la [conducibilità](#) del semiconduttore. Un drogaggio pesante può fargli assumere proprietà elettriche simili a quelle di un metallo ("semiconduttore degenere").

Tipologia

Il drogaggio può essere di tipo:

- **n**: l'atomo drogante ha un [elettrone](#) in più di quelli che servono per soddisfare i [legami](#) del [reticolo cristallino](#) e tale elettrone acquista libertà di movimento all'interno del semiconduttore
- **p**: l'atomo drogante ha un elettrone in meno e tale mancanza o vacanza di elettrone, indicata con il nome di [lacuna](#), si comporta come una [particella carica](#) positivamente e si può spostare all'interno del semiconduttore.

Descrizione

Le quantità di elementi droganti utilizzate per effettuare il drogaggio sono, in termini percentuali, bassissime: si parla per l'appunto di impurità elettroniche in quanto tali impurità sono in grado di modificare le proprietà elettroniche ma non le proprietà [chimiche](#) del semiconduttore. L'entità del drogaggio si misura in *atomi/cm³*.

Riferendosi al [silicio](#), il semiconduttore più utilizzato, che è composto da atomi tetraivalenti, il drogaggio di tipo n può essere effettuato mediante atomi di [fosforo](#) o [arsenico](#), mentre il drogaggio di tipo p è generalmente effettuato mediante atomi di [boro](#).^[1] I drogaggi più bassi che si usano, al limite del silicio intrinseco, sono dell'ordine di 10^{13} atomi/cm³, i più elevati, al limite del silicio degenere, sono dell'ordine di 10^{20} atomi/cm³. Queste concentrazioni sono da confrontare con il numero di atomi di silicio in un centimetro cubo di materiale, che è circa 5×10^{22} .

Si può ottenere un semiconduttore drogato "in bulk" aggiungendo le opportune impurezze durante la sua preparazione (nel materiale fuso, nel caso del silicio). Per drogarne invece un sottile strato superficiale (per ottenere p.es. [giunzioni](#)), le tecniche di drogaggio comunemente utilizzate sono la [diffusione termica](#) e l'[impiantazione ionica](#).

Diodi - <http://it.wikipedia.org/wiki/Diodo>

Il **diodo** è un [componente elettronico](#) attivo non-lineare a due terminali ([bipolo](#)), la cui funzione ideale è quella di permettere il flusso di [corrente elettrica](#) in un verso e di bloccarla totalmente nell'altro, la qual cosa viene realizzata ponendo dei vincoli (contatti metallici) alla libertà di movimento e di direzione dei [portatori di carica](#).

Il simbolo circuitale del *diode* esprime chiaramente questa funzione: il triangolo indica la direzione che permette il flusso di corrente elettrica considerato convenzionalmente dal polo positivo (denominato Anodo) a quello negativo (denominato Catodo), mentre la sbarra ne indica il blocco.

Da questa struttura iniziale si sono evoluti nel tempo sia componenti con struttura più complessa basati su un principio differente, come i diodi a tempo di transito, sia nuovi dispositivi a tre terminali, come gli [SCR](#) e i [triac](#), che hanno abbandonato il nome di "diode".

Fu inventato da [John Ambrose Fleming](#) nel 1904.

Diodo ideale

In molte applicazioni di interesse, la [caratteristica tensione-corrente](#) di un **diodo ideale**, ottenuta in condizioni statiche, può essere sostituita con una funzione lineare a tratti. In tale funzione la corrente è esattamente zero se la tensione tra anodo e catodo non raggiunge un certo valore V_{on} e diviene un valore arbitrario e positivo quando la tensione ai capi del dispositivo è esattamente V_{on} . Il valore di V_{on} rappresenta quel valore di tensione al di sotto del quale il reale valore della corrente che scorre nel dispositivo è trascurabile ai fini dei nostri calcoli. Nessuna approssimazione del funzionamento del dispositivo mediante effetti resistivi è, in alcun caso, accettabile.

Quando la differenza di potenziale ai capi del *diodo ideale* è maggiore di 0 (cioè quando la [corrente elettrica](#) fluisce nel verso convenzionalmente positivo, dal polo positivo a quello negativo), questo è detto essere **polarizzato in diretta**, mentre quando la differenza di potenziale è minore di 0, questo è detto essere **polarizzato in inversa**. Questa nomenclatura viene utilizzata anche per i diodi reali. Si osservi che il valore di 0,7 V (valore approssimativo) è solo un tipico valore comodo nei conti, ma che non può essere legato a proprietà fisiche o costruttive dello stesso dispositivo.

Diodo in corrente continua

Il Diodo quando viene attraversato da una corrente continua è riconducibile ad una [resistenza](#), in serie, e un [generatore di tensione](#). I valori della resistenza ovviamente sono definiti dal costruttore, come anche la tensione del generatore.

Diodo in corrente alternata

Il diode attraversato da corrente alternata fa passare solo la semionda positiva (se polarizzato direttamente) della sinusoide e blocca la semionda negativa. Con configurazione di diodi a ponte di [Graetz](#) viene generata un'onda raddrizzata formata solo da semionde positive e quindi è chiamato raddrizzatore di onde sinusoidali.

Diodo a giunzione

I [diodi a giunzione p-n](#) sono dei diodi realizzati mediante processi metallurgici che prevedono la diffusione di impurità di tipo accettore in cristalli di [silicio](#) preventivamente drogati mediante atomi donatori (o viceversa) e la loro caratteristica tensione corrente è approssimabile tramite l'[equazione del diode ideale di Shockley](#). La caratteristica tensione corrente del dispositivo è una funzione non lineare; per valori di polarizzazione sufficientemente grandi rispetto alla tensione termica (a temperatura ambiente 26mV) vale la relazione:

$$\ln \frac{I}{I_0} = \frac{V_D}{V_T}$$

dove I è l'intensità di corrente, I_0 indica la [corrente di saturazione inversa](#), V_D è la tensione applicata ai capi del diodo e V_T la [tensione termica](#).

Il diodo, polarizzato direttamente, inizia a condurre una volta che la tensione applicata supera la tensione di soglia V_S ; questa varia in funzione del tipo di materiale con cui è realizzato il diodo e vale circa 0,6V nei diodi al silicio; quando tale diodo è in conduzione nei calcoli conviene utilizzare il valore approssimato di 0,7V.

È sempre necessario limitare la corrente condotta da un diodo affinché non superi mai la massima corrente prevista per quello specifico *diodo*, oltre la quale può verificarsi la rottura fisica del dispositivo.

I [diodi a giunzione p-n reali](#) hanno una caratteristica tensione corrente analoga a quella ideale, con alcune differenze: quando polarizzati inversamente, invece di impedire completamente il passaggio di corrente vengono attraversati dalla I_0 , la corrente di saturazione inversa, il cui valore è legato all'area del dispositivo ed alla concentrazioni del drogante. Con l'aumentare del modulo della tensione inversa fino ad un certo valore (detto **tensione di Zener** V_{zk} , come si può notare nel 3° e 4° quadrante della caratteristica del diodo reale a lato), che può andare da alcuni Volt ad alcune decine di Volt, la corrente aumenta in modulo molto rapidamente: tale regime di funzionamento, detto **tensione di rottura** o di breakdown per il modo di generazione degli elettroni di conduzione all'interno del diodo, non è dannoso per il componente finché la potenza dissipata rimane nei limiti tollerati: i **diodi Zener** per esempio sono progettati espressamente per funzionare in tensione di rottura o tensione di zener. Tuttavia, vista la caratteristica molto ripida, il funzionamento in breakdown nei normali diodi è molto pericoloso e porta in genere alla rottura del componente.

Diodo al Germanio

Il diodo al germanio è costituito da una giunzione a semiconduttore realizzata con germanio; ha una tensione di soglia più bassa (tipicamente di 0,2 V) che lo rende particolarmente adatto per la rivelazione dei segnali radio (demodulatore o rivelatore per la modulazione d'ampiezza).

Diodo Schottky

Il diodo Schottky è costituito da una giunzione metallo-semiconduttore invece che da una giunzione a semiconduttore. Le sue principali caratteristiche sono:

- la tensione di soglia a 0,35 V invece di 0,6 V
- tempi di commutazione brevissimi

Viene usato nei dispositivi [sTTL](#).

Diodo varicap o varactor

Durante la polarizzazione inversa, si accumula [carica elettrica](#) ai due lati della zona di giunzione, in cui si crea un forte campo elettrico dando origine ad una certa *capacità parassita*: in pratica il diodo si comporta come se fosse in parallelo ad un piccolo [condensatore](#). La particolarità che rende interessante questa piccola capacità del diodo è che essa diminuisce con l'aumentare della tensione inversa.

I diodi varicap sono studiati appositamente per sfruttare questo fenomeno e si comportano in tutto come dei condensatori variabili controllati in tensione: la capacità massima è di circa 500 pF nei modelli maggiori, ma può scendere fino a 1pF. La legge di dipendenza capacità-tensione dei diodi varicap non è lineare, ma si linearizza in combinazione con un induttore in un circuito LC come

quello qui a lato, rendendo la frequenza di risonanza del circuito proporzionale alla tensione di controllo V_c .

Le applicazioni dei diodi varicap sono in generale negli stadi di sintonia dei [ricevitori radio](#) e negli [oscillatori controllati in tensione](#) (VCO).

Diodo Zener

Il [diodo Zener](#) è costruito appositamente per sfruttare il funzionamento in valanga del diodo. È infatti un diodo costruito secondo caratteristiche particolari per dissipare potenza con utilizzo in zona di "break down". In questo stato la tensione ai capi del diodo rimane approssimativamente costante al variare della corrente, perciò il diodo può fornire una tensione di riferimento relativamente costante: lo zener è un diodo ottimizzato per questo uso, in cui la tensione di zener è resa il più possibile insensibile alla corrente di valanga, anche se comunque una tensione inversa eccessiva porta il diodo alla rottura. Il motivo dell'elevata pendenza della corrente inversa è dovuta principalmente da due casi: l'effetto valanga e l'[effetto Zener](#).

L'aumento della tensione inversa provoca un'accelerazione degli elettroni che, aumentando la loro energia, ionizzano il reticolo cristallino (valanga); ma possono anche spezzare i legami covalenti in modo da estrarre elettroni (zener). Questi due effetti si compensano per una tensione circa uguale a 6 V (a seconda del diodo zener utilizzato si possono avere tensioni diverse). Sopra i 6 V prevale l'effetto valanga, sotto l'effetto zener.

Tuttavia, per quanto lieve, la dipendenza dalla corrente è sempre presente, e peggio ancora la tensione di zener varia sensibilmente con la temperatura ambientale: per questo motivo gli zener vengono utilizzati soprattutto per generare tensioni di polarizzazione e stabilizzazione di alimentatori e non come campioni di tensione. Poiché i diodi zener vengono utilizzati in polarizzazione inversa, si ha un [effetto capacitivo](#) associato alla [zona di svuotamento](#) in prossimità della giunzione, questa capacità detta di transizione varia tra valori trascurabili di qualche nF ed è rilevante per i diodi di elevata potenza in quanto condiziona la massima frequenza di lavoro.

LED

Questi diodi emettono luce visibile se polarizzati direttamente: di solito vengono usati per segnalazione su pannelli di controllo e come spie luminose, oppure come trasmettitori per telecomandi e fibre ottiche. Di recente sono stati sviluppati modelli ad alta luminosità adatti per illuminotecnica, e già oggi esistono in commercio numerosi apparecchi di illuminazione che utilizzano i LED come sorgenti in alternativa alle tradizionali [lampade ad incandescenza](#) e alle lampade fluorescenti, con grossi vantaggi in termini di risparmio energetico, durata e resa cromatica. La loro tensione di polarizzazione diretta varia a seconda della lunghezza d'onda della luce che emettono, ed emettono tanta più luce quanta più corrente li attraversa: in genere è necessario una corrente minima di 4 mA (corrente di soglia) perché possano emettere luce in quantità percettibile.

Colore	Tensione diretta
Infrarosso	1,3 V
Rosso	1,8 V
Giallo	1,9 V
Arancio	2,0 V
Verde	2,0 V
Azzurro	3,0 V
Blu	3,5 V
Ultravioletto	4,0-4,5 V

La corrente varia in funzione del tipo di led impiegato. I diodi LED *normali* richiedono di media 15 mA per emettere una buona luminosità. Nel caso di LED HL (alta luminosità) la corrente sale fino a valori di circa 20-25 mA. LED di nuova concezione, ad altissima luminosità sono in grado di assorbire correnti di molti ampere, per questi, è previsto l'accoppiamento meccanico di un dissipatore di calore.

Diodo laser

Come i diodi LED; anche i diodi laser emettono luce tramite la ricombinazione di elettroni e lacune nella zona di barriera del diodo: la differenza fondamentale è che questa emissione è stimolata dalla luce stessa, e che la luce emessa è coerente.

Questo viene ottenuto con una struttura del diodo a sandwich con tre zone drogate in modo diverso ($n - p - p+$) che presentano anche un diverso [indice di rifrazione](#) ottico: in pratica, le zone di confine $n-p$ e $p-p+$ si comportano come due specchi che riflettono la luce emessa nel diodo e la confinano al suo interno. In questo modo i fotoni in viaggio nel diodo stimolano gli elettroni e le lacune negli atomi di semiconduttore a ricombinarsi emettendo un altro fotone con la stessa lunghezza d'onda e la stessa fase di quello incidente, cioè stimolano una emissione coerente.

Normalmente i diodi laser sono realizzati in [arseniuro di gallio](#) e [alluminio](#), per ottenere una differenza di indici di rifrazione fra le tre zone che sia il più possibile alta. L'emissione laser si instaura polarizzando il diodo portandolo in conduzione diretta, e solo quando si oltrepassa una corrente di soglia variabile a seconda dei modelli dai 20 ai 30 mA.

Diodo tunnel

Inventato nel 1957 da [Leo Esaki](#) nei laboratori [Sony](#), in questo diodo il drogaggio dei due semiconduttori $p-n$ è tanto forte da farlo degenerare in due conduttori, separati da una barriera di potenziale estremamente alta e stretta. In queste condizioni alcuni elettroni però riescono ugualmente a passare, attraverso il fenomeno quantistico dell'[effetto tunnel](#) quando il dispositivo è polarizzato con una tensione diretta ma ancora insufficiente a portare il diodo in regime di conduzione classica: aumentando la tensione, la corrente "tunnel" diminuisce fino ad un minimo, oltre il quale subentra il meccanismo di conduzione termica del diodo normale e la corrente riprende a salire.

Questo tratto di caratteristica a pendenza negativa permette al diodo di trasferire energia ai segnali che lo attraversano: tipici impieghi dei diodi tunnel sono nel campo delle microonde da 30 MHz a 300 GHz in circuiti a bassa potenza come [oscillatori locali](#) e [PLL](#) a microonde. La velocità di commutazione e dei fronti di salita e discesa nelle tensioni inferiori ai 50 mV è tuttora irraggiungibile con tecnologie di commutazione a transistor.

Diodo inverso

In questo particolare diodo tunnel uno dei due semiconduttori è meno drogato e si trova al limite del caso degenerare: questo fa sì che il diodo inverso (o *back diode*) si comporti come un normale diodo se polarizzato direttamente, ma conduca anche se polarizzato inversamente; in effetti il diodo inverso (da qui il nome) conduce molto meglio in polarizzazione inversa che in polarizzazione diretta. Il suo uso principale è nella rivelazione di piccoli segnali, o come miscelatore.

Diodo PiN

Il **diodo PiN** è un dispositivo elettronico che appartiene alla categoria dei dispositivi elettronici di potenza. Denominazioni comunemente utilizzate per lo stesso componente sono: *diodo di potenza* e *diodo P-v-N*. Il diodo PiN è caratterizzato dalla capacità di sopportare tensioni inverse elevate (>50 V) ed è in genere capace di condurre elevate correnti dirette (>1 A).

La struttura del diodo PiN presenta una regione molto spessa, non drogata o con drogaggio molto debole, detta *regione intrinseca* ed indicata dalla *i* nella sigla del dispositivo, e interposta fra le due zone P ed N, da cui il nome; tale regione intrinseca è necessaria per aumentare la [tensione di rottura](#). In linea di principio la regione intrinseca essendo poco drogata dovrebbe opporre una forte resistenza al passaggio di corrente che renderebbe il diodo inutilizzabile. Non è così invece, perché durante la fase di conduzione diretta le regioni P ed N iniettano portatori di carica ([lacune](#) ed [elettroni](#), rispettivamente) che riducono enormemente la resistenza della regione intrinseca.

Caratteristiche peculiari che differenziano il diodo PiN dal diodo a giunzione PN, (detto anche diodo di segnale per distinguerlo dal diodo di potenza) sono i fenomeni di reverse recovery e di forward recovery. Questo tipo di diodi è usato in circuiti che lavorano a tensioni elevate (ad esempio l'alimentazione di rete) e che gestiscono rilevanti quantità di energia. Vengono anche impiegati nei primi stadi RF dei ricevitori radio professionali come attenuatori di segnale, eventualmente facenti parte di un circuito automatico di guadagno (CAG).

Diodi a tempo di transito

Questi dispositivi sono chiamati diodi impropriamente, perché non sono basati (o non principalmente) sull'effetto barriera e non hanno la struttura *p-n* dei diodi, ma sono costituiti da tre o più zone con vari drogaggi a varie intensità; sono costruiti su semiconduttori compositi, in genere [fosfuro di indio](#) o [arseniuro di gallio](#).

Diodo IMPATT

IMPATT è l'acronimo di **IMP**act ionization **A**valanche **T**ransit **T**ime. Questo diodo ha una struttura complessa (n+ - p - i - p+) e, come dice il nome, lavora in polarizzazione inversa sfruttando l'effetto valanga. Più precisamente viene polarizzato molto vicino alla sua tensione di Zener, solitamente di un centinaio di volt, e racchiuso in una cavità risonante nella gamma delle microonde: l'inizio dell'effetto valanga nel diodo causa un impulso radio che viene riflesso nella cavità e modula il successivo passaggio di cariche attraverso il diodo.

Il movimento disordinato dei portatori nell'effetto valanga genera un [rumore](#) di fondo molto alto che si somma al segnale utile, limitando il campo di utilizzazione alle sole sorgenti a microonde di potenza nella gamma fino a 300 GHz, con un rendimento del 30% a 10 GHz che decresce con la frequenza, in cui peraltro gli IMPATT si comportano egregiamente.

Diodo TRAPATT

TRAPATT è l'acronimo di **TR**Apped **P**lasma **A**valanche **T**ransit **T**ime. Sono diodi IMPATT particolari, in cui la cavità risonante è ricavata direttamente nel diodo: i campi elettromagnetici interni alla regione di valanga sono perciò tanto intensi da far parlare di un [plasma](#) di elettroni e lacune all'interno della regione intrinseca.

Questi diodi riescono a superare le limitazioni in frequenza degli IMPATT normali arrivando a generare frequenze fino a 1000 GHz, al limite dello spettro infrarosso.

Diodo BARITT

BARITT è l'acronimo di **BARrier Injection Transit Time**. È un derivato del diodo IMPATT, di struttura (p+ - n - n+ - n - p+), che offre una minore efficienza e potenza, ma anche un minor livello di rumore generato, poiché il suo funzionamento si basa sul tempo di transito dei portatori di carica attraverso una barriera e non sull'effetto valanga: il diodo BARITT lavora in polarizzazione diretta.

Grazie alla minore rumorosità e alla maggiore stabilità della frequenza generata, i BARITT sono usati in oscillatori locali e rivelatori Doppler per microonde.

Fotodiodo

Lo scopo dei fotodiodi è di rivelare la radiazione luminosa (visibile o infrarossa) che colpisce il corpo del diodo stesso. La struttura interna di un [fotodiodo](#) è molto simile a quella dei diodi PIN: la zona intrinseca è progettata per reagire alla luce generando una coppia di portatori (un elettrone e una lacuna) che contribuiscono al passaggio di corrente attraverso il diodo. Si usano in polarizzazione inversa: in questa condizione, la corrente che attraversa il diodo è dovuta (quasi) esclusivamente alla luce incidente, ed è proporzionale all'intensità luminosa.

Superdiodo (o [raddrizzatore di precisione](#))

A differenza dei precedenti, questo non è un componente semplice ma un circuito composto da un diodo e da un [amplificatore operazionale](#): in pratica l'operazionale amplifica lo stato di conduzione del diodo. Il circuito nel suo insieme, quindi, si comporta quasi come un diodo ideale con tensione di polarizzazione diretta molto bassa, prossima agli 0V.

Questo circuito viene usato nei raddrizzatori di precisione, nei circuiti per misure elettriche e in quei casi dove il segnale da raddrizzare ha una ampiezza minore degli 0,7 volt che rappresentano la soglia di conduzione dei diodi normali. Non viene però usato negli apparecchi radio, a causa dei limiti degli amplificatori operazionali alle alte frequenze.

Polarità

I diodi di segnale, nella pratica, hanno quasi tutti una striscia riconducibile a uno dei reofori uscenti dal componente e che ne denota la polarità. Si deve intendere che tale striscia è da collegarsi al negativo della corrente per ottenerne la conduzione. Invece, sul simbolo grafico del diodo si deve intendere tale striscia (polo negativo) come sovrapponibile al segmento trasversale che lambisce la punta del triangolo del simbolo stesso, inteso perciò che il triangolo fa capo al reoforo positivo (se si vuole la conduzione). Se si invertono i fili sul diodo, si ha l'effetto di non avere alcun flusso di corrente.

Transistor - <http://it.wikipedia.org/wiki/Transistor>

In [elettronica](#), il **transistor** (abbreviazione del termine [inglese transfer-resistor](#)) detto anche **transistore**, è un [dispositivo a semiconduttore](#) largamente usato sia nell'[elettronica analogica](#) che nell'[elettronica digitale](#).

Le principali funzioni che gli vengono affidate all'interno un circuito elettronico sono a) l'amplificazione di un segnale in entrata oppure b) il funzionamento da interruttore (switcher). La corrente o la differenza di potenziale in uscita da un transistor possono essere anche molto maggiori

delle rispettive grandezze in entrata. I transistor possono lavorare in maniera individuale oppure essere implementati anche in grande numero all'interno dei circuiti integrati.

Il transistor è composto da un materiale [semiconduttore](#) al quale sono applicati tre terminali che lo collegano al [circuito](#) esterno. L'applicazione di una [tensione elettrica](#) o di una [corrente](#) a due terminali permette di regolare il flusso di corrente che attraversa il dispositivo, e questo permette di [amplificare](#) il segnale in ingresso.

Il funzionamento del transistor è basato sulla [giunzione p-n](#), scoperta casualmente da [Russell Ohl](#) il [23 febbraio 1939](#).

Esistono principalmente due diverse tipologie di transistor, il [transistor a giunzione bipolare](#) ed il [transistor ad effetto di campo](#), ed è possibile miniaturizzare i dispositivi di entrambe le categorie all'interno di [circuiti integrati](#), il che li rende un componente fondamentale nell'ambito della microelettronica.

I transistor vengono impiegati principalmente come [amplificatori](#) di segnali elettrici o come [interruttori](#) elettronici comandati, ed hanno in larga parte sostituito i [tubi termoionici](#).

Il termine "transistor" è stato utilizzato nel linguaggio comune anche per identificare le piccole [radio AM](#) portatili a [pile](#), che furono la prima applicazione di questi dispositivi a raggiungere il mercato di massa, negli [anni cinquanta](#).

Storia

Il [fisico Julius Edgar Lilienfeld](#) progettò il primo transistor in [Canada](#) nel [1925](#), descrivendo un dispositivo simile all'attuale [transistor ad effetto di campo](#).^[1] Tuttavia Lilienfeld non pubblicò alcuna ricerca a tal proposito, e nel 1934 l'inventore tedesco [Oskar Heil](#) brevettò un dispositivo molto simile.^[2]

Il primo transistor era realizzato con due elettrodi le cui punte molto sottili e distanti tra loro alcuni centesimi di millimetro, per la precisione da 127 a 50 [micron](#), erano premute sulla superficie di una piastrina di un cristallo di germanio molto puro, policristallino e di tipo n. La tecnica del contatto puntiforme era già nota ed utilizzata per la costruzione dei diodi rivelatori. Provvisoriamente, dato che il transistor funzionava in modo analogo ad un [triode](#), venne chiamato *triode a stato solido*: il nome definitivo deriva dall'unione dei termini "[TRAN](#)Sconductance" e "[var](#)ISTOR". Il primo prototipo funzionante fu realizzato nel mese di dicembre del [1947](#) da due ricercatori dei laboratori [Bell Labs](#): [Walter Brattain](#) e [John Bardeen](#) del gruppo di ricerca guidato da [William Shockley](#). Era questo il transistor a contatti puntiformi (a punte) mentre si deve a [William Shockley](#) l'ideazione, nel gennaio 1948^[3], e la formulazione, nella primavera dell'anno successivo, della teoria del transistor a giunzione chiamato inizialmente dallo stesso Shockley, nel suo diario di laboratorio, "sandwich transistor". Nel 1956 i tre ricercatori furono insigniti del [premio Nobel per la Fisica](#) con la motivazione «per le ricerche sui semiconduttori e per la scoperta dell'effetto transistor». Già verso la fine degli anni '50 la produzione di transistor si orientò verso l'utilizzo del silicio come elemento semiconduttore e negli anni '70 il transistor al germanio divenne obsoleto.

Le tipologie dei contenitori del dispositivo si sono moltiplicate, e negli anni sono stati usati materiali come la [ceramica](#), il [metallo](#), la [plastica](#) o assemblaggi misti. Negli anni '60 venne usato anche il [vetro](#): il produttore europeo [Philips](#), racchiudeva i propri dispositivi di piccola potenza, ad esempio quelli siglati OC70, OC71, in un'ampollina cilindrica in vetro verniciata in nero, riempita di grasso al [silicone](#). Nel caso il dispositivo avesse dissipazione maggiore, come l'OC72, il dispositivo era ricoperto semplicemente da un cappuccio in alluminio, avendo [reofori](#) identici, il collettore era contraddistinto da un puntino di vernice rossa scura. Nel tempo molte tipologie di contenitori sono andate in disuso a favore di geometrie più efficienti nello smaltimento del calore

prodotto. I dispositivi di potenza attuali per bassa frequenza, compresi alcune tipologie di [diodi](#) e di [IC](#), vengono assemblati nel contenitore standard definito [TO-3](#), provvisto di due flange forate, adatte al fissaggio sul [dissipatore](#) tramite una coppia di viti. Realizzato in [acciaio](#), [rame](#), o [alluminio](#), con temperatura ambiente di 25 °C è in grado di trasferire al dissipatore, 300 watt di potenza termica generata dal [Die](#).

Con riguardo al movimento delle cariche elettriche all'interno del dispositivo, i transistor sono indicati come [transistor bipolari](#), in cui sia [elettroni](#) che [lacune](#) contribuiscono al passaggio della corrente. Sia il transistor a contatti puntiformi che quello a giunzione sono transistor di tipo bipolare. Il tipo a contatti puntiformi, d'importanza storica per essere stato il primo realizzato ed a trovare, seppure limitatamente, pratica applicazione, diventò presto obsoleto per essere soppiantato da quello a giunzione, più stabile e meno rumoroso. In seguito furono creati altri tipi di transistor, in cui il passaggio di corrente avveniva grazie ad un solo tipo di [portatori di carica](#): questi dispositivi sono i [transistor ad effetto di campo](#). Entrambe le tipologie, nel tempo, hanno dato origine a molti tipi diversi di transistor, usati per gli scopi più vari. Lo [strumento di misura](#) utilizzato per la verifica e la caratterizzazione dei molteplici parametri dei transistor, nonché dei [diodi](#), è il [curve tracer](#) (tracciacurve), termine dato allo strumento in relazione ai segnali elettrici visualizzati sottoforma di grafico somiglianti a molteplici "curve", l'aspetto è simile ad un [oscilloscopio](#): questo tipo di strumento è storicamente prodotto dalla società [Tektronix](#).

Tipologie

Le due principali tipologie di transistor sono il transistor a giunzione bipolare ed il transistor ad effetto di campo, descritti di seguito:

Transistor a giunzione bipolare o BJT

Il transistor a giunzione bipolare, anche chiamato con l'acronimo BJT, è una tipologia di transistor largamente usata nel campo dell'[elettronica analogica](#).

Il transistor a giunzione bipolare è un componente elettronico attivo usato principalmente come [amplificatore](#) ed interruttore.

Si tratta di tre strati di materiale [semiconduttore drogato](#), solitamente il [silicio](#), in cui lo strato centrale ha drogaggio opposto agli altri due, in modo da formare una doppia [giunzione p-n](#). Ad ogni strato è associato un terminale: quello centrale prende il nome di *base*, quelli esterni sono detti *collettore* ed *emettitore*. Il principio di funzionamento del BJT si fonda sulla possibilità di controllare la [conduttività elettrica](#) del dispositivo, e quindi la [corrente elettrica](#) che lo attraversa, mediante l'applicazione di una [tensione](#) tra i suoi terminali. Tale dispositivo coinvolge sia i [portatori di carica](#) maggioritari che quelli minoritari, e pertanto questo tipo di transistor è detto *dipolare*.

Ognuno dei tre terminali può essere considerato un terminale di ingresso o di uscita, e due di essi possono essere connessi: in tal caso il transistor può assumere le configurazioni [a base comune](#), a [collettore comune](#) o a [emettitore comune](#).

Insieme al [transistor ad effetto di campo](#), il BJT è il transistor più diffuso in elettronica. Il dispositivo è in grado di offrire una maggiore [corrente](#) in uscita rispetto al FET, mentre ha lo svantaggio di non avere il terminale di controllo isolato.

[Transistor di potenza](#) a effetto di campo a canale N

Transistor ad effetto di campo

Il transistor ad effetto di campo, anche chiamato con l'acronimo FET, è una tipologia di transistor largamente usata nel campo dell'[elettronica digitale](#) e diffusa, in maniera minore, anche nell'[elettronica analogica](#).

Si tratta di un substrato di materiale [semiconduttore](#) drogato, solitamente il [silicio](#), al quale sono applicati quattro terminali: *gate* (porta), *source* (sorgente), *drain* (pozzo) e *bulk* (substrato); quest'ultimo, se presente, è generalmente connesso al source. Il principio di funzionamento del transistor a effetto di campo si fonda sulla possibilità di controllare la [conduttività elettrica](#) del dispositivo, e quindi la [corrente elettrica](#) che lo attraversa, mediante la formazione di un [campo elettrico](#) al suo interno. Il processo di conduzione coinvolge solo i [portatori di carica](#) maggioritari, pertanto questo tipo di transistor è detto *unipolare*.

La diversificazione dei metodi e dei materiali usati nella realizzazione del dispositivo ha portato alla distinzione di tre principali famiglie di FET: [JFET](#), [MESFET](#) e [MOSFET](#). Il JFET, abbreviazione di *Junction FET*, è dotato di una [giunzione p-n](#) come elettrodo rettificante; il MESFET, abbreviazione di *Metal Semiconductor FET*, una giunzione Schottky raddrizzante metallo-semiconduttore ed il MOSFET, abbreviazione di *Metal Oxide Semiconductor FET*, genera il campo elettrico grazie ad una struttura metallica esterna, separata dalla giunzione da uno strato di dielettrico.

Il transistor a effetto di campo è stato inventato da [Julius Edgar Lilienfeld](#) nel 1925, ma i primi dispositivi costruiti, i [JFET](#), risalgono al 1952, quando fu tecnologicamente possibile realizzarli. Il FET più diffuso è il [MOSFET](#), introdotto da Kahng nel 1960.^[4]

Insieme al [transistor a giunzione bipolare](#), il FET è il transistor più diffuso in elettronica: a differenza del BJT esso presenta il vantaggio di avere il terminale gate di controllo isolato, nel quale non passa alcuna corrente; mentre ha lo svantaggio di non essere in grado di offrire molta [corrente](#) in uscita. In genere i circuiti con transistor FET hanno infatti una alta [impedenza](#) di uscita, erogando quindi correnti molto deboli.

Altri tipi di transistor

Con l'evolversi della tecnologia sono stati creati diversi altri tipi di transistor, adatti a usi particolari. Tra i più diffusi vi sono il [transistore unigiunzione](#), un generatore di impulsi che non può amplificare né commutare, e gli [Insulated Gate Bipolar Transistor](#), dispositivi ibridi fra i transistor bipolari e i MOSFET, adatti a gestire correnti elevate. Vi sono inoltre transistor sviluppati per applicazioni di ricerca, capaci di ottenere prestazioni quali sopportare elevate correnti o elevate frequenze di funzionamento: nel 2006 un transistor al silicio-germanio ha raggiunto in laboratorio la frequenza di commutazione di 500 GHz.^[5]

Fase - [http://it.wikipedia.org/wiki/Fase_\(segnali\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Fase_(segnali))

In [fisica](#) ed in [teoria dei segnali](#), la **fase** di una [funzione periodica](#) ad un certo istante temporale è la frazione di periodo trascorsa rispetto ad un tempo fissato.^[1] Si tratta di un particolare istante durante lo svolgersi di un fenomeno periodico, sia esso un [moto](#) o un [segnale elettrico](#), che viene misurato tramite un [angolo](#), detto **angolo di fase**.

Fase nel moto armonico

L'esempio in un certo senso canonico di moto periodico è il cosiddetto [moto armonico](#): è utile cominciare ad analizzare il significato del termine *fase* con riferimento a questo particolare tipo di moto, sia per la sua semplicità che per la frequenza con cui lo si può trovare in natura.

In un moto armonico, indicata con $x(t)$ la posizione istantanea del [punto materiale](#) in moto nel tempo (o il valore istantaneo del segnale, ad es. la sua [tensione](#)), con A l'ampiezza del moto, con ω la sua [frequenza angolare](#) (detta anche "pulsazione") e con t il tempo, la [legge del moto](#) risulta essere:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

in cui per semplicità si è ipotizzato (senza perdita di generalità) che il tempo iniziale e la posizione iniziale siano nulli e al solito "cos" indichi la funzione trigonometrica [coseno](#).

Si tenga anche presente che le quantità A , ω e φ_0 , in questo particolare moto, sono costanti. Perciò l'unica grandezza variabile qui è il tempo e di conseguenza l'andamento del moto in un [diagramma spazio - tempo](#) sarà simile al grafico del coseno (vedi figura a lato). Le uniche differenze sono dovute ad A , che "amplifica" verticalmente il segnale (nel nostro caso di 2 volte) e alla costante φ_0 che produce una "traslazione" del segnale della quantità $-\varphi_0 / \omega$ (nel nostro caso pari a $4/3$, come si nota in figura).

La quantità tra parentesi a destra nella formula (1), cioè l'argomento $\omega t + \varphi_0$ del coseno, viene detta **fase del moto** φ , mentre la sola parte φ_0 si chiama **costante di fase** oppure **fase iniziale**.

Si noti che entrambe queste grandezze rappresentano angoli; la prima rappresenta l'angolo, variabile nel tempo, associato al moto armonico (quando cioè si pensi al moto armonico come proiezione di un [moto circolare uniforme](#) su un suo [diametro](#)), mentre la seconda rappresenta il valore iniziale dell'angolo di fase, cioè quello associato alla posizione del moto corrispondente all'istante considerato come iniziale (che noi abbiamo supposto essere zero per semplicità).

Si noti altresì che, con un'opportuna scelta del tempo iniziale, si può sempre porre la costante di fase pari a zero, senza perdita di generalità.

In tal caso la formula si semplifica in:

$$x(t) = A \cos(\omega t)$$

Quindi, dato che il tempo iniziale è arbitrario, anche la fase iniziale lo sarà.

Inoltre si può vedere facilmente che se si pone invece $\varphi_0 = -90^\circ$ (ovvero $-\pi / 2$ radianti, in unità del [Sistema Internazionale](#)) si ricava:

$$x(t) = A \cos(\omega t - \pi / 2) = A \sin(\omega t)$$

in cui naturalmente "sin" indica la funzione trigonometrica [seno](#).

Ciò significa che per trattare un moto armonico si può indifferentemente usare il seno o il coseno, dato che una funzione si trasforma nell'altra semplicemente tramite un banale cambiamento di fase iniziale.

Sfasamento

Quando si considerano due segnali [sinusoidali](#) aventi la stessa [frequenza](#), si può poi parlare di **differenza di fase** tra loro $\Delta\phi$ o **sfasamento**, intendendo con ciò da un punto di vista matematico la differenza tra le due costanti di fase

$$\Delta\phi = \phi_0 - \phi_0'$$

In figura ad es. il segnale in nero è lo stesso della figura precedente, ingrandito e in funzione dell'angolo di fase anziché del tempo; il segnale in rosso (che è ampio la metà) ha fase iniziale pari a $3/4 \pi$ radianti. Perciò lo sfasamento tra i due segnali sarà pari a:

$$\Delta\phi = 3 / 4\pi - (- \pi / 3) = 13 / 12\pi$$

Da un punto di vista fisico lo sfasamento rappresenta l'angolo corrispondente alla differenza temporale tra il raggiungimento successivo di una stessa particolare fase (ad es. il massimo) tra i due segnali (in figura è l'angolo corrispondente al segmento orizzontale in verde che mostra la separazione angolare tra gli istanti corrispondenti a due massimi adiacenti, del primo e del secondo segnale).

Anticipo e ritardo di fase, casi particolari

Un caso molto comune è quello in cui i due segnali siano la [tensione](#) v e la [corrente](#) i in un [circuito elettrico](#) in [corrente alternata](#). In tal caso si può parlare di tensione in **anticipo di fase** (oppure in **ritardo di fase**) sulla corrente; il che per inciso può anche essere equivalentemente espresso dicendo invece che la corrente è rispettivamente in ritardo (oppure in anticipo) di fase sulla tensione.

Ad esempio, sempre con riferimento alla figura precedente, se il segnale in nero rappresenta la tensione e il segnale in rosso la corrente, si può dire che la tensione è in ritardo di fase (il suo massimo viene dopo) di $13/12 \pi$ rad rispetto alla corrente. Naturalmente si può anche pensare che la tensione sia in anticipo rispetto alla corrente di $11/12 \pi$ rad (che si ottiene da $5/4 \pi - \pi/3$); NB: si pensi che $13/12 \pi$ rad e $-11/12 \pi$ rad rappresentano in effetti lo stesso angolo (pari a $195^\circ = -165^\circ$).

Casi particolari notevoli sono quelli in cui:

- lo sfasamento è pari a 0° e si dice che i segnali sono **in fase**: si noti come "creste" e "gole" delle onde siano allineate verticalmente (quindi sincrone);
- lo sfasamento è pari a $\pm 90^\circ$ e si dice che i segnali sono **in quadratura**: punti corrispondenti, ad es. le creste dei due segnali, sono spostati di un quarto di periodo;
- lo sfasamento è pari a 180° e si dice che i segnali sono **in controfase**: le creste di un segnale sono allineate verticalmente con le gole dell'altro e viceversa.

Fase nella propagazione delle onde

Infine quando si prende in esame il fenomeno della propagazione ondulatoria, indicando con z la direzione di propagazione dell'onda, l'entità y dell'oscillazione sarà data da una funzione del tipo:

$$y = f(z - vt)$$

con v che indica la cosiddetta velocità di fase dell'onda.

In particolare, considerando il caso più comune ed importante, ovvero l'onda sinusoidale, la formula precedente diventa:

$$y = A \sin(kz - \omega t - \varphi_0) \quad (2)$$

in cui il segno "-" davanti a φ_0 appare tradizionalmente per indicare per convenzione un'onda che si propaga nel verso positivo dell'asse z , k rappresenta il cosiddetto numero d'onda angolare, che dipende dalla lunghezza d'onda λ :

$$k = 2\pi / \lambda$$

ω ha il solito significato di pulsazione, dipendente dal periodo T :

$$\omega = 2\pi / T$$

la velocità di fase è espressa dalla *relazione fondamentale delle onde*:

$$v = \lambda / T = \omega / k$$

e le altre grandezze A e φ_0 hanno analogo significato a quello che avevano nella trattazione del moto armonico esposta all'inizio.

Perciò φ_0 si dice in questo caso **costante di fase dell'onda**, mentre l'argomento del seno, cioè $kz - \omega t - \varphi_0$ si chiama **fase dell'onda**.

Si noti però che nel caso delle onde, oltre al tempo t , anche z è variabile; e quindi la propagazione dell'onda sinusoidale può essere pensata come formata da una doppia oscillazione: una sinusoidale nello spazio (a tempo fissato, cioè una sorta di foto istantanea dell'onda lungo la direzione di propagazione - o se preferite una sorta di "sinusoide congelata") e una armonica nel tempo (a posizione z fissata, cioè prendendo in esame le oscillazioni indotte dall'onda in un unico punto oscillante, disposto lungo la direzione di propagazione).

Cioè, durante la propagazione di un'onda sinusoidale ogni punto del mezzo oscillante, esegue nel tempo un moto armonico, progressivamente **sfasato** rispetto agli altri punti, a seconda della loro coordinata z .

Ad esempio, nel caso illustrato dall'animazione, la lunghezza d'onda è pari a 4 metri e dato che i tre punti evidenziati hanno ascissa rispettivamente 1, 2.5 e 3.5 metri lungo la direzione di propagazione z , gli **sfasamenti** del punto rosso e del punto verde rispetto a quello giallo saranno pari rispettivamente a:

$$\Delta\phi_1 = 360^\circ \cdot (2.5 - 1) / \lambda = 135^\circ$$

$$\Delta\phi_2 = 360^\circ \cdot (3.5 - 1) / \lambda = 225^\circ$$

da cui fra l'altro si può notare che il punto rosso e quello verde risultano **in quadratura** fra loro (quando uno dei due si trova in un estremo dell'onda, l'altro si trova in un suo nodo e viceversa).

Del fatto che il moto dei punti oscillanti sia veramente armonico, ci si può convincere scegliendo un valore costante per la coordinata z , ad esempio $z = \pi / k = \lambda / 2$, e sostituendolo nell'equazione dell'onda (2). Con i seguenti passaggi matematici si deduce che l'oscillazione in funzione del solo tempo è data da:

$$y = A \sin(k\pi / k - \omega t - \varphi_0) = A \sin[\pi - (\omega t + \varphi_0)] = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

ossia un'equazione del moto armonico, analoga alla formula (1) data all'inizio.

Risonanza - [http://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_\(fisica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_(fisica))

La **risonanza** è una condizione fisica che si verifica quando un [sistema oscillante forzato](#) viene sottoposto a sollecitazione periodica di [frequenza](#) pari all'[oscillazione propria](#) del sistema stesso.

Definizione

Nel 1665 il fisico e matematico olandese [Christian Huygens](#), tra i primi a postulare la [teoria ondulatoria](#) della luce, osservo' che, disponendo a fianco e sulla stessa parete due pendoli, questi tendevano a sintonizzare il proprio movimento oscillatorio, quasi che "volessero assumere lo stesso ritmo". Dai suoi studi deriva quel fenomeno che oggi chiamiamo 'risonanza'. Nel caso dei due pendoli, si dice che uno fa risuonare l'altro alla propria frequenza. Allo stesso modo e per lo stesso principio, se si percuote un [diapason](#), che produce onde alla frequenza fissa di 440 Hz, e lo si pone vicino a un secondo diapason 'silenzioso', dopo un breve intervallo quest'ultimo comincia anch'esso a vibrare.

Un fenomeno di risonanza provoca in genere un aumento significativo dell'ampiezza delle oscillazioni, che corrisponde ad un notevole accumulo di energia all'interno del sistema sollecitato.

La risonanza meccanica porta alla distruzione del [Ponte di Tacoma](#)

In un fenomeno di risonanza, un sistema interagisce con una forza periodica esterna, che corrisponde a una certa quantità di energia trasmessa e ad un corpo che si muove con moto armonico. Un esempio è quello del ragazzo seduto nell'altalena, dove abbiamo: l'eccitatore (ragazzo che spinge) e il sistema altalena+ragazzo (risonatore). Se la spinta è di una certa entità, nel punto in cui si inverte la direzione del moto dell'altalena, questa raggiungerà un'altezza maggiore ad ogni spinta. Il valore che deve avere la spinta dipende dalle proprietà del risonatore. L'eccitatore e il risonatore si dicono in sincronismo. La risonanza può arrivare a distruggere il sistema per l'eccessivo accumulo energetico.

Nei sistemi smorzati da [attrito viscoso](#) (quindi in genere tutti gli oscillatori reali) la massima ampiezza delle oscillazioni indotte al sistema si ha quando la frequenza di sollecitazione è leggermente minore della frequenza propria. Tuttavia tale differenza diminuisce col diminuire del coefficiente di smorzamento. Infatti la [pulsazione](#) che genera un'ampiezza massima è:

$$\omega_M = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2}} < \omega_0$$

, dove ω_0 è la pulsazione propria del sistema, e γ è il [coefficiente di](#)

[smorzamento](#). Questo avviene solo nel caso che sussista la disuguaglianza $\omega_0 > \frac{\gamma}{2}$ (smorzamenti deboli). Diversamente la condizione di risonanza non genera alcun massimo di ampiezza al variare della sollecitazione esterna.

Spesso per *condizione di risonanza* si intende proprio quando la frequenza di sollecitazione è quella che genera la massima ampiezza di oscillazione del sistema.

Un corpo capace di vibrare con una determinata frequenza, se viene investito da un'onda della stessa frequenza inizia a vibrare, ma tutti gli altri no.

La frequenza di risonanza dell'acqua è intorno ai 2.4 Gigahertz.