

# *Dal Quark al Quasar*

*Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo*

## **Generare la luce**

Domenica 19 marzo 2006

Caro Amico,

abbiamo a lungo discusso delle proprietà della luce e delle onde elettromagnetiche in generale, sempre partendo dal presupposto che in qualche maniera avessimo a disposizione un'adeguata onda elettromagnetica o un adeguato fascio di fotoni con cui condurre i nostri esperimenti, reali o concettuali che fosse. È giunto il tempo, prima di iniziare ad occuparci d'altro la prossima volta, di fare una breve rassegna dei modi con cui possiamo generare onde elettromagnetiche. È sorprendente la varietà di tecniche disponibili, apparentemente riconducibili a principi fisici diversi, per cui è bene soffermarsi un po' su di esse.

Come avremo modo di discutere meglio quando parleremo delle equazioni di Maxwell, un ottimo modo per generare luce è quello di accelerare delle cariche elettriche, ad esempio elettroni. Per quanto possa sembrare un metodo complicato, in realtà è una cosa estremamente semplice: un generatore di tensione alternata, una resistenza elettrica che faccia da carico in modo da ottenere una corrente, e un filo elettrico che faccia da antenna. È questo il metodo usato, naturalmente lo stiamo schematizzando un po', per generare le onde elettromagnetiche di radio e televisione e per le telecomunicazioni in generale. La presenza di un generatore di tensione (o di corrente) alternata assicura che gli elettroni di conduzione che si trovano nel filo (e che sono i portatori della corrente elettrica) vengano accelerati ora da una parte, ora dall'altra, con una frequenza che è quella del generatore. Il filo elettrico, che dovrà avere una lunghezza opportuna (dipendente dalla frequenza della corrente che lo percorre) per ragioni di efficienza, farà da antenna emittitrice per onde elettromagnetiche aventi la stessa frequenza del generatore. La tecnologia, ancora per ragioni di efficienza o di direzionalità, ci mette a disposizione antenne più sofisticate rispetto ad un semplice filo elettrico teso tra due supporti, ma il principio fisico è sempre lo stesso; ed è quello col quale Hertz prima e Marconi poi hanno realizzato le prime trasmissioni di segnali trasportati da un'onda elettromagnetica.

Questo modo di produrre onde elettromagnetiche è usato evidentemente per le onde radio, ma raramente per produrre luce visibile, che copre un intervallo di frequenze ben superiori; tuttavia è molto impiegato per frequenze ancora più grandi, anche se il modo di accelerare le cariche elettriche cambia radicalmente. I raggi X, di frequenza ben superiore alla luce visibile, che sono usati in diagnostica medica e non solo sono infatti spesso generati accelerando con un cannone elettronico un fascio di elettroni; questi vengono quindi sparati a grande velocità contro una superficie metallica; raggiungendola, ed essendo essa opaca al passaggio degli elettroni, essi sono sottoposti ad una violenta decelerazione, che li "ferma" (come ben sai, non è vero che essi vengono fermati, se no la loro posizione sarebbe completamente indeterminata, per via del principio di Heisenberg; comunque possiamo dire che questi elettroni vengono "catturati" dal metallo ed entrano a farne parte). L'entità della decelerazione è tale che questi elettroni emettono onde elettromagnetiche a frequenze elevatissime, quelle dei raggi X per l'appunto. In condizioni opportune, è possibile fare in modo che questa radiazione (detta "di frenamento" per il modo con cui è prodotta) sia focalizzata in una ben precisa direzione, ed impiegata per gli scopi più opportuni (ad esempio fare radiografie).

Se per decelerare una carica elettrica è sufficiente che questa perda la sua energia cinetica trasformandola ad esempio in calore grazie a qualche meccanismo dissipativo (come gli elettroni che, frenati dalla lastra metallica, producono raggi X), per accelerarla dobbiamo trovare un meccanismo per trasferirle energia cinetica. È quello che facciamo quando, col generatore di tensione alternata, facciamo passare una corrente alternata nel filo elettrico, ed è quello che possiamo fare in generale applicando un campo elettrico ed immergendovi le cariche che vogliamo accelerare: queste, come noto, saranno accelerate verso il polo di segno opposto. È il principio di funzionamento di un cannone elettronico: una sorgente di elettroni (posta in alto vuoto), e un anodo posto ad una certa distanza; l'anodo ha un potenziale positivo, e gli elettroni sono accelerati verso di esso (per inciso, così sono fatti il tubo catodico di un televisore o le vecchie valvole termoioniche usate in elettronica analogica). La velocità con cui lo raggiungono sarà tanto più grande quanto maggiore è la differenza di potenziale tra il catodo che emette gli elettroni e l'anodo che li attira. Un forellino posto sull'anodo permette ad alcuni elettroni di sfuggire alla camera di accelera-

zione e di essere sparati verso un bersaglio. Anche durante l'accelerazione nel cannone, quindi, gli elettroni emettono energia sotto forma di onde elettromagnetiche; ma mentre la decelerazione sulla lastra metallica per la produzione di raggi X avviene in un tempo brevissimo, l'accelerazione, a parità di variazione di velocità, avviene su tempi molto più lunghi, e l'emissione di onde elettromagnetiche copre quindi frequenze estremamente più basse. Come si fa per far accelerare più velocemente gli elettroni? Bisogna aumentare la differenza di potenziale tra il catodo e l'anodo, ma ci sono dei limiti; il primo è dato dalla *rigidità del dielettrico*, ovvero dalla differenza di potenziale massima che si può applicare tra i due elettrodi prima che si inneschi tra di essi una scarica; il secondo è un limite *relativistico*, del quale discuteremo più avanti quando ci occuperemo di teoria speciale e generale della Relatività. Il risultato è che produrre onde elettromagnetiche (ad esempio nella banda dei raggi X) accelerandoli linearmente con un cannone elettronico non è un modo né molto efficiente, né molto pratico. Molto meglio accelerarli in altro modo, non già con un campo elettrico, ma con un campo magnetico. Le particelle elettricamente cariche, infatti, hanno la proprietà che se si muovono all'interno di un campo magnetico la loro traiettoria viene da esso deflessa, per cui, anziché muoversi in linea retta, inizieranno a percorrere una traiettoria curva. Ma anche il moto lungo una traiettoria curva è un moto accelerato, quindi la particella, incurvando la sua traiettoria, emetterà un'onda elettromagnetica (e perderà energia cinetica, per cui sarà necessario fargliela recuperare accelerandola con un campo elettrico). È il principio di funzionamento di molti *acceleratori di particelle*, in particolare di quello noto come *sincrotrone*; non stiamo qui a spiegare il dettaglio del suo funzionamento, basti dire che un fascio di particelle cariche viene mantenuto su una traiettoria chiusa (ad esempio circolare) mediante l'applicazione di potenti campi magnetici, e l'energia cinetica persa da queste particelle sotto forma di onde elettromagnetiche per via dell'accelerazione centripeta a cui sono sottoposte viene reintegrata tramite opportuni campi elettrici. La "luce" emessa prende il nome di *luce di sincrotrone*, ed è un'onda elettromagnetica alle frequenze dei raggi X con particolari proprietà di collimazione e coerenza (parleremo tra un po' di *coerenza*, quando affronteremo l'argomento dei *laser*).

Un altro modo per produrre luce (tipicamente proprio luce visibile) l'abbiamo già accennato parlando di atomi. Quando un elettrone di un atomo (ma anche di una molecola) si *diseccita* da un livello energetico più alto ad uno più basso, emette un fotone. Un solo fotone. Per produrre un'onda elettromagnetica, ovvero una gran quantità di fotoni, occorre avere un gran numero di atomi che, continuamente, vengono "caricati" portando un loro elettrone in uno stato eccitato, e *spontaneamente* si "scaricano" riportando l'elettrone ad un livello energetico più basso ed emettendo un fotone. Avere a disposizione un gran numero di atomi non è un problema, ma come si fa ad eccitarli? In qualche modo bisogna trasferire loro dell'energia, ed un buon modo per farlo è usare il calore (che poi è energia termica). Scaldando l'insieme di atomi, questi tenderanno a collidere l'uno con l'altro, sia che facciano parte di una molecola o di un solido, sia che facciano parte di un gas; l'energia che si trasferiscono l'un l'altro collidendo può essere immagazzinata da un elettrone che si eccita ad un livello energetico superiore. È quanto succede ad esempio ad un metallo quando viene scaldato fino a diventare rosso o bianco in un forno per metallurgia, ma anche quanto succede al filamento di una lampadina ad incandescenza, che si surriscalda per effetto del passaggio della corrente elettrica fino ad una temperatura tale da emettere un'intensa luce. Ed è pure quanto avviene nei processi di combustione: reazioni chimiche a catena generano una gran quantità di calore, che riscalda l'aria circostante; le molecole diventano così calde (e quindi veloci) che avviene un continuo processo di eccitazione dei loro elettroni; la diseccitazione allo stato fondamentale causa l'emissione di un fotone.

Fornire energia termica agli atomi non è l'unico modo per eccitare i loro elettroni. Un altro buon modo è investirli con un'altra onda elettromagnetica. Può sembrare un'assurdità: mi serve un'onda elettromagnetica che, assorbita dagli atomi, li eccita in modo tale che essi, diseccitandosi, emettano quei fotoni che costituiranno un'altra onda elettromagnetica. In realtà il processo è meno assurdo di quanto possa sembrare. Un primo esempio sta nei fenomeni di *fosforescenza* (che andrebbero distinti in *fluorescenza* e *fosforescenza*, ma per ora non preoccupiamoci della sottile differenza). Un'onda elettromagnetica investe un materiale particolare, eccitandone gli atomi; questi, per ragioni che non stiamo qui ad elencare, si diseccitano emettendo un fotone solo molto tempo dopo (da alcuni secondi anche ad alcune ore); la rimissione della luce (tipicamente ad una frequenza minore di quella usata per eccitare gli atomi) avviene quindi a distanza di tempo, rendendo possibile quello spettacolare fenomeno per cui le lancette di alcuni orologi si vedono anche al buio, per fare un esempio, purché siano state esposte alla luce non più di un certo numero di ore prima.

Se è possibile investire un atomo con un'onda elettromagnetica per eccitarlo, è possibile anche investirlo per *diseccitarlo*. A prima vista anche questo fenomeno può sembrare strano o poco utile, ma così non è: immaginiamo di disporre di un meccanismo tale per cui siamo in grado di portare un atomo ad uno stato eccitato, ed immaginiamo che la *vita media* di questo stato eccitato sia sufficientemente lunga; allora, prima che l'atomo si disecciti *spontaneamente* emettendo un fotone, noi lo investiamo con un'onda elet-

tromagnetica (sarebbe sufficiente anche un solo fotone) avente *la stessa frequenza* del fotone che sarà emesso; l'interazione dell'onda con l'atomo eccitato provocherà la diseccitazione dello stesso verso il suo stato fondamentale; tale processo è anche detto *emissione stimolata*, ed è alla base del principio di funzionamento dei *laser*. Non parleremo qui dei dettagli di questi formidabili ritrovati della tecnologia, ci basti dire che essi sono costituiti da una cavità dalle pareti riflettenti (immagina una scatola da scarpe con specchi alle pareti), e dalle dimensioni opportune, realizzata con opportuni materiali semiconduttori (ad esempio); i suoi atomi, per mezzo di un certo meccanismo e fornendo loro energia tramite una tensione elettrica, si portano ad uno stato eccitato con vita media piuttosto lunga; ad un certo punto *un atomo* si diseccita *spontaneamente*. Il fotone da lui generato inizia a viaggiare avanti e indietro per la cavità (per via delle pareti riflettenti), fino a che non interagisce con un *altro* atomo, pure lui nello stato eccitato; esso subirà quindi un'*emissione stimolata*, che porterà ad avere *due* fotoni nella cavità: quello originario, e quello emesso dal secondo atomo. Ognuno dei due fotoni proseguirà ad andare avanti e indietro nella cavità, inducendo, prima o poi, altre emissioni stimolate, e così via. Affinché il processo non si arresti, è necessario che una fonte di energia esterna provveda a riportare in qualche modo allo stato eccitato gli atomi che sono ritornati allo stato fondamentale. Un opportuno gioco sui livelli energetici di questi atomi fa anche sì che i fotoni che sono racchiusi nella cavità riescano ad indurre emissioni spontanee e non vengano invece assorbiti dagli atomi nello stato fondamentale per portarli allo stato eccitato. Le dimensioni della cavità sono definite sulla base della lunghezza d'onda associata ai fotoni così da creare, per interferenza, un meccanismo di onda stazionaria all'interno della cavità stessa. Un "forellino" praticato su una parete della cavità permette ad una piccola quantità di fotoni di sfuggire dalla stessa, creando un fascio *laser*. Il particolare modo usato per produrre questa luce le conferisce una caratteristica particolare, detta *coerenza*. Quando una lampadina, una fiamma, o un corpo incandescente emettono luce, lo fanno in maniera *incoerente*: ovvero, sono costituiti da atomi che, ognuno indipendentemente da tutti gli altri, emettono fotoni in direzioni casuali ad istanti di tempo casuali. In un *laser*, invece, l'emissione stimolata assicura che il fotone emesso da un atomo abbia *la stessa frequenza e la stessa fase* del fotone usato per diseccitarlo. Il risultato finale è che il fascio di luce che emerge dalla cavità è costituito da un'onda elettromagnetica non solo monocromatica, non solo molto collimata, ma *coerente*, in quanto tutti gli atomi che l'hanno prodotta hanno emesso i loro fotoni *in fase*. Se i nostri occhi non sono in grado di percepire la fase di un'onda elettromagnetica, e quindi non distinguono tra un'onda coerente ed una incoerente, gli esperimenti di interferenza e diffrazione che abbiamo descritto in passato hanno invece, come requisito fondamentale, quello che l'onda elettromagnetica usata sia stata prodotta da una sorgente coerente (come un *laser*). Se così non è, i fenomeni di interferenza e diffrazione avvengono comunque, ma siccome le onde raggiungono le fenditure o le lastre fotografiche dei nostri esperimenti con fasi del tutto casuali, anche le figure di interferenza non si sovrapporranno mai esattamente così come abbiamo sempre immaginato, e l'effetto sarà quello di osservare un'illuminazione *media* e uniforme frutto della sovrapposizione delle numerosissime figure di interferenza generate, disordinatamente, dalle altrettanto numerose onde elettromagnetiche incoerenti che costituivano il fascio luminoso.

Un altro bel modo per produrre luce è quello di sfruttare una scarica in un gas. È quanto avviene nei tubi al neon (in maniera controllata), ma anche nell'atmosfera (in maniera incontrollata) al passaggio di un fulmine. Una scarica elettrica *perfora* il gas tra un anodo e un catodo posti ad una differenza di potenziale così alta da ionizzare il gas (estrarre elettroni dalle sue molecole) ed indurre pertanto una corrente nello stesso; tale corrente (ionica ed elettronica) può avere un doppio effetto: se controllata (come nei tubi al neon), trasferisce energia (per collisione) agli atomi non ionizzati, eccitandoli, così che essi, diseccitandosi, emettano luce; se incontrollata (come in un fulmine), oltre al meccanismo descritto si aggiunge un repentino surriscaldamento del gas, con conseguente espansione improvvisa dello stesso, che dà luogo al tuono.

Concludiamo questa rassegna sui modi per generare luce (o onde elettromagnetiche in generale), consapevoli di non averli certo esauriti ma di aver comunque dato una panoramica, con un fenomeno molto particolare, che in qualche modo ci collegherà ad argomenti che toccheremo sia parlando delle equazioni di Maxwell, sia di teoria generale della Relatività: stiamo parlando della *luce Cherenkov*. Questa luce molto particolare, di colore blu o azzurrino, e che prende il nome dal fisico che ha descritto teoricamente il fenomeno, è una luce diffusa, di cui non si riesce a percepire dove sia la sorgente, che si vede in vasche d'acqua attraversate da particelle (tipicamente raggi alfa o beta, di cui parleremo in futuro discutendo di radioattività) che si muovono ad una velocità *superiore* a quella della luce *in quel mezzo*. Attenzione: come già sai, la velocità della luce *nel vuoto* è un limite superiore che non può essere oltrepassato da nulla; ma in un mezzo trasparente, in cui (come vedremo meglio parlando di equazioni di Maxwell) la luce viaggia ad una velocità *inferiore* a quella nel vuoto, una particella *deve* muoversi ad una velocità inferiore a quella della luce nel vuoto, ma *può* muoversi ad una velocità superiore a quella della luce in quel mezzo. Quando questo accade, si verifica un fenomeno simile al *bang* acustico prodotto dagli aerei supersonici. Il suo equivalente elettromagnetico è l'emissione diffusa (diffusa perché ci sono molte parti-

celle che attraversano il mezzo trasparente) di questa luce azzurrina, spettacolare, apparentemente priva di una sorgente ben definita, degna dei migliori effetti speciali dei film di fantascienza.

In questa breve rassegna sui modi per produrre luce ed onde elettromagnetiche abbiamo volutamente trascurato tutti i fenomeni celesti: luce visibile prodotta dalle stelle, emissioni radio e X e  $\gamma$  prodotte da stelle, galassie e quasar, e così via. Ci torneremo, ma l'Astrofisica è un capitolo così vasto e così affascinante da meritare una trattazione tutta per sé.

Abbiamo solo dato un cenno ai fenomeni elettromagnetici, ma l'abbiamo fatto per vari scopi: siamo tornati sui fenomeni di interferenza e diffrazione, a cui avevamo accennato in un contesto molto diverso, quello dell'esperimento di Davisson e Germer; abbiamo individuato la necessità di invocare, in certe circostanze, una teoria corpuscolare della luce, che ci riconurrà, a tempo debito, a riparlare, in forma nuova e stupefacente, di Meccanica Quantistica; ci siamo resi conto che una teoria ondulatoria della luce si fonda sulle equazioni di Maxwell, di cui dovremo necessariamente parlare non solo per fondare l'elettromagnetismo su basi solide, ma anche per ritornare sulle proprietà della materia (per ora ci siamo fermati allo studio di soli atomi isolati), e per poter comunque costruire la teoria particellare della luce, a cui ci ricongiungeremo anche per questa via.

Ma stiamo correndo troppo: prima dobbiamo cambiare completamente punto di vista, con un tema completamente nuovo, che, manco a dirlo, ci farà tornare su concetti che fino ad ora abbiamo solo accennato, ma nulla di più. Ma di questo ce ne occuperemo la prossima volta.

A presto,

Marco