6

La struttura del CD

Il **CD** è ormai da tempo lo strumento fondamentale per la memorizzazione dell'audio digitale sia nella forma canonica, il **CD** originale che si compra nei negozi, che nelle altre varianti masterizzate (**CD-R Audio, CD-R con file WAV, CD-R con file MP3**, ecc.). Non è possibile comprendere i problemi che sorgono quando si vuole operare su questi formati senza dare almeno un'occhiata alla struttura interna del supporto **CD**.

Bisogna tenere presente che il progetto del **CD audio** fu sviluppato nel anni '70, quando ancora i microcomputer non erano universalmente diffusi come adesso e le possibilità dell'elettronica consumer erano molto diverse da quelle attuali. Molte scelte furono pesantemente condizionate dalla tecnologia di allora e questo fatto può spiegare molte apparenti stranezze o incompletezze dello standard, che hanno richiesto ai tecnici delle generazioni successive molto lavoro per essere risolte o aggirate.

I libri colorati

Lo standard del a (**IEC 908**) è contenuto nel **Red-Book** (più volte aggiornato) e descrive sia il formato fisico che quello logico. Un **CD audio** può portare il marchio "**Compact Disc Digital Audio**" solo se rispetta integralmente questo standard; per esempio i **CD** che usano come protezione anti-copia la violazione di alcune norme del **Red-Book** non possono essere venduti legalmente sotto il nome di "**Compact Disc**". Un'altra connotazione, questa volta linguistica, è che si dice "**Compact Disc**" per il **CD** e "**Hard-Disk**" per il disco rigido: non bisogna confondere il "**disc**" con il "**disk**".

Qualche anno dopo l'avvento del **CD** audio sorse il problema di definire un supporto pratico ed economico per la memorizzazione di dati in forma digitale e fu definita un'estensione del **Red-Book** che permetteva di usare le stesse apparecchiature industriali per stampare **CD audio** e **CD** dati. Il cosiddetto **Yellow-Book** descrive il formato **CD-ROM** ed anch'esso è stato più volte modificato (per esempio per comprendere il formato **CD ROM XA**). Dal punto di vista fisico un **CD-ROM** è un **CD** che segue lo standard **Red-Book** in cui però i dati non hanno una interpretazione audio.

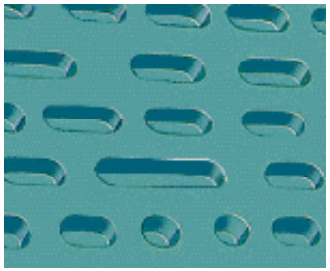
L'**Orange-Book** (red + yellow = orange!) definisce invece lo standard del **CD** scrivibile **CD-R**; la cosa interessante (ed economicamente catastrofica per i produttori di software originale) è che un **CD-R** è suonabile e leggibile sugli stessi lettori che accettano i normali **CD**, purché abbastanza moderni.

Esistono molte altre variazioni tutte basate sullo stesso standard fisico (**Video CD**, **CD-I**, **Photo CD**) definite da altri libri colorati (**Green-Book**, **White-Book**, **Blue-Book**) che però non ci interessano in questo contesto.

Il CD audio

Il livello fisico

Il livello fisico stabilisce le dimensioni fisiche di un **CD**, il tipo dei materiali e il modo in cui l'informazione è memorizzata: i bit sono impressi sotto forma di *pit* e *land* . I *pit* sono le zone stampate nel substrato di plastica del disco (larghi circa **0.6 micron**) mentre i *land* sono le zone non stampate. Il substrato è posto vicino alla superficie superiore del disco ed è metallizzato al fine di riflettere il raggio laser. Durante la lettura ogni transizione *pit-land* e *land-pit* viene interpretata come un bit **1**, mentre le aree piane, che si trovano prima e dopo ogni transizione, sono qualificate come uno o più bit **0** consecutivi. I *pit* ed i *land* sono allineati in una traccia a spirale, che inizia vicino al diametro interno del disco e termina in prossimità del diametro esterno. I **CD** audio la cui durata è inferiore a quella massima, hanno un'area non utilizzata nella zona esterna del disco.

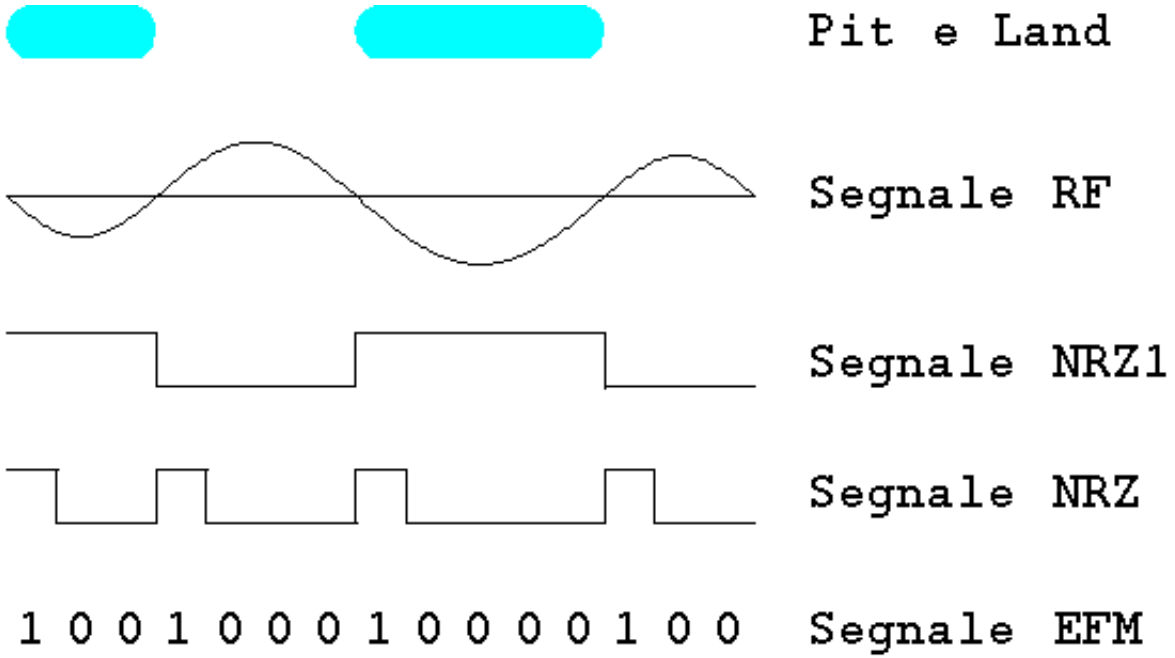


Pit e land

La lettura è di tipo CLV (Constant Linear Velocity) e permette di avere un flusso dei dati "grezzo" di **4321800 bit/sec**. La velocità è regolata dai servomeccanismi ed è controllata da pattern di sincronizzazione scritti sul disco stesso. Questa è una profonda differenza logica rispetto alla lettura di un disco in vinile dove la velocità (angolare) deve essere tenuta costante dal giradischi stesso senza poter utilizzare, per regolarla, il contenuto del disco che sta suonando.

La traccia a spirale viene seguita grazie ad altri servomeccanismi di controllo e il segnale **RF** (**RF** vuole dire radiofrequenza e **4Mhz** sono ben dentro la banda delle onde corte), che esce dalla testina laser di lettura, ha oscillazioni più o meno sinusoidali. Una importante convenzione che semplifica la lettura è che la lunghezza dei pit non può essere inferiore a 3 unità o superiore ad **11** unità (ovvero nel segnale digitale che viene scritto non vi possono essere due uni consecutivi e il numero di zeri consecutivi è compreso tra **2** e **10**). Questo fatto garantisce alcune caratteristiche del segnale **RF** che permettono la lettura in presenza di danni alla superficie del disco.

Infatti, una volta letto, il segnale **RF** viene filtrato dai circuiti elettronici, eliminando le frequenze che non possono essere state scritte sul disco (e che possono avere origine da impronte digitali, granelli di polvere graffi ecc.) e trasformato in un'onda quadra in cui i fronti di salita e discesa rappresentano i bit a **1** (il segnale **NRZI**). Da qui si passa al segnale (**NRZ**) che è una vera onda quadra con i valori **0** e **1** e da questo segnale vengono poi prelevati i sincronismi che controllano la velocità e i bit buoni che vengono fatti proseguire.



Dalle incisioni sul disco al segnale **EFM**.

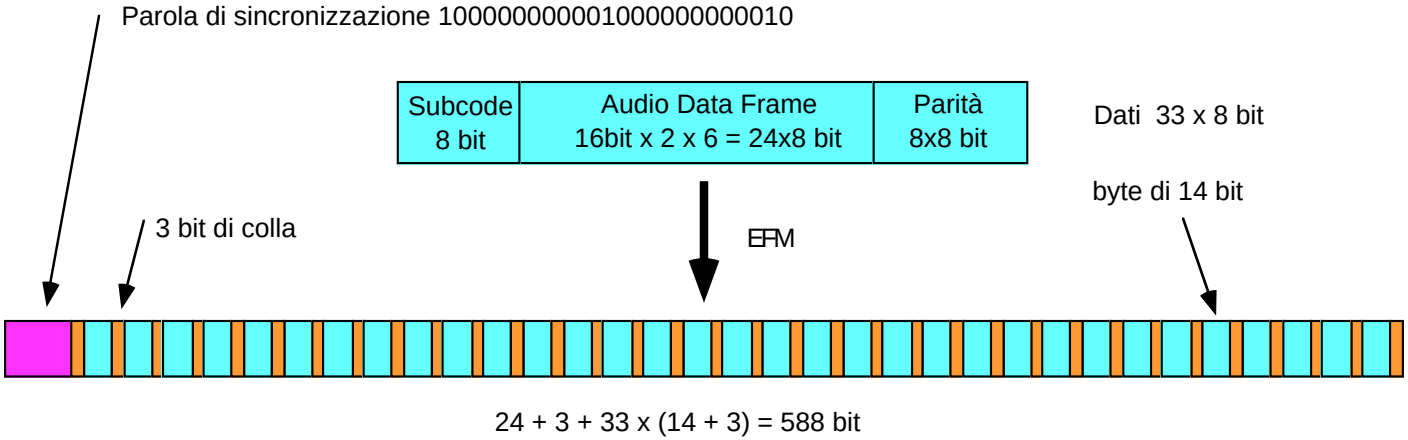
La struttura del frame (dai dati audio ai pit e land)

L'informazione sul **CD** è divisa in blocchi elementari di **588** bit detti **frame**. Per capire il significato di questi **588** bit conviene seguire la strada inversa al processo di lettura e partire dai dati "buoni".

Ad ogni gruppo di **24** byte (che rappresentano **6** campioni audio stereo a **16** bit) si aggiungono **8 byte** di parità che serviranno alla correzione degli errori in lettura e **un byte** di subcodici che avranno un'importanza notevole ai livelli logici superiori ottenendo **33** byte da **8 bit**.

Ogni byte di **8** bit viene trasformato in un byte da **14** bit (sic!) attraverso un processo detto **EFM** (Eight to Fourteen Modulation) che serve ad avere **SEMPRE** un numero di zeri consecutivi non inferiore a **2** e non superiore ad **10**. Questi byte da **14** bit vengono incollati tra loro con un "adesivo" formato da **3** bit che serve a mantenere la proprietà del giusto numero di zeri consecutivi e a tenere basso il valore medio del segnale (la componente continua del segnale **RF**); ogni byte viene così ad occupare **17 bit**. Davanti al tutto si inserisce il pattern di sincronizzazione di **24 bit** ("**100000000001000000000010**", che è univocamente individuabile dai servomeccanismi) e altri **3 bit** di colla.

Ora **33*17 + 24 + 3 = 588** e questo spiega come il bit rate audio di **16*2*44.100 = 1.411.200** bit/sec diventi un bit rate grezzo di **4.321.800** bit/sec.



Struttura del frame

Il settore e i subcodici

Per costruire qualcosa di significativo, **98** frame vengono logicamente impaccati in un settore. Un settore contiene quindi **98*24 = 2352** byte di dati audio, **98*8 = 784** byte di codice di controllo (per la correzione degli errori) e **98** byte di subcodici. Questi subcodici sono organizzati in otto gruppi detti sottocanali e denominati con lettere **P, Q, R, S, T, U, V, W**. I sottocanali **P** e **Q** contengono informazioni sul numero di tracce del disco, indici di inizio e fine traccia e altre informazioni aggiuntive. Gli altri sei sottocanali sono disponibili per altri tipi di applicazioni e sono per esempio utilizzabili per la codifica del testo o della grafica. Poiché le informazioni di indirizzamento sono spalmate sui **98** frame che costituiscono un settore allora il settore è l'unità minima indirizzabile.

È importante ricordare ancora che il **CD** audio non fu progettato per garantire accessi di tipo casuale con la precisione tipica di un hard-disk. Chi ha fatto esperimenti di "navigazione" su un **CD** player avrà notato che ci può posizionare all'interno di una traccia con una certa

approssimazione (per un indirizzamento più fine sono stati introdotti gli indici che però solo pochi **CD** hanno codificati).

Indirizzamento e tracce

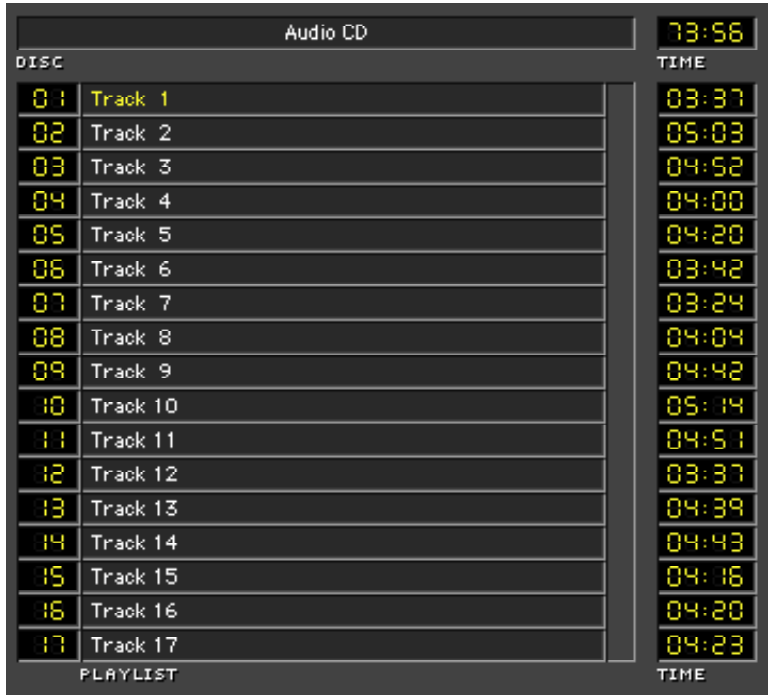
Facciamo ora un po' di conti: alla frequenza di campionamento di **44100Hz** (usata da TUTTI i **CD** Red-Book) vi sono **44100 * 4** byte/sec di informazione buona. Dato che ogni frame contiene **24** byte la durata temporale di un frame è **1/7350** di secondo. Inoltre per completare un settore servono **98** frame e quindi un settore ha la durata di **1/75** di secondo, è questa l'unità temporale minima indirizzabile.

Più settori consecutivi formano una traccia. Per distinguere l'inizio e la fine delle tracce si usano i subcodici del canale P (i primi bit dei 98 byte di subcodici). Una traccia audio è caratterizzata dal canale P tutto fatto di zeri; la pausa prima della traccia è composta da un paio di secondi di silenzio con il canale P che vale tutti 1.

Le tracce audio sono incise consecutivamente nella parte centrale del **CD** detta **Program area**. Per gestire in maniera corretta il contenuto, alla Program Area è anteposta un'area di **Lead-in** e giustapposta un'area di **Lead-out** (che come la coda del gatto serve a far capire che si è finito e si può tornare indietro). N.B. visto che l'area Lead-in dice quante sono le tracce potrebbe sembrare inutile l'area di Lead-Out, probabilmente questa è dovita al fatto che negli anni Ottanta la sua presenza poteva permettere, nei lettori senza controllo a micropriocessore, di risparmiare la circuteria necessaria a ricordarsi il numero delle tracce.

L'area di Lead-in è la più interna e contiene le prime informazioni che il lettore acquisisce; essa è caratterizzata da un canale P che contiene zeri e uni alternati per formare un segnale **RF** di **2Hz**. I dati audio hanno tutti il valore zero e il canale Q contiene le informazioni relative al numero delle tracce e alla loro posizione. È leggendo questa area che il player o il computer riesce a mostrare il contenuto del **CD** audio. Altre informazioni che sono contenute nel canale **Q** sono i flag di protezione (che *molto* in teoria dovrebbero inibire la copia), i codici **ISRC** che identificano univocamente il disco e talvolta anche le singole

tracce (come il codice ISBN identifica i libri e il codice ISSN le riviste). La lunghezza dell'area di Lead-in deve essere sufficiente a contenente il catalogo per un massimo di 99 tracce. All'interno del catalogo le tracce sono identificate col solo numero d'ordine. Se si vuole dare un nome al disco e alle tracce è necessario collegarsi ad un data-base mondiale dei **CD** audio (www.gracenote.com, www.freedb.org, www.freedb.org), e sperare che quel disco sia conosciuto.



Il catalogo di un **CD** audio visualizzato al computer, si nota che le tracce sono identificate col solo numero d'ordine.

Capacità di correzione di errori

Abbiamo già detto che ad ogni **24** bit di dati audio vengono aggiunti **8** bit di parità. Un altro trucco usato è quello di mischiare i dati all'interno del frame (interleaving) in modo che raffiche di errori (per esempio una macchia di marmellata alla ciliegia) possano venire

comunque corrette. Eventuali errori non correggibili vengono trattati interpolando i valori buoni oppure, al limite, mettendo i player in mute.

Il ripping

Da tutto quello che abbiamo visto è evidente che il **CD** audio è stato pensato per essere SUONATO non per contenere in modo affidabile dati digitali. Anche se è possibile estrarre i dati audio con un computer questa operazione (detta **ripping**) avviene usando il **CD** audio in modo non conforme alle linee di progetto e presenta molti problemi.

Nel **CD** audio gli indirizzi e le informazioni musicali sono distribuite lungo un settore. Per avere un indirizzo completo sono necessari **98** frame e perciò non è possibile indirizzare con precisione ogni singolo campione. Questa imprecisione, come accennato, danneggia l'acquisizione da parte di PC. Infatti durante l'operazione di ripping (che dal punto di vista del lettore avviene in tempo reale) può accadere che la CPU non abbia sufficiente tempo per terminare correttamente quest'ultimo compito, e debba tentare di rileggere quello che gli è sfuggito con la possibilità di commettere errori. Da esperimenti fatti si è notato che le operazioni di ripping sono più affidabili se si cerca di tenere la macchina più sgombra possibile da altri compiti e si imposta una velocità di lettura bassa.

La sincronizzazione e il jitter

Quando un **CD** audio viene letto, dopo che il segnale **RF** è stato convertito nel segnale **NRZ**, è possibile estrarre un clock di riferimento (intorno ai **4.32** MHz). Questo clock può venire usato per sincronizzare il movimento del motore ed ottenere quindi un flusso audio a **44100** Hz. Se il processo si svolge in questo modo è ovvio che ogni irregolarità della lettura del disco (dovuta al supporto o al player) si riflette in una corrispondente irregolarità del clock e quindi genera jitter.

È probabilmente questa la causa del colossale equivoco che dà il nome di jitter anche ai problemi causati dai difetti del disco. In realtà ai giorni nostri anche i più economici lettori tipo walkman hanno un buffer intermedio che memorizza i bit prima della conversione DA, permettendo un buon ascolto anche durante attività “fisiche” vivaci, nonostante che a causa degli scossoni il pick-up possa disallinearsi.

In una unità moderna, dotata di un capace buffer di memoria e di opportune circuitazioni di reclocking, i difetti del disco e i problemi meccanici del player influenzano, al più, il tasso di errori in lettura e la richiesta di corrente da parte dei servocontrolli, mentre il jitter viene ad essere determinato unicamente dalla qualità dell’oscillatore quarzato, che sovrintende allo svuotamento del buffer **RAM**. Se il convertitore **D/A** è nello stesso châssis, la conservazione del clock di riferimento è assicurata e il *jitter* può essere facilmente minimizzato.

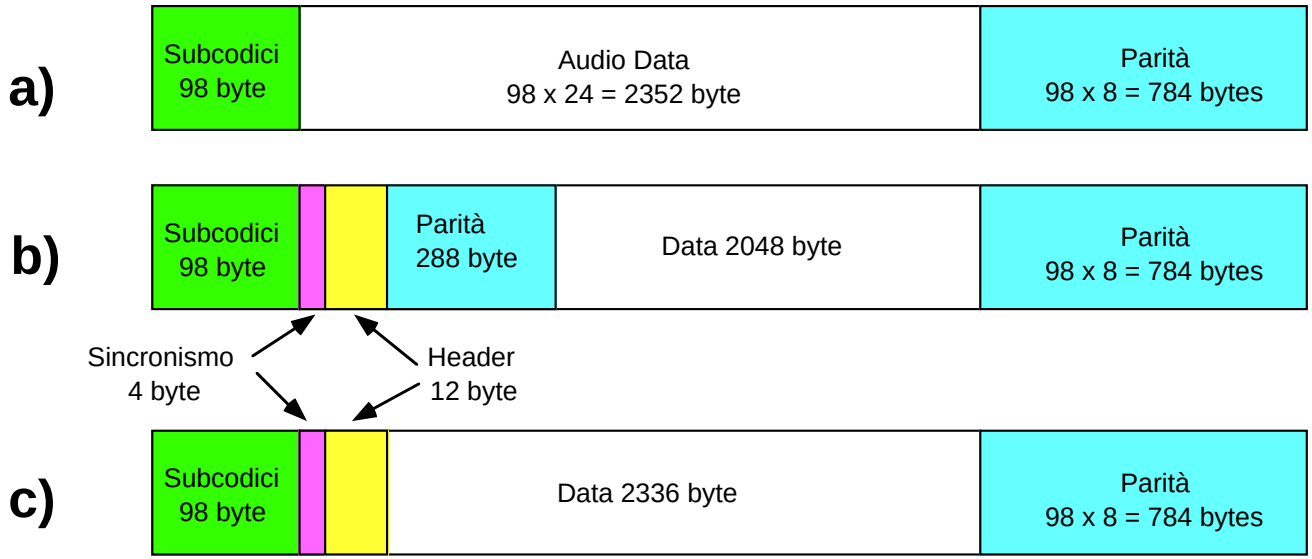
Una applicazione limite di questa filosofia è quella della Meridian che per i suoi player TOP usa “semplici” meccaniche da computer che alimentano capaci buffer di memoria, investendo la maggior parte delle risorse nella elettronica deputata al trattamento del segnale digitale e alla conversione **D/A**.

Il CD-ROM

Quando si decise di utilizzare per la memorizzazione read-only dei dati lo stesso supporto dei **CD Red-Book** si sancì il definitivo successo del formato creando un matrimonio inscindibile tra supporti audio e supporti informatici. Infatti la conformità di un **CD-ROM** alle specifiche **Red-Book** assicura che tutte le unità di lettura **CD** dei computer siano in grado di accettare i **CD audio** (salvo difetti estemporanei di una particolare unità o di un particolare **CD**).

Le specifiche dello Yellow-Book

Le specifiche dello **Yellow-Book** sono strettamente legate a quelle del **Red-Book**. Vengono conservati la dimensione di **2352** byte utili per settore, il **Lead-in**, la **Program area**, il **Lead-out** e il primo livello di correzione dell'errore . Già dal livello successivo, lo **Yellow-Book** può aggiungere un ulteriore livello per il rilevamento e la correzione degli errori. I settori **Yellow-Book** hanno **12** byte di sincronismo e **4** byte di **Header**. Per usare lo spazio rimanente, sono inoltre definiti due modi, detti **mode 1** e il **mode 2**; la scelta tra i due è codificata nel campo Header. Il **mode 1** caratterizza il **CD-ROM** con codice a correzione di errore, le informazioni aggiuntive per la correzione degli errori, **288** byte per settore, riducono la capacità per i dati utenti a **2.048** byte (che essendo potenza di due è un buon numero per gli informatici), il mode **2** contiene più dati ed è usato per le informazioni musicali e grafiche (più tolleranti agli errori.) nei **CD** multimediali. In entrambi i casi l'indirizzo di un settore è scritto nel settore stesso, questo accorgimento risolve completamente il problema di un accesso casuale ai dati in quanto, una volta letti anche in ordine sparso, questi possono essere riordinati.



Struttura del settore nel **CD** audio (a), **CD** ROM mode 1(b) e **CD** ROM mode 2 (c)

Lo **Yellow-Book** si ferma qui, lasciando agli sviluppatori la libertà di scegliere come sfruttare le strutture messe a disposizione. Ulteriori specifiche (**ISO 9660**, **High-Sierra**) determinano come i dati sono organizzati al livello superiore in base anche alla interazione con il sistema operativo. Ad esempio nel formato **ISO 9660** puro i file hanno un nome di **8** caratteri maiuscoli + un'estensione di tre caratteri (**NOMEBREV.TXT**), ottimo per lavorare sotto **DOS**, ma scomodissimo su sistemi operativi moderni.

L'estensione **Joliet** permette di trattare i nomi con cui si è abituati a lavorare oggi **`nome_parecchio_lungo.che.mi.piace.tanto.html`**.

Il CD-R

Il **Compact Disc Recordable** (**CD-R**) ha segnato una rivoluzione nel costume informatico degli ultimi anni. Uno dei pregi decantati del **CD audio** era il fatto che fosse “praticamente impossibile copiarli”, infatti:

- le copie analogiche erano ovviamente scadenti,
- gli hard disk dell’epoca erano troppo piccoli,
- la compressione non era ancora stata applicata all’audio (almeno a livello consumer),
- le copie su **DAT** erano inibite (a meno di usare apparecchi professionali)
- il processo di stampa costava milioni.

Quando fu introdotta la possibilità di scrivere **CD** compatibili **Red-Book** senza passare dal processo di stampa era ancora difficile fare copie in quanto le unità di scrittura costavano decine di milioni di allora e i supporti molto più dei **CD** originali. L'unico uso conveniente di tale formato sembrava essere la possibilità di collaudo del master prima della stampa vera e propria. Per questo il processo ha preso il nome di “masterizzazione” e masterizzatori sono le unità di scrittura. Nel giro di un decennio i supporti vergini sono divenuti più economici di un gelato alla crema e i masterizzatori sono presenti nella quasi totalità dei computer domestici, la masterizzazione è usata diffusamente come arma di backup (legale) e di copia (illegale).

Il **CD-R** è un supporto fotosensibile, delle stesse dimensioni del **CD** audio, con preincisa una traccia a spirale. Un raggio laser più potente di quello usato per la lettura crea aree bruciate (non riflettenti) che insieme alle aree non bruciate (riflettenti) svolgono la funzione dei pit e dei land.

Se il prodotto è di buona qualità un **CD-R**, una volta masterizzato come **CD** audio dovrebbe essere letto senza problemi da una qualunque meccanica per hi-fi o per computer (purché anch'essa di qualità adeguata, dai prodotti super-economici ci si possono sempre aspettare sorprese).

I programmi di masterizzazione permettono all'audiofilo le seguenti alternative (e talvolta altre ancora):

- estrazione delle singole tracce di un **CD** audio (ripping);
- creazione di una immagine su disco di un **CD** audio;
- copia di un **CD** audio (con varie opzioni che specificano quanto il formato originale viene disassemblato e ricomposto);
- scrittura in modalità audio di un'immagine preesistente;
- scrittura in modalità audio di tracce **WAV** preesistenti (ad esempio incise o ricavate da un ripping);
- scrittura in modalità dati di tracce **WAV** preesistenti.;

Conclusioni audiophile

Di tutto questo sproloquio tecnico vediamo adesso cosa interessa all'audiofilo dal punto di vista pratico.

- Il supporto **CD** audio è stato pensato solo per essere suonato e non elaborato al computer, le capacità di correzione degli errori sono buone ma non ottime.
- Se si vogliono salvare o archiviare i dati audio in formato digitale si DEVE fare una copia su **CD-ROM** in formato **WAV** (o **AIFF**), le copie su **CD** audio vanno bene solo per essere ascoltate, non come base di future rielaborazioni.
- Il risultato di una copia di un **CD** audio dipende da moltissimi fattori: la qualità dell'unità di ripping, del supporto di masterizzazione, del masterizzatore, la congruità delle opzioni scelte, la velocità di scrittura e lettura, ecc. In linea di principio una copia può suonare meglio di un originale (magari sporco o difettoso). Nel processo di copia, infatti, possono essere eliminati alcuni difetti dovuti alla masterizzazione originale o alla conservazione del supporto.
- In ogni caso è impossibile con un semplice processo di copia eliminare i difetti creati PRIMA della masterizzazione precedente (sarebbe troppo comodo poter correggere gli errori del pianista, le stecche del soprano o il *jitter* del clock del convertitore analogico digitale).