DMIF, Università di Udine

Tecnologie Digitali per il Cibo e la Ristorazione

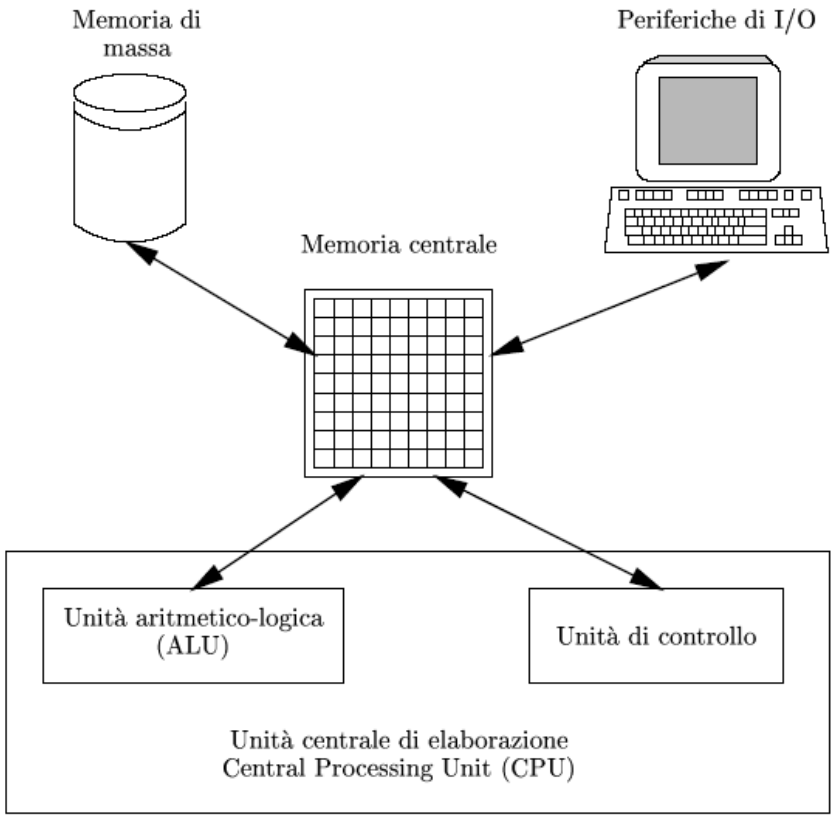
Architettura del calcolatore

Andrea Brunello
andrea.brunello@uniud.it

A.A. 2021–2022

Macchina di von Neumann

- I calcolatori moderni sono basati sull'architettura detta macchina di von Neumann (1945)

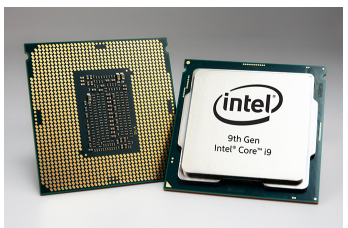


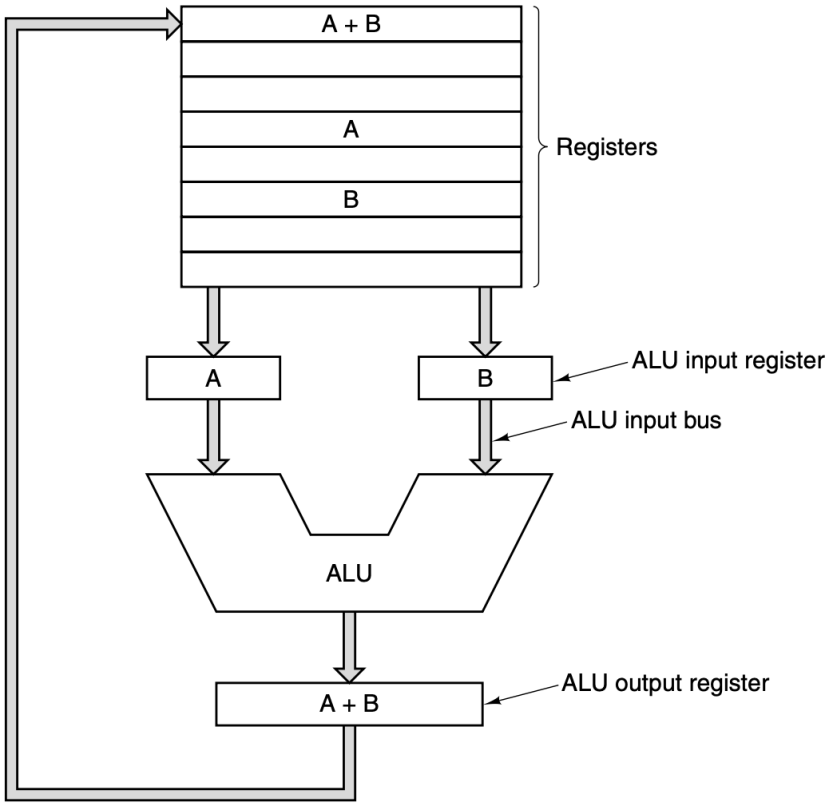
Macchina di von Neumann
Componenti principali

- **CPU**, che costituisce il "cervello" del calcolatore e contiene:
  - Unità di controllo
  - Unità aritmetico-logica + registri
- **Memoria centrale** (RAM) che immagazzina dati e istruzioni dei programmi
- **Unità di input** (es. tastiera, mouse)
- **Unità di output** (es. monitor, memoria di massa)
- **Bus**, un canale che collega tutti i componenti fra loro

La CPU

- La CPU esegue i programmi memorizzati nella memoria principale, prelevandone le istruzioni, esaminandole, ed eseguendole in sequenza
- La CPU ha diversi componenti:
  - L'**unità di controllo** (CU) trasferisce dati e istruzioni da/verso la memoria principale
  - L'**unità aritmetico-logica** (ALU) esegue semplici operazioni aritmetiche e booleane
  - I **registri** costituiscono una memoria di lavoro interna alla CPU estremamente veloce:
    - Program Counter (PC): punta alla prossima istruzione che deve essere recuperata per l'esecuzione dalla memoria
    - Instruction Register (IR): memorizza l'istruzione correntemente in esecuzione



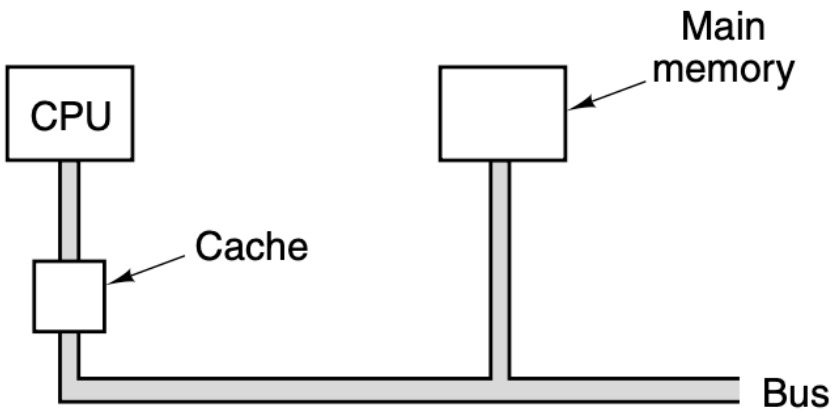


Le moderne CPU hanno diverse ALU che operano in parallelo, e specializzate per compiti diversi

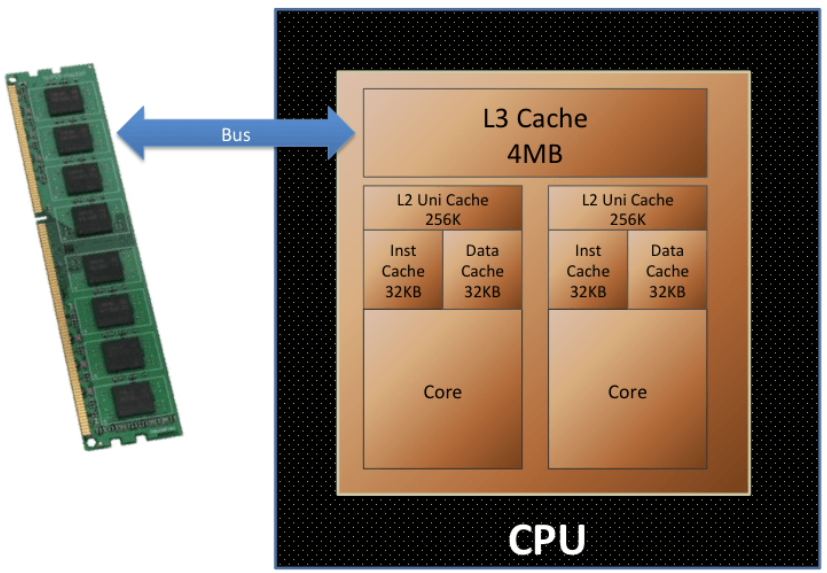
La CPU
Il ciclo *fetch-decode-execute*

- La CPU esegue ciasuna istruzione seguendo una piccola serie di passi:
  1. Recupera l'istruzione da eseguire dalla memoria (puntata dal PC), e memorizzala nell'IR
  2. Cambia il PC affinché punti alla successiva istruzione da eseguire
  3. Determina il tipo di istruzione recuperata dalla memoria
  4. Se l'istruzione necessita di dati (parole) contenuti in memoria, determina dove si trovano
  5. Recupera i dati, se necessari, e memorizzali nei registri della CPU
  6. Esegui l'istruzione
  7. Ritorna al passo 1

- Le CPU sono da sempre più veloci della memoria principale
- Quando la CPU richiede dei dati in memoria, possono trascorrere diversi cicli (ciclo = tempo necessario per l'esecuzione di una semplice operazione) prima che tali dati vengano trasferiti sui registri
- Soluzione: creare una memoria intermedia, piccola e molto veloce, la **cache** (circa 3–5 volte più lenta dei registri)



- Tipicamente la cache è organizzata su più livelli: L1, L2, L3, …
- Al crescere del livello, aumenta la capienza, aumenta la "distanza" dal processore, e diminuisce la velocità
- Tipicamente si va da qualche decina di KB per la cache di livello L1, all'ordine di MB per la cache di livello L3



- Quali dati portare in memoria cache? Intuitivamente, quelli che verranno utilizzati dalla CPU
- Principio di **località**: se la CPU ha richiesto dei dati in memoria, sul breve periodo probabilmente utilizzerà dei dati a loro vicini (temporalmente e/o spazialmente)
- Quando è necessario un dato, la CPU lo cercherà prima in cache L1; se non disponibile, in cache L2; e così, via, fino eventualmente a richiederlo alla memoria

```
Core i7 Xeon 5500 Series Data Source Latency (approximate)              [Pg. 22]

local  L1 CACHE hit,                                ~4 cycles (   2.1 -  1.2 ns )
local  L2 CACHE hit,                               ~10 cycles (   5.3 -  3.0 ns )
local  L3 CACHE hit, line unshared                 ~40 cycles (  21.4 - 12.0 ns )
local  L3 CACHE hit, shared line in another core ~65 cycles (  34.8 - 19.5 ns )
local  L3 CACHE hit, modified in another core    ~75 cycles (  40.2 - 22.5 ns )

remote L3 CACHE (Ref: Fig.1 [Pg. 5])       ~100-300 cycles ( 160.7 - 30.0 ns )

local  DRAM                                                    ~60 ns
remote DRAM                                                   ~100 ns
```

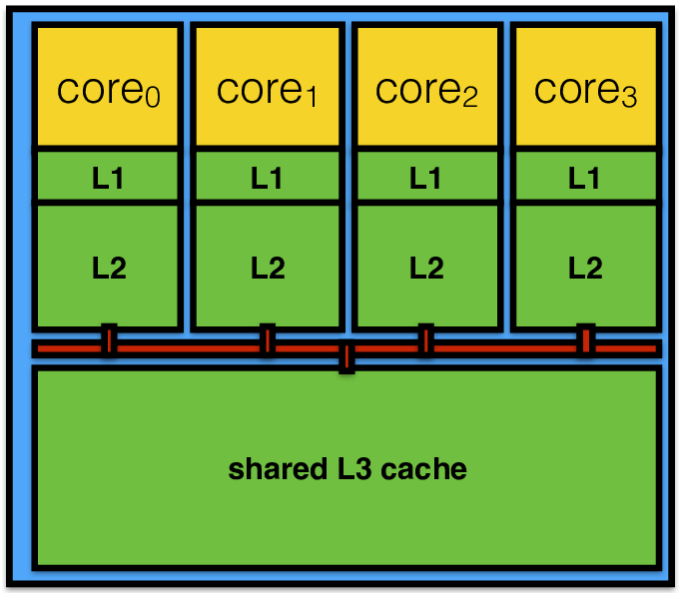
- Dato c il tempo di accesso alla cache (supponiamo vi sia una cache singola), m il tempo di accesso in memoria, e h l'hit ratio (frazione di volte in cui un dato richiesto viene trovato in cache), il tempo medio per accedere ad un dato sarà:

$$mean\_access\_time = c + (1 - h) * m$$

- Esempio: $c = 21\ ns$, $m = 80\ ns$, $h = 0.95$

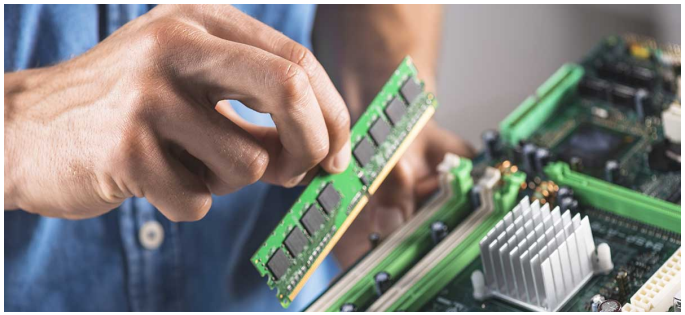
$$mean\_access\_time = 21 + (1 - 0.95) * 80 = 25\ ns$$

- Numero di core (ciascuno contenente i propri registri, CU, ALUs, . . .)
- Frequenza di clock, misurata in GHz $\approx$ miliardi operazioni al secondo: utile per comparare processori appartenenti alla stessa famiglia
- Dimensione (in MB) e numero di cache: L1, L2, L3



La memoria principale

- La memoria principale (RAM, Random Access Memory) memorizza dati e istruzioni
- Dialoga direttamente con la CPU
- Capienza limitata (tipicamente 4–16 GB)
- Veloce (anche se 10–100 volte più lenta della CPU cache)
- Volatile: perde il suo contenuto allo spegnimento della macchina
- Può essere implementata con flip-flop (SRAM); oggi tipicamente si sfruttano altre tecnologie (DRAM, SDRAM)



La memoria principale
Struttura

- Come abbiamo visto, l'unità base di memoria è il **bit**
- La RAM consiste di un insieme di **celle**, ognuna delle quali memorizza un insieme di bit (tipicamente 8, = 1 byte)
- Ciascuna cella è caratterizzata da un numero, detto **indirizzo**, che la identifica
- Alle celle vengono assegnati indirizzi contigui, es., in una memoria con n celle, queste ultime avranno indirizzi da 0 a $n - 1$

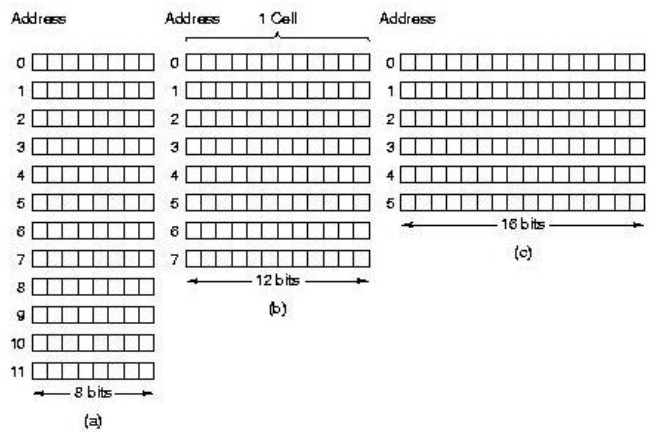


Figure 2-9. Three ways of organizing a 96-bit memory.

- A loro volta, i byte vengono raggruppati in **parole**
- Le parole sono tipicamente costituite da 32 o 64 bit (4 o 8 byte)
- Il calcolatore tipicamente opera su parole intere: i registri nella CPU conterranno 32 o 64 bit, e la ALU effettuerà operazioni su sequenze di 32 o 64 bit
- Dunque, le parole sono le unità fondamentali trattate all'interno della CPU, nonché le unità di informazioni trasferite da/verso la RAM

- Dimensioni: tipicamente 4 – 32 GB
- Velocità:

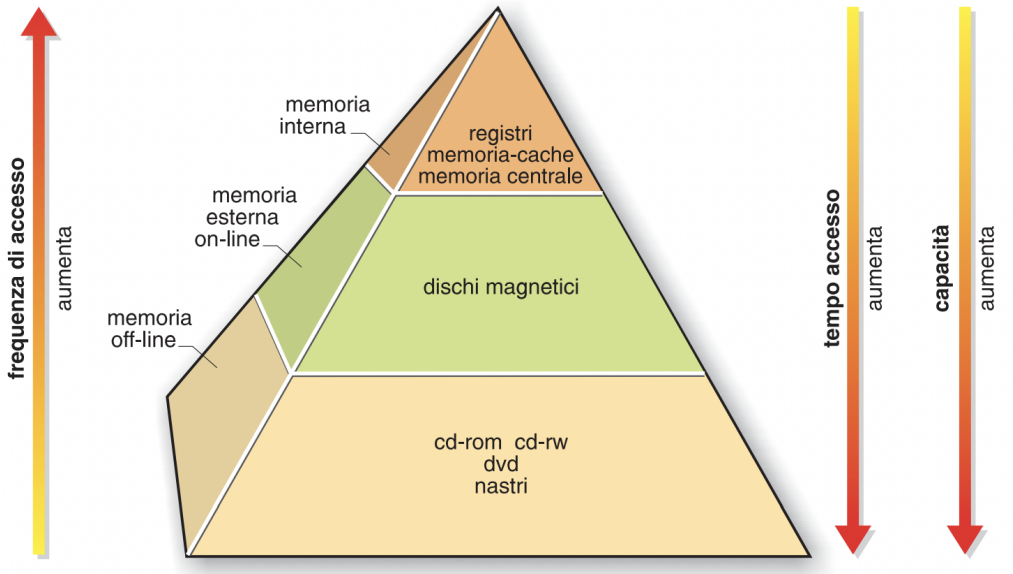
RAM Type	Speed (MHz)	Peak Transfer Rate*
DDR2	533	4.27 GB/s
	667	5.33 GB/s
	800	6.4 GB/s
DDR3	1066	8.5 GB/s
	1333	10.6 GB/s
	1600	12.8 GB/s
	1866	14.9 GB/s
DDR4	2133	17 GB/s
	2400	19.2 GB/s
	2666	21.3 GB/s
	3200	25.6 GB/s

La memoria secondaria

- Non importa quanto è grande la memoria principale; non sarà mai sufficiente a contenere tutta l'informazione che un utente vuole memorizzare

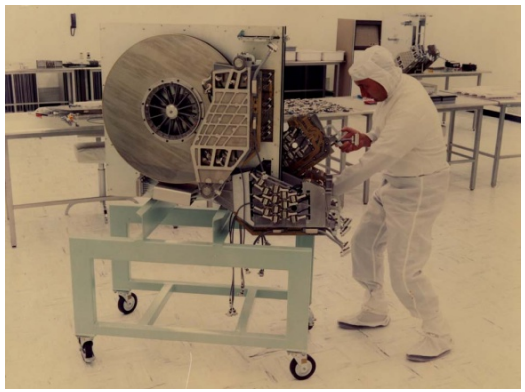
- **Idea**: organizzare la memoria in una gerarchia
  - si va dai registri sulla CPU, alla CPU cache, alla memoria principale, memoria secondaria, memoria esterna
  - con il procedere nella gerarchia:
    - aumentano i tempi di accesso
    - aumentano le dimensioni
    - diminuisce il costo per byte

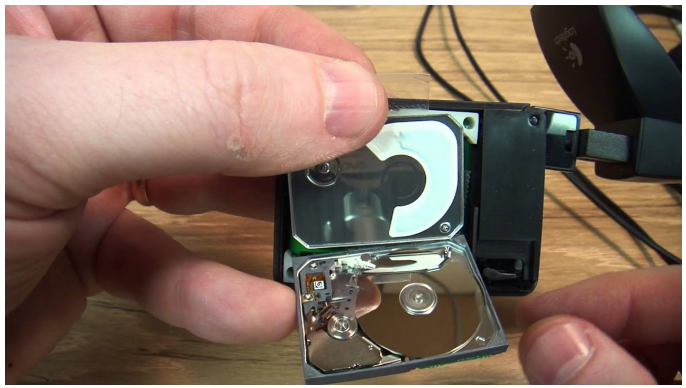
La memoria secondaria
La gerarchia della memoria



Tipo di memoria	Tempo di accesso	Capacità
Registri di memoria	1 - 3 ns	< 1KB
Memoria cache	3 - 10 ns	512 KB - 4 MB
Memoria centrale	50 - 200 ns	1 - 4 GB
Disco magnetico	20 - 30 ms	50 GB - 1 TB
Nastro	> 1 s	4 GB - 300 GB
Dischi ottici	> 1 s	650 MB - 4,7 GB

- Un disco magnetico (o hard disk, storicamente per distinguerlo dal floppy disk) è costituito da uno o più piatti di alluminio ricoperti da materiale magnetizzabile
- Inizialmente, i piatti potevano essere 50 cm in diametro; oggi, tipicamente variano dai 3 ai 9 cm





- Il disco ruota e sulla sua superficie è posta una testina, che può muoversi verso l'interno o l'esterno del disco
- La testina fluttua ad un'altezza di circa 0.5 micron
- Le testine scrivono i dati sulla superficie del disco modificando la carica del materiale magnetizzabile, tramite l'applicazione di una corrente positiva o negativa
- Allo stesso modo, la carica del materiale magnetizzabile induce una corrente positiva o negativa nella testina; in questo modo si effettua la lettura

- La sequenza circolare di bit incontrata dalla testina durante una rotazione completa del disco è detta **traccia**
- Ciascuna traccia è costituita da un insieme di **settori**, tipicamente contenenti 512 byte di dati; inoltre, sono presenti gap e informazioni accessorie
- Ciò spiega perché la capacità di un disco formattato è circa il 15% inferiore rispetto al dato dichiarato dal produttore
- In un centimetro possono esserci anche 50.000 tracce

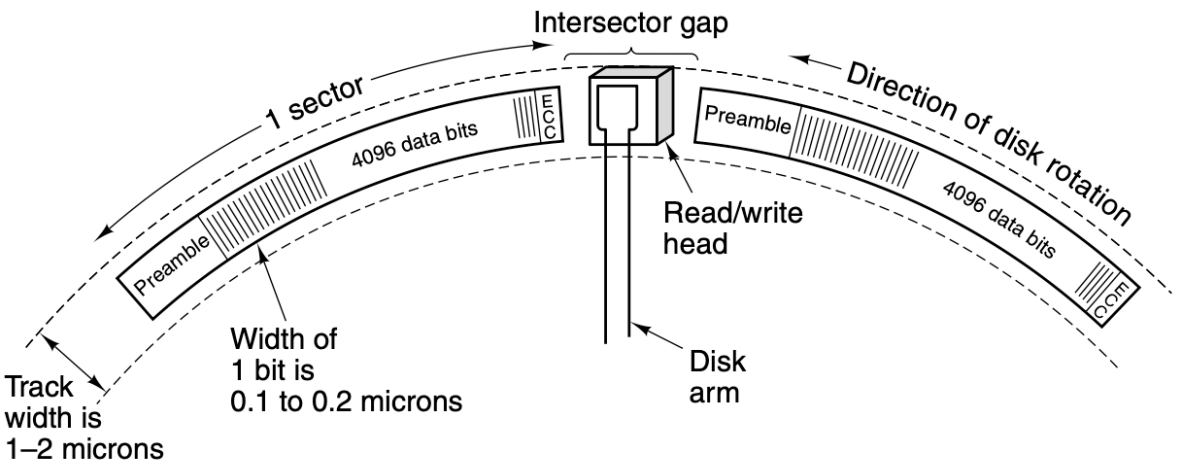


Figure 2-19. A portion of a disk track. Two sectors are illustrated.

- La maggior parte dei dischi è costituita da 1 a 12 piatti, impilati verticalmente
- Ciascuna superficie ha la propria testina
- I dischi ruotano solidalmente, e le testine si muovono in sincrono
- L'insieme delle tracce poste alla stessa distanza radiale è detto **cilindro**

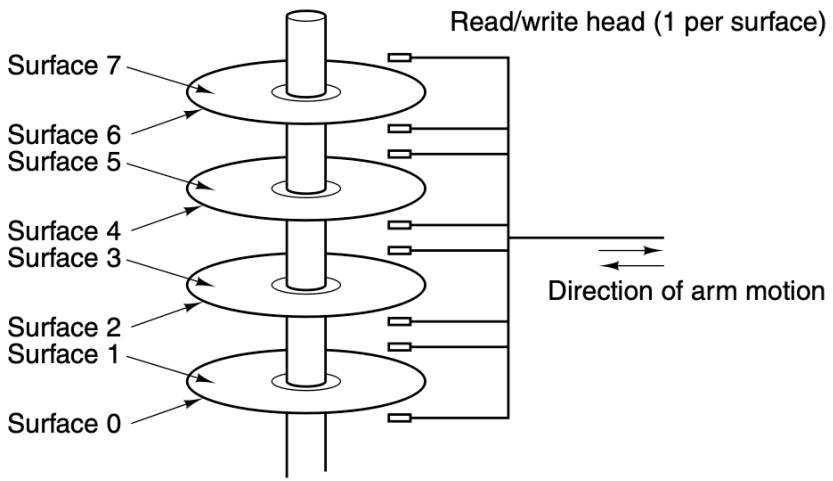


Figure 2-20. A disk with four platters.

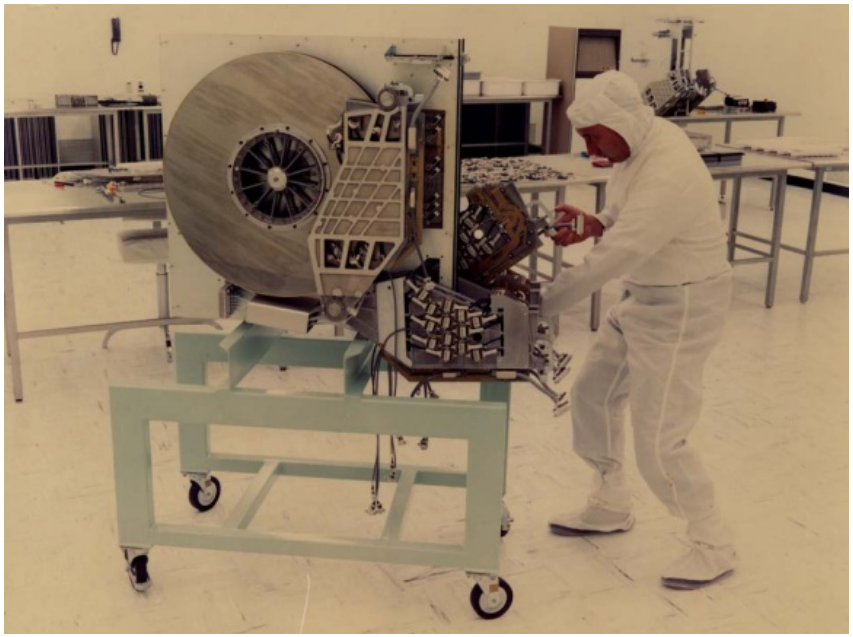
- Il dato fondamentale è la **velocità di rotazione**, tipicamente 5.400, 7.200, o 10.800 RPM
- Il tempo di accesso all'informazione su disco è dato da *tempo di seek + latenza di rotazione*
- I tempi medi di seek (posizionamento della testina) sono di 5–10 millisecondi
- Il tempo di rotazione è 6–12 millisecondi, dunque la latenza media di rotazione è 3–6 millisecondi
- È inoltre importante distinguere fra:
  - **maximum burst rate**: velocità di lettura una volta che la testina si trova sopra al primo bit da leggere della sequenza
  - **maximum sustained rate**: prende in considerazione anche i tempi di seek e di rotazione

Breve storia degli hard disk

- Gli hard disk (HD) rappresentano forse il caso più emblematico dell'evoluzione tecnologica a cui sono stati (e sono tutt'ora) soggetti i calcolatori
- Il primo HD è stato sviluppato da IBM nel 1956 (IBM Model 350 Disk). Conteneva 24 dischi, ciascuno di 60 centimetri di diametro. Capacità di memorizzazione: 5 MB

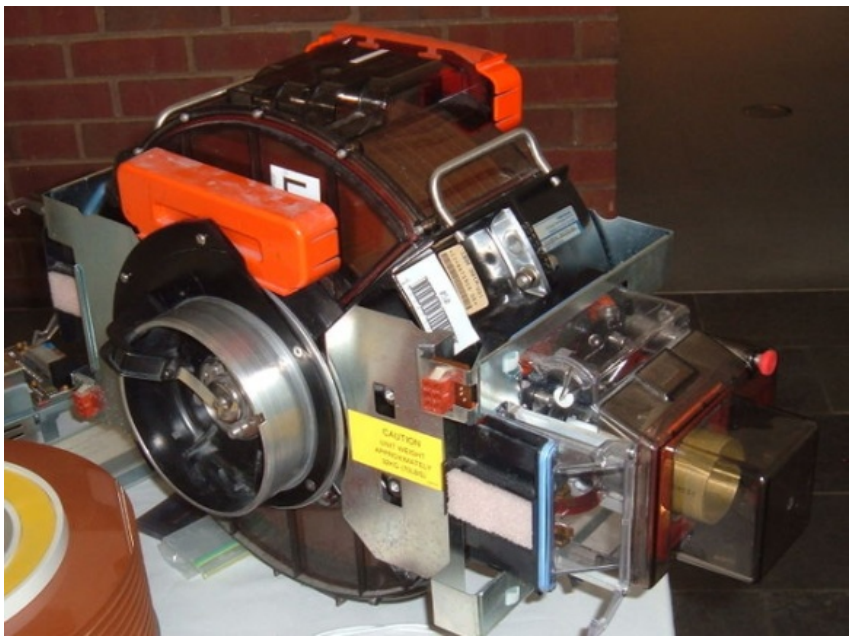
Breve storia degli hard disk

- Nonostante la densità di memorizzazione dei dati incrementasse rapidamente anno dopo anno, i dischi rigidi (principalmente per uso mainframe) continuarono ad essere costruiti seguendo la filosofia del "bigger is better" fino agli anni '80
- Nell'immagine, è possibile vedere un disco del 1979, con una capacità di 250 MB



Breve storia degli hard disk

- IBM introduce il primo disco in grado di superare 1 GB di capacità nel 1980 (IBM 3380, 2.52 GB)
- L'intero dispositivo ha le dimensioni di un congelatore, ed un peso di 250 chili



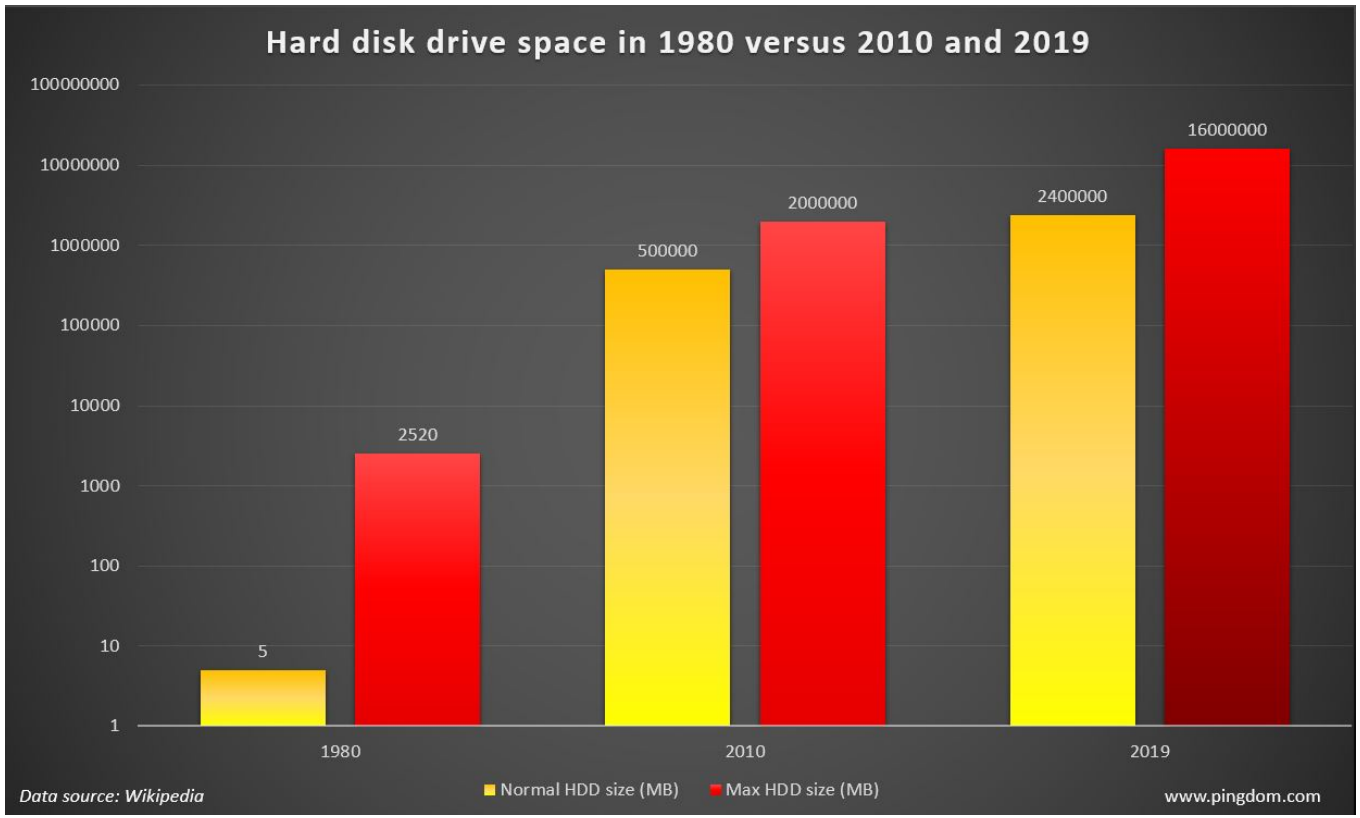
Breve storia degli hard disk

- I dischi di piccole dimensioni iniziano ad apparire negli anni ’80, per equipaggiare i PC
- I primi drive installato su tali dispositivi avevano una capacità di 5 MB, e dischi del diametro di 13 cm

Figure: Riduzione delle dimensioni degli HD, dagli anni ’80 ad oggi

Breve storia degli hard disk

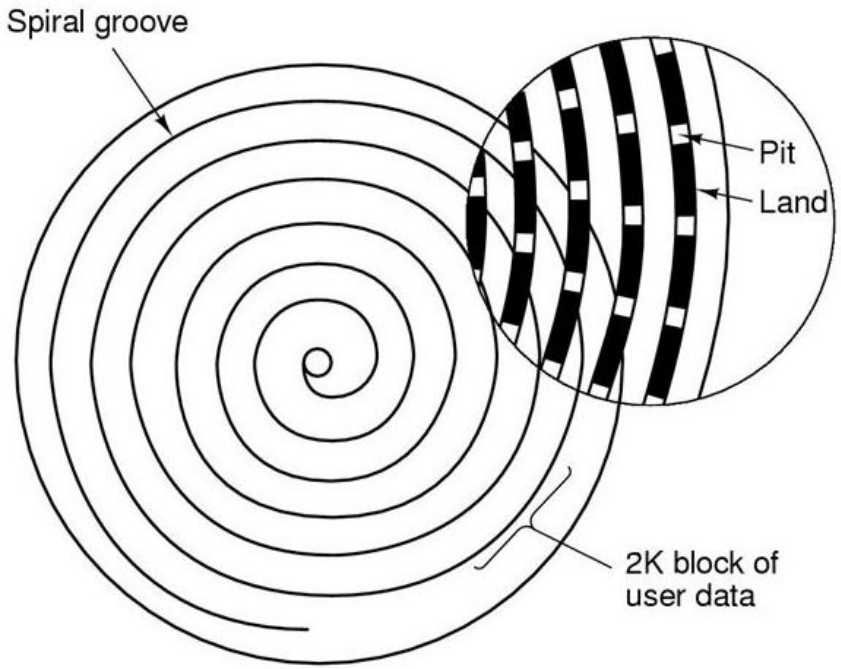
- Ci sono voluti 51 anni per produrre il primo disco in grado di contenere 1 TB di dati, nel 2007
- Nel 2009, si ha il primo disco con una capacità di 2 TB
- Nel 2019, la capacità massima sale a 15 TB



- I dischi allo stato solido (SSD, solid-state disk) sono costituiti da celle di memoria flash che memorizzano l'informazione tramite speciali transistor
- A differenza degli hard disk, non hanno parti mobili:
  - Maggiore resistenza agli urti e alle sollecitazioni
  - Maggiore velocità di accesso e trasferimento dei dati (> 15 volte risp. hard disk)
- Svantaggi:
  - Costo superiore
  - **Durata**: ciascuna cella può sopportare tipicamente 100.000 operazioni di scrittura. Tecnica di **wear leveling** per ottimizzare la durata delle celle distribuendo le scritture uniformemente sulle celle

- Sviluppati nel 1980 da Philips/Sony per rimpiazzare i vinili (red book), durata stimata 100 anni
- Standard per la memorizzazione di dati generici nel 1984 (yellow book)
- I dati sono memorizzati su una traccia a spirale, che inizia dal centro del disco e va verso l'esterno
- La traccia presenta avvallamenti (pit) e parti piane (land), e l'informazione è codificata come passaggio da pit/land o land/pit (1), o assenza di passaggio (0)

La memoria esterna
CD-ROM (2)



- Velocità di rotazione variabile da 530 (interno) a 200 RPM (esterno) per mantenere velocità angolare costante
- La traccia è lunga 5.6 km!
- Spazio a disposizione: inizialmente 650 MB, poi 700 MB

DVD, Blu-ray

- DVD
  - Tracce più fini e più fitte
  - Laser a lunghezza d'onda più corta
  - 4.7 GB (single layer, single side)
  - Single/Double side, single/double layer (fino a 17 GB)
- Blu-ray
  - Laser blu a lunghezza d'onda ancora inferiore
  - Permette di mettere a fuoco con più precisione
  - Ulteriore riduzione della dimensione delle tracce, ed aumento della loro densità
  - 25 GB (single side), 50 GB (double side)