

Fonaments dels Computadors

L'Entorn i l'Execució de Programes (1/2)

Grau en Intel·ligència Artificial

Xavier Martorell

Xavi Verdú

Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Creative Commons License

Aquest document utilitza Creative Commons Attribution 3.0 Unported License



Els detalls d'aquesta licència es poden trobar a <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

Index

- **Generació d'executables**
- Components Bàsics del SO
- Impacte del SO en el rendiment i en el consum d'energia

Definim les bases de l'exemple

```
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
```

```
int global = 4;
```

```
int main(int argc, char **argv){
    char buf[512];
    int num;
```

```
    num = sprintf(buf, "Hello World %d!\n", global);
    write(1, buf, num);
```

```
    return 0;
```

```
}
```

Codi
d'Alt Nivell
(hello.c)

El Codi de Llenguatge d'Alt Nivell
no pot ser executat directament
per la CPU perquè no ho entén

Analitzem el codi de l'exemple

```
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
```



Fitxers Capçalera

```
int global = 4;
```



Variable Global

```
int main(int argc, char **argv){
    char buf[512];
    int num;
```



Variables Locals

```
    num = sprintf(buf, "Hello World %d!\n", global);
    write(1, buf, num);
```



Crida a Funcions Externes

```
    return 0;
```



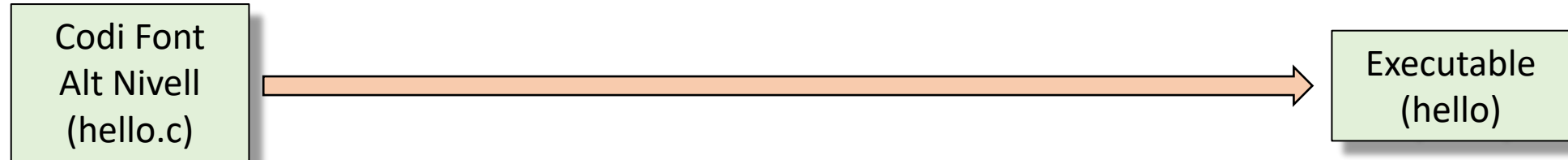
Valor que retorna el programa quan finalitza

```
}
```

Els Fitxers Capçalera (Header files) tenen l'informació necessària pel compilador sobre els components externs utilitzats en aquest codi, com ara les crides a “sprintf” i “write”

De codi d'alt nivell a codi executable

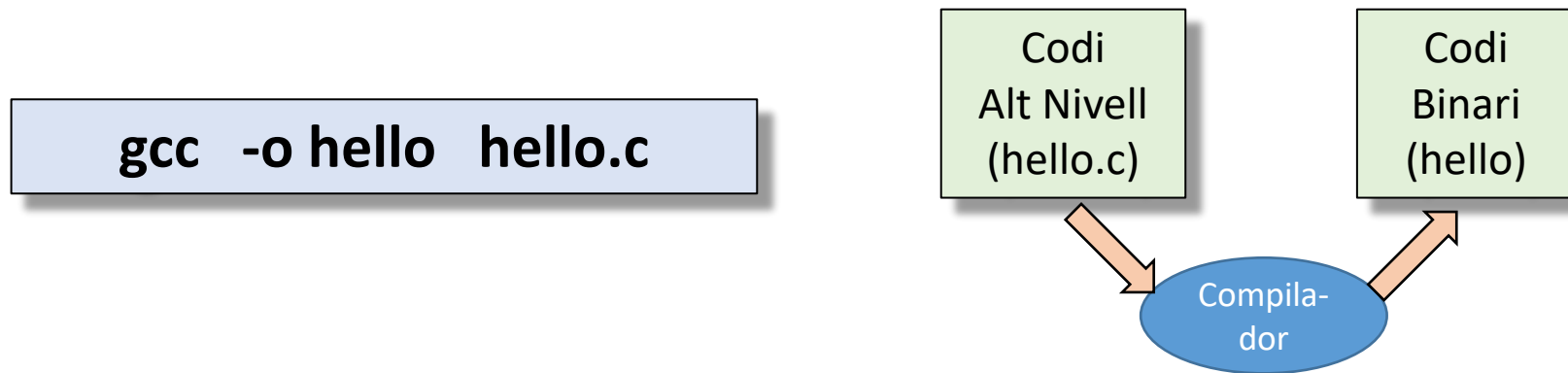
- Com podem transformar codi font a un fitxer executable?



- **Codi font:** programa que pot ser escrit/modificat i entès per un humà
- **Fitxer executable:** programa que pot ser executat per un ordinador

De codi d'alt nivell a codi executable

- **Compilador:** software que tradueix un codi implementat amb un llenguatge a un altre llenguatge
 - Normalment tradueix de codi d'alt nivell a un de baix nivell

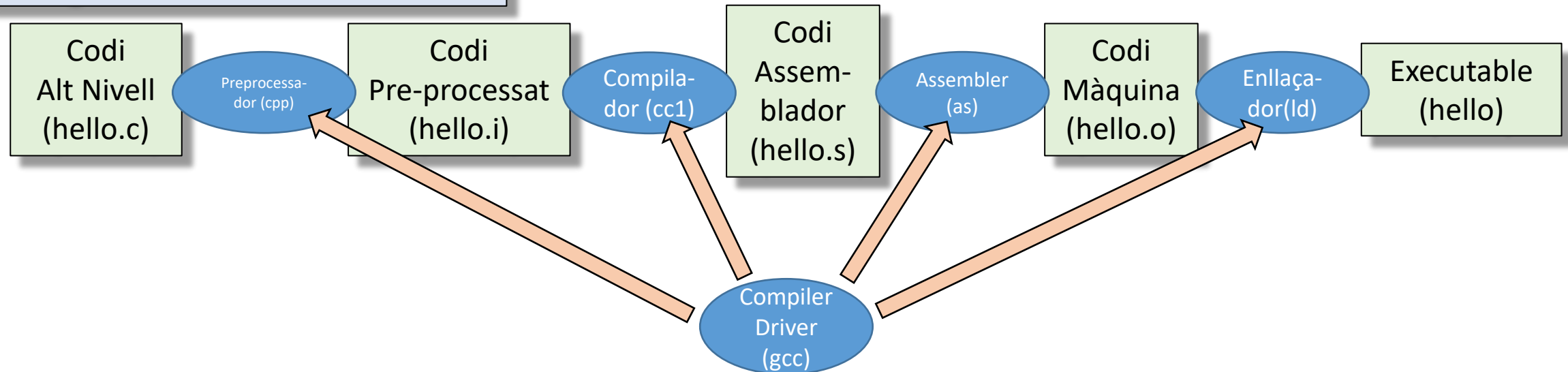


- **Passos de compilació:** tasques complexes que poden ser dividides en passos més petits

De codi d'alt nivell a codi executable

- Etapes de la compilació: preprocessar, compilar, ensamblar i enllaçar

```
gcc -o hello hello.o
```



- **Compiler driver:** programa que invoca els components de les etapes de compilació

De codi d'alt nivell a codi executable

- **Pre-processor:** processa directives del llenguatge (#include, #define...)
- **Compilador:** genera codi ensamblador
- **Assemblador:** software que tradueix codi ensamblador a codi màquina
 - El resultat es diu **fitxer objecte** (amb extensió **.o**)
 - **Fitxer Objecte:** combinació de instruccions codi màquina, dades, i informació necessària per posar les instruccions a memòria
 - Codi relocatable (ho veurem en properes transparències)
 - **Fitxer Biblioteca (Library):** combinació de fitxers objecte
- **Enllaçador:** programa que combina codis independents (fitxer objecte i biblioteques) per crear un executable, mentre resol tots els símbols sense definir
 - **Fitxer Executable:** programa que pot ser executat en un ordinador. Té el format d'un fitxer objecte, però les referències estan resoltes. No hi han símbols sense definir.

Exemple de Codi Assemblador

...

```
xorl    %eax, %eax
movl    global(%rip), %edx
leaq    -528(%rbp), %rax
leaq    .LC0(%rip), %rsi
movq    %rax, %rdi
movl    $0, %eax
call    sprintf@PLT
movl    %eax, -532(%rbp)
movl    -532(%rbp), %eax
movslq  %eax, %rdx
leaq    -528(%rbp), %rax
movq    %rax, %rsi
movl    $1, %edi
call    write@PLT
```

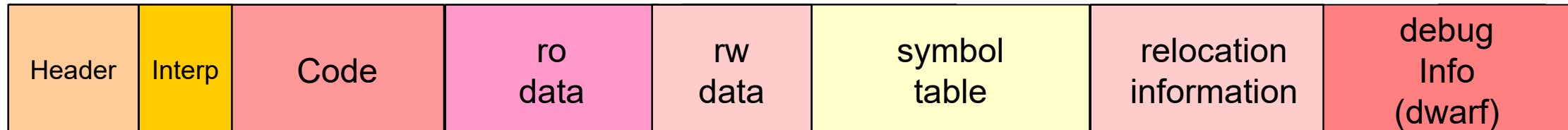
...

Optimitzacions del Compilador

- -O x on x és un nombre que indica el tipus d'optimització
- Per exemple, el compilador gcc/g++ té les següents opcions:
 - -O0: sense optimitzacions. Redueix el temps de compilació i preserva el comportament per depurar
 - -O1, or -O: intenta reduir la mida del codi i el temps d'execució, sense fer optimitzacions que agafin molt de temps de compilació
 - -O2: fa gairebé totes les optimitzacions possibles que no impliquin un compromís entre espai i velocitat. Comparat amb -O1, aquesta opció augmenta tant el temps de compilació com el rendiment del codi generat
 - -O3: habilita totes les optimitzacions anteriors, així com altres de més avançades: function inlining, register renaming i loop unrolling entre altres

Fitxers Objecte / executables (codi màquina)

- Fitxers objecte/executables per SO tipus UNIX inclouen:
 - 1) **Capçalera del fitxer Object:** mida i localització de les altres regions del fitxer objecte
 - 2) **Segment de Text:** codi màquina (instruccions)
 - 3) **Segment Estàtic de Dades:** dades que duren tota la vida del programa (e.g. variables globals)
 - 4) **Taula de Símbols:** una taula que ajuda a saber l'ubicació de variables i funcions que poden ser referenciades des d'altres fitxers objecte
 - 5) **Registres/Informació de reubicació (relocation):** informació sobre adreces referenciades en el fitxer objecte
 - 1) L'enllaçador ho assigna una vegada es resol les ubicacions de memòria
 - 2) Mentre es carrega l'executable, el carregador aplica reubicacions si les adreces han canviat
 - 6) **Informació de Depuració:** dades addicionals per una eina que es diu depurador (debugger), que serveixen per relacionar instruccions màquina a codi d'alt nivell



Exemple de fitxer objecte

- Contingut de hello.o (od -t x1c hello.o)

```
00000000  7f  45  4c  46  02  01  01  00  00  00  00  00  00  00  00  00
          177  E  L  F 002 001 001  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0
00000020  01  00  3e  00  01  00  00  00  00  00  00  00  00  00  00  00
          001  \0  >  \0 001  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0
00000040  00  00  00  00  00  00  00  00  00  20  03  00  00  00  00  00
          \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  003  \0  \0  \0  \0  \0
00000060  00  00  00  00  40  00  00  00  00  00  00  40  00  0d  00  0c
          \0  \0  \0  \0  @  \0  \0  \0  \0  \0  \0  @  \0  \r  \0  \f
00000100  ...
00000200  48  65  6c  6c  6f  20  57  6f  72  6c  64  20  25  64  21  0a
          H  e  l  l  o  W  o  r  l  d  %  d  !  \n
00000220  00  00  47  43  43  3a  20  28  53  55  53  45  20  4c  69  6e
          \0  \0  G  C  C  :  (  S  U  S  E  L  i  n
00000240  75  78  29  20  38  2e  31  2e  30  00  00  00  00  00  00  00
          u  x  )  8  .  1  .  0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0
00000260  14  00  00  00  00  00  00  00  00  01  7a  52  00  01  78  10  01
          024  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0  \0 001  z  R  \0 001  x 020 001
```

Exemple de Fitxer Objecte

- `objdump -xs hello.o`

```
Contents of section .text:
0000 4881ec08 0200008b 15000000 00be0000  H.....
0010 00004889 e7b000e8 00000000 4863d048  ..H.....Hc.H
0020 89e6bf01 000000e8 00000000 b8000000  .....
0030 004881c4 08020000 c3          .H.....

Contents of section .data:
0000 04000000          ....

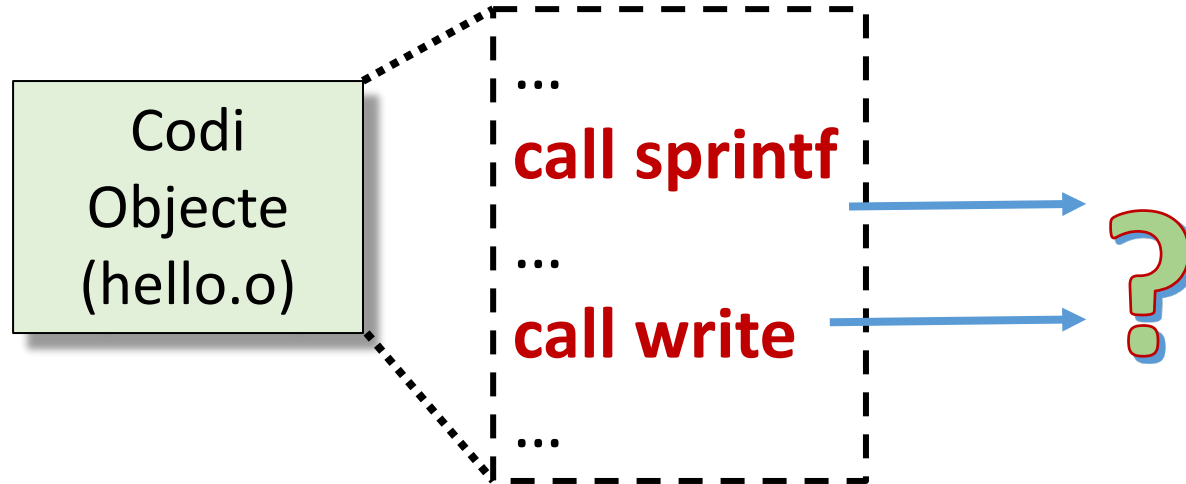
Contents of section .rodata.str1.1:
0000 48656c6c 6f20576f 726c6420 2564210a Hello World %d!.
0010 00          .

Contents of section .comment:
0000 00474343 3a202853 55534520 4c696e75 .GCC: (SUSE Linu
0010 78292038 2e312e30 00          x) 8.1.0.

Contents of section .eh_frame:    // exception support
0000 14000000 00000000 017a5200 01781001  .....zR..x..
```

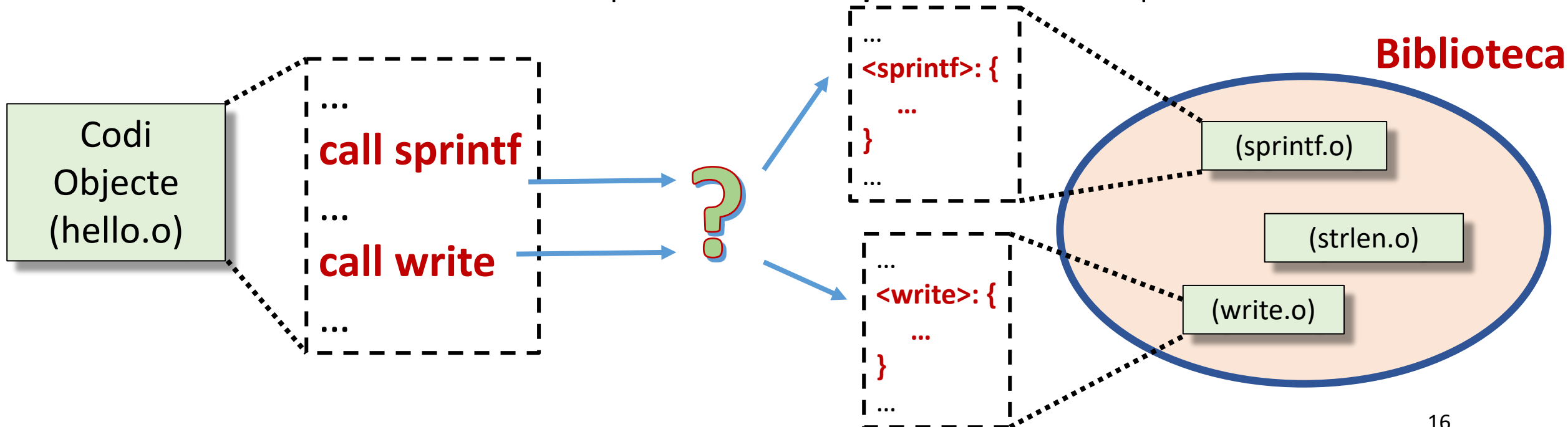
De codi d'alt nivell a codi executable

- Els codis objecte acostumen a fer crides a funcions que estan en altres fitxers objecte o inclús en biblioteques (libraries)



Biblioteques

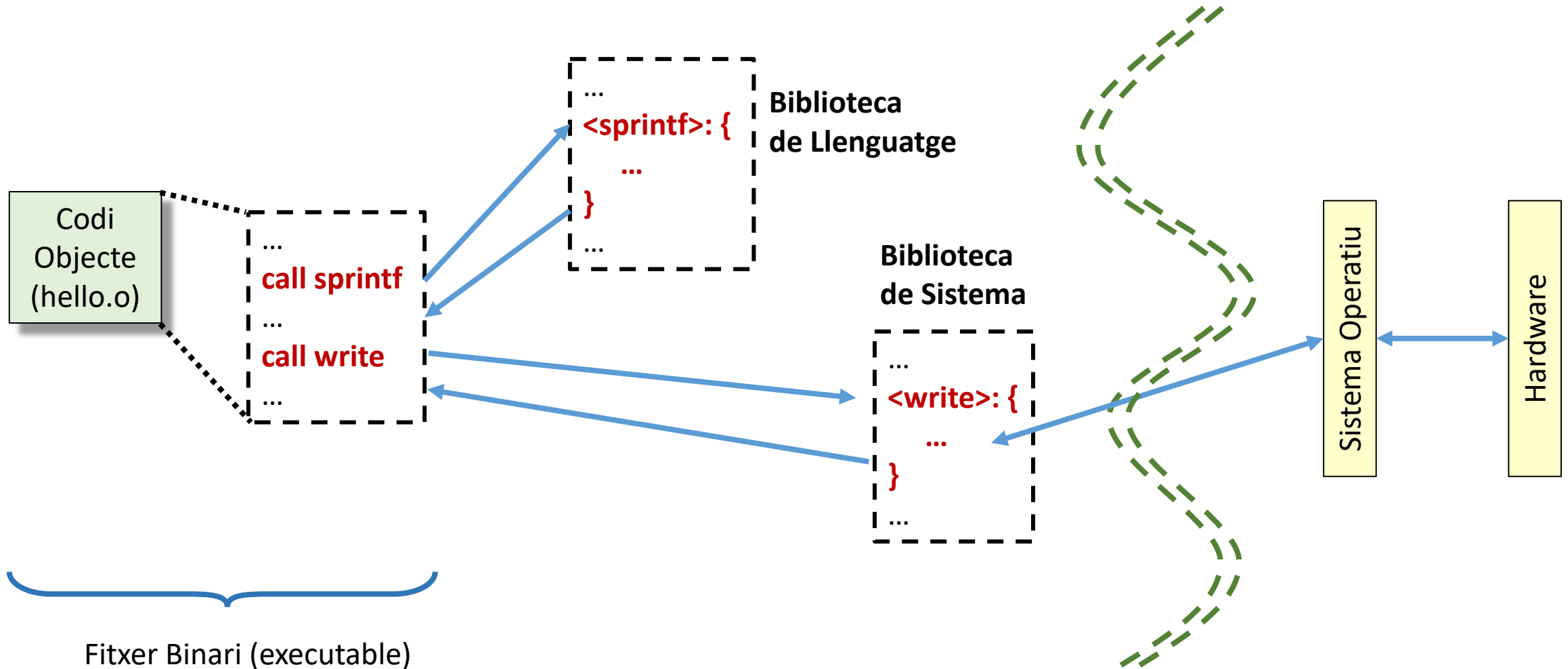
- **Biblioteca (library):** fitxer que encapsula un conjunt de fitxers objecte
 - Les biblioteques ofereixen **independència**
 - Un codi d'alt nivel és independent del **SO** i de l'**arquitectura del Hw**, però ...
 - ... els executables es creen per un **SO** i una **arquitectura de Hw** en particular



Tipus de Biblioteques

- Biblioteques de Llenguatge
 - Proporciona funcions del llenguatge de programació
 - Relaciona un llenguatge a un SO en particular, però és independent de l'arquitectura Hw
 - De vegades són auto-contingudes (e.g. **math**): independent del SO
 - De vegades demana serveis al SO (e.g. **sprintf**, cin, cout...)
- Biblioteques del Sistema
 - Inclouen funcions que invoquen serveis/rutines del SO (e.g. **write**, open, ...)
 - **Crides a Sistema (syscalls)**
 - Relaciona un SO a una arquitectura Hw en particular (independent del codi d'alt nivell)
 - Depèn del tipus de SO i de l'arquitectura de la CPU
- Exemples d'incompatibilitat
 - Linux 32 vs 64 bits, CPU Intel vs ARM, Ubuntu vs OpenSUSE, ...

Analitzem les crides a funcions externes

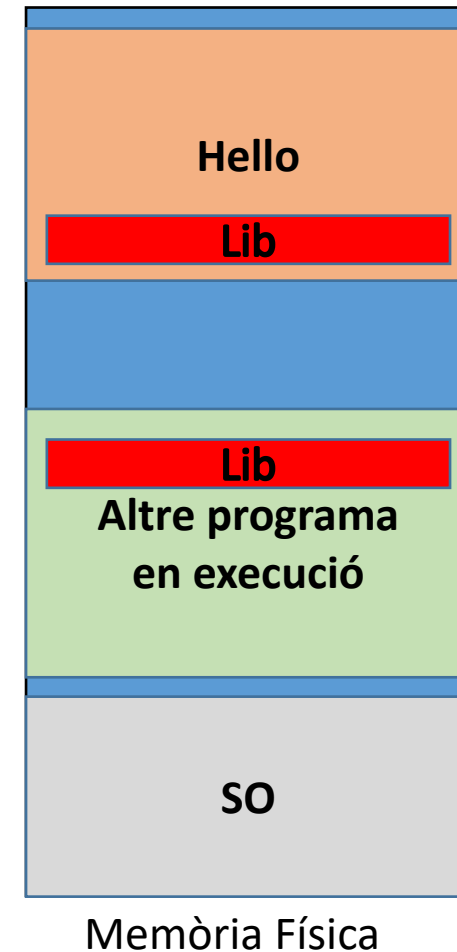
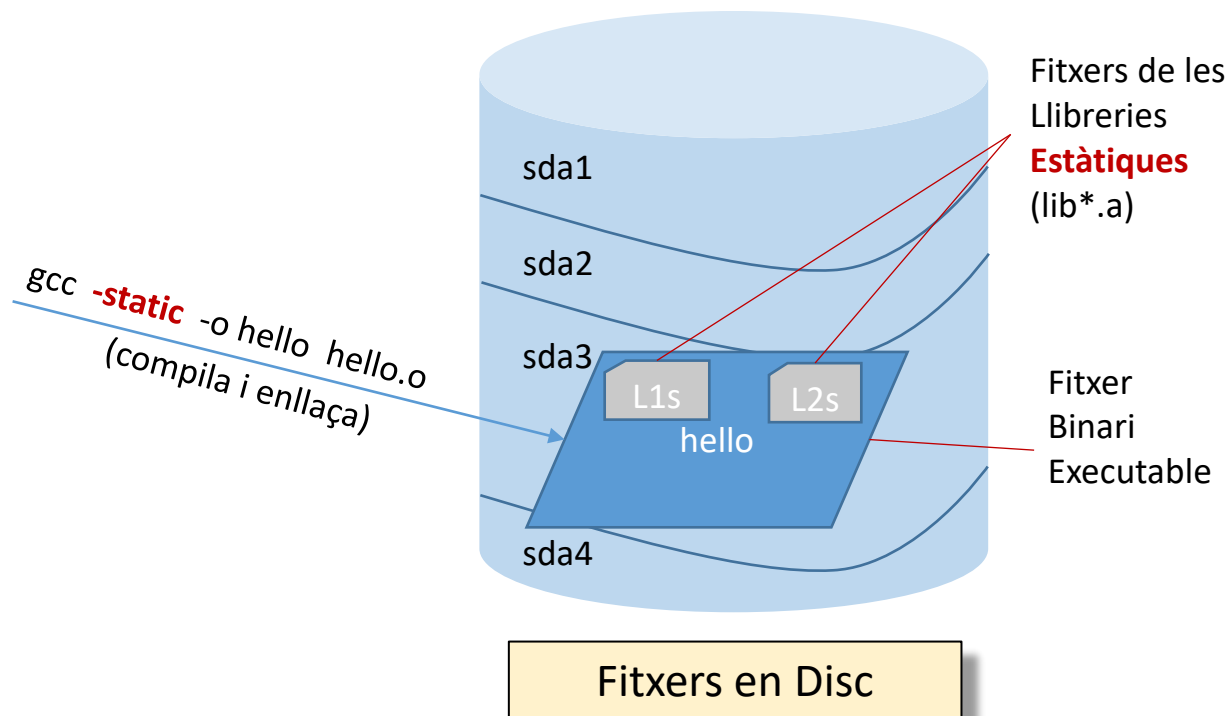


Enllaçament Estàtic versus Dinàmic

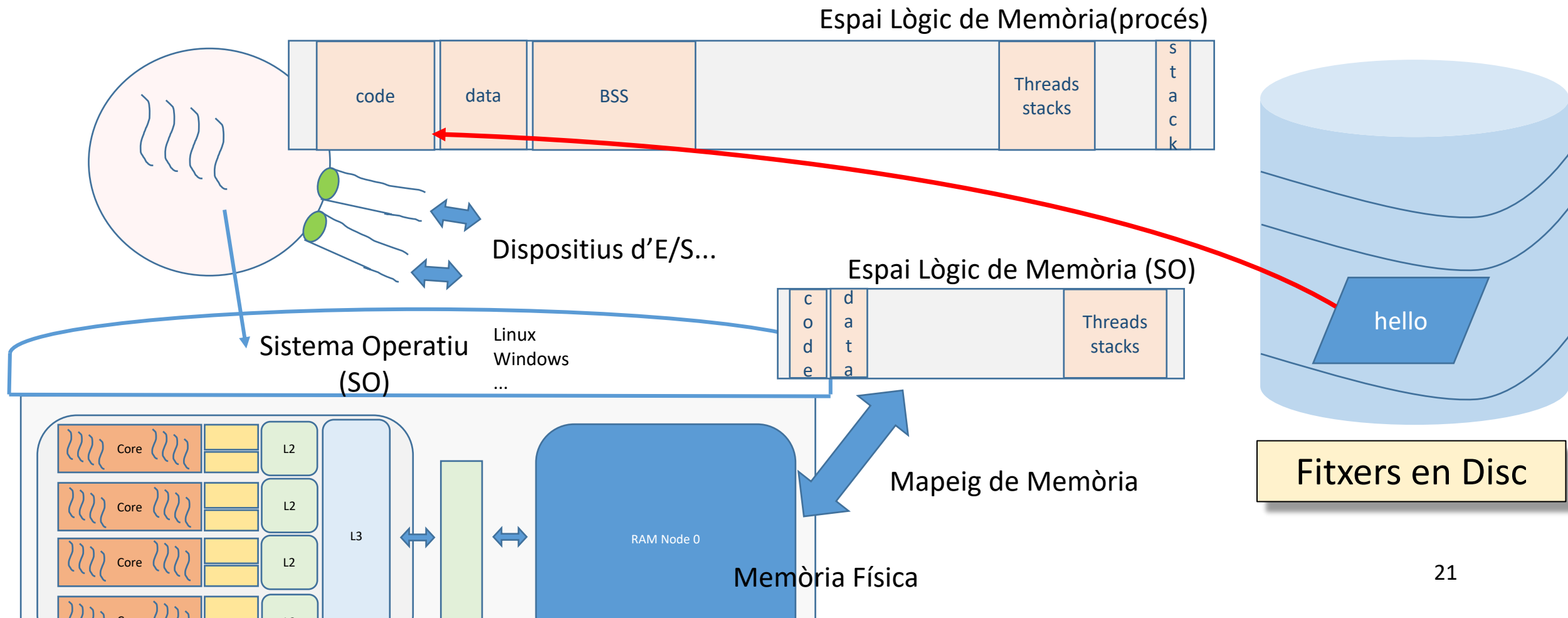
- Enllaçar
 - Fer accessible a un codi compilat el codi pre-compilat que inclou les llibreries
- Enllaçament Estàtic
 - El codi de les llibreries s'inclouen DINS de l'executable
 - Malgasta espai (en disc quan es guarden, i en memòria quan s'executen)
 - Diferents programes poden necessitar la mateixa llibreria, però es carreguen múltiples vegades (dins de cada executable)
 - Llibreries estàtiques: **“.a”** en SO basats en UNIX; **“.lib”** en SO basats en Windows
- Enllaçament Dinàmic
 - Part del procés d'enllaçament es endarrerit fins al moment d'execució. El codi no s'inclou en l'executable
 - Compartició de llibreries
 - Estalvia espai tant en disc com memòria
 - Diferents programes poden accedir a una mateixa llibreria compartida carregada una única vegada en memòria
 - Llibreries dinàmiques: **“.so”** en SO basats en UNIX; **“.dll”** en SO basats en Windows

Gestió de biblioteques enllaçades estàticament

- Programes en execució que han sigut compilats amb enllaçament estàtic no comparteixen les biblioteques
 - Les biblioteques en realitat estan incrustades dins del programa

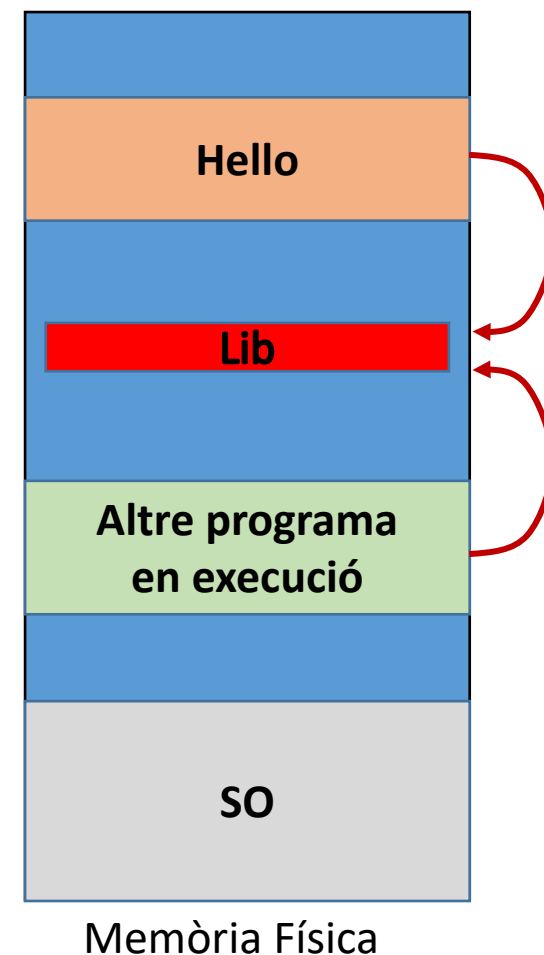
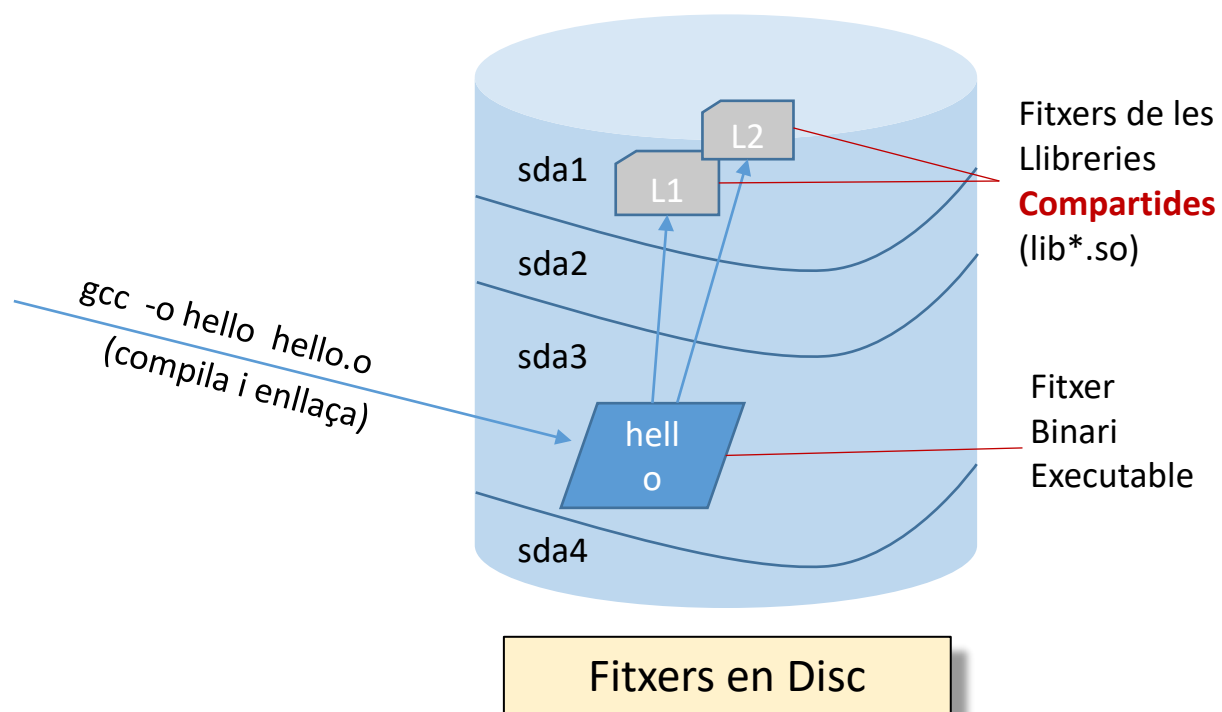


Procés amb llibreries estàtiques

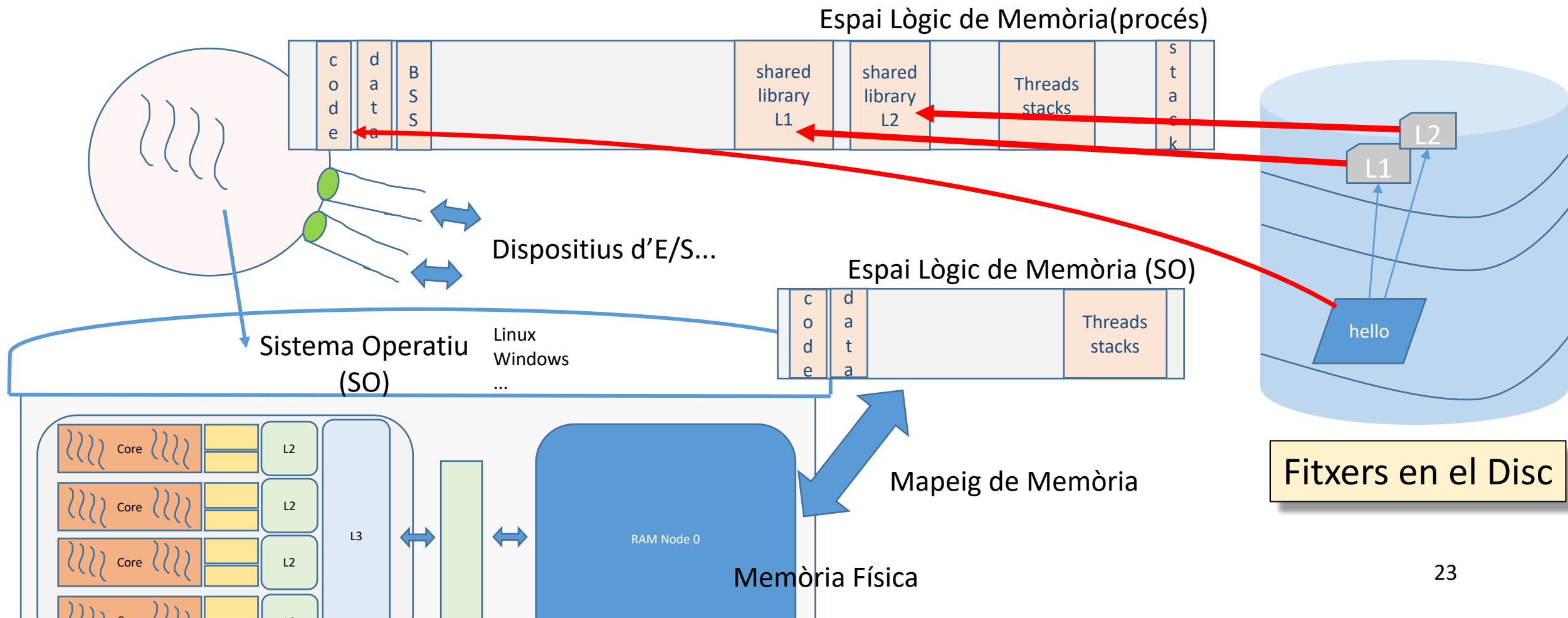


Gestió de biblioteques enllaçades dinàmicament

- Programes en execució que han sigut compilats amb enllaçament dinàmic poden compartir les biblioteques
 - Les biblioteques es carreguen una única vegada

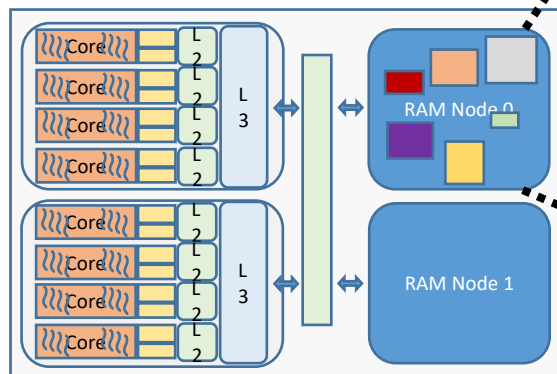


Procés amb biblioteques compartides (Enllaçat Dinàmic)

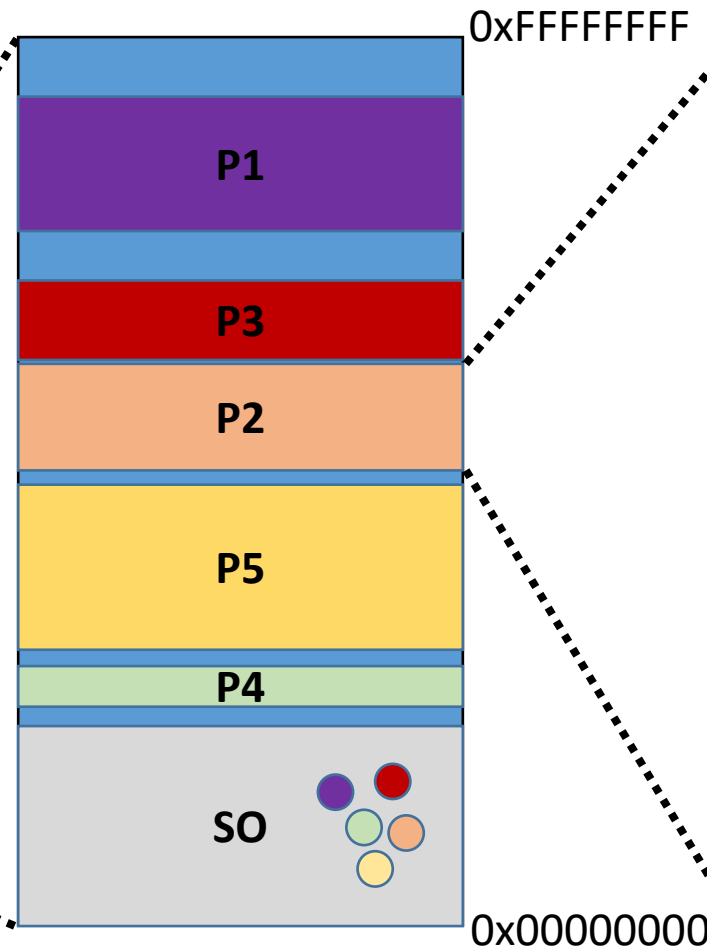


Continguts del Procés en Memòria

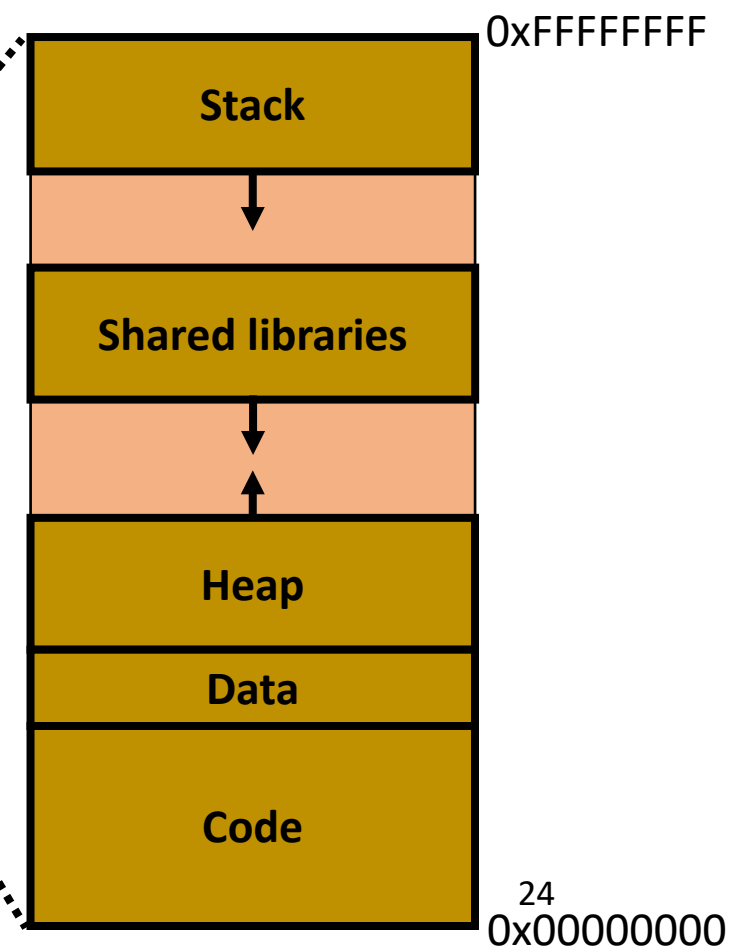
- **Stack:** memòria dinàmica
 - Arguments de funcions
 - Variables locals
- **Shared libraries:** Code, data...
- **Heap:** memòria dinàmica
 - Assignada en temps d'execució
- **Data:** .bss & .data
 - Variables globals
- **Code:** .text
 - Instruccions



Memòria física



Memòria lògica



Possibles Optimitzacions

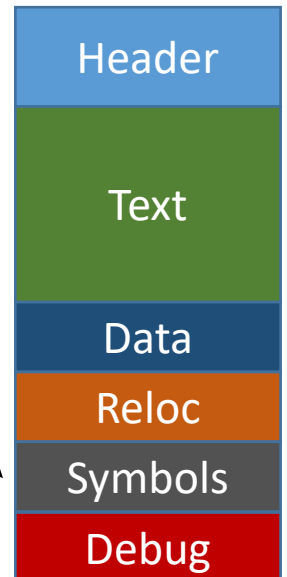
- Llibreries compartides (enllaçades dinàmicament)
 - PROS: redueix el consum d'espai en disc i memòria
 - CONS: si la llibreria no s'ha carregat prèviament pot afectar negativament en el rendiment (càrrega sota demanda)
- Càrrega sota demanda: Una rutina no es carrega fins que no s'invoca
 - PROS: càrrega inicial més ràpida i menor utilització de memòria
 - CONS: durant l'execució pot baixar puntualment el rendiment
- Memòria Virtual: extensió de la càrrega sota demanda (treure lo que no és necessari)
 - PROS: augmenta el grau de multiprogramació
 - CONS: augmenta la complexitat de la gestió del Sistema de Memòria
- Hi han més optimitzacions, però que són més particulars
 - Com ara predicció en els accessos a memòria, endarrerir assignació de nova memòria física

Fitxers Objecte / executables (codi màquina)

- **Fitxer Executable:** programa que pot ser executat en un ordinador. Té el format d'un fitxer objecte, però les referències estan resoltes. No hi han símbols sense definir.
 - Seccions vistes en el fitxer objecte
 - Header, text (code), data, relocation information, symbol table, debug info
 - És possible que hi hagin adreces no resoltes
 - Apunten a rutines de biblioteques

Programa executable

X està definit a @1 en Data
Y està definit a @2 en Data
A està definit a @3 en Text
B està definit a @4 en Text



Fitxers executables són reubicables amb símbols associats a adreces

Taula de Símbols té símbols amb adreces de memòria assignades

L'enllaçador ha resolt adreces no definides, excepte pels símbols de biblioteques que s'enllacen dinàmicament

Executables

- Estructures específiques que depenen del SO
 - Windows – PE32 Portable Executable, PE32+ per 64 bits
 - Linux – ELF Executable and Linkable Format
 - x86_64 dades de 64-bits i adreces de 64-bits
 - x32 dades de 64-bits i adreces de 32-bits
 - i386 dades de 32-bits i adreces de 32-bits (compatible amb sistemes 32-bits)
- La capçalera (header) de l'executable té informació sobre el programa
 - Utilitzat per...
 - ...les eines ELF per llegir/entendre/escriure aquest tipus de fitxers
 - ...el SO per carregar els fitxers binaris i biblioteques per procedir amb l'execució

https://en.wikipedia.org/wiki/Portable_Executable

https://en.wikipedia.org/wiki/Executable_and_Linkable_Format

Exemple de Fitxer Executable

ELF Header:

Magic: 7f 45 4c 46 02 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00

Class:

ELF64

Data:

2's complement, little endian

Version:

1 (current)

OS/ABI:

UNIX - System V

ABI Version:

0

Type:

EXEC (Executable file)

Machine:

Advanced Micro Devices X86-64

Version:

0x1

Entry point address:

0x400470

Start of program headers:

64 (bytes into file)

Start of section headers:

6672 (bytes into file)

Flags:

0x0

Size of this header:

64 (bytes)

Size of program headers:

56 (bytes)

Number of program headers:

9

Size of section headers:

64 (bytes)

Number of section headers:

31

Section header string table index: 28

Informació de Depuració

- DWARF (<http://dwarfstd.org>): per mantenir la temàtica de noms... ELF
 - Debugging With Attributed Record Formats
- S'inclou amb l'opció **-g** de gcc/g++
- Varies subseccions
 - Números de línia de codi font
 - Informació de crida a funcions
 - Tipus de dades
 - Enumeracions
 - Strings
 - Estructures, unions, classes
 - Funcions
 - ...

Depurar el Codi (Debugging)

- Un depurador (debugger) és una eina que executa un procés sota unes condicions controlades per ajudar als programadors a trobar errors (bugs)
 - Pot pausar/continuar l'execució i analitzar valors, com ara variables, parametres i adreces de memòria, entre altres
 - Però té certes limitacions i requisits, com ara dificultats per analitzar execucions paral·leles, dependència del llenguatge i complexitat per saber fer-ne ús correcte de l'eina
- Un programa...
 - Sense informació de depuració en l'executable pot ser depurat, però és més difícil perquè no hi ha informació addicional per entendre més fàcilment les instruccions de baix nivell
 - Amb informació de depuració en l'executable pot ser depurat més fàcilment pel depurador, ja que mostra informació addicional que relaciona codi de baix nivell amb línies de codi d'alt nivell
- Exemples: [GDB – The GNU Debugger](https://www.gnu.org/software/gdb/), PDB (The Python Debugger), Visual Studio

Intèrpret vs. Compilador

- Compilador: les etapes de compilació es fan per separat de l'execució
 - Compilar una única vegada, però executar moltes
- Intèrpret:
 - AOT: Ahead-of-Time
 - Compilar el programa abans d'executar: es fa en temps de compilació
 - JIT: Just-in-Time
 - Compilar el programa mentre s'executa: es fa en temps d'execució
 - Passos per executar un programa interpretat:
Source code → AOT → **Bytecode** (codi intermedi) → JIT → **Native code**

Intèrpret vs. Compilador

- Casos d'ús
 - Java
 - Java source code -> Compilat a -> Java Bytecode -> Interpretat per: Java Virtual Machine
 - **Python**
 - **Python -> Compilat a -> CPython -> Interpretat per: Python Interpreter**
 - Microsoft .NET
 - Any .NET language -> Compilat a -> CIL (Common Intermediate Language) -> Interpretat per: CLR (Common Language Runtime)

Exemple de biblioteca estàndard de Python

- Distribuit amb l'entorn d'execució de Python

- Strings
- Números i matemàtiques
- Accés a fitxers i directoris
- Compressió de dades
- Serveis del SO
- Comunicacions i protocols
- ...

<https://docs.python.org/2/library/>

<https://docs.python.org/3/library/>

Intèrpret vs. Compilador

- Intèrpret
 - Executa instruccions directament des del codi font
 - Poc temps per analitzar el codi font, però el programa executa més lent
 - No es crea un fitxer objecte
 - Executa fins el primer error → fàcil per depurar
 - E.g. Python, MATLAB, R, Javascript
- Compilador
 - Escaneja tot el codi i tradueix a codi màquina
 - Molt de temps per analitzar el codi font, però el programa executa més ràpid
 - Genera fitxers objecte
 - Missatges d'error després d'escanejar tot el programa
 - E.g. C, C++, FORTRAN

Bibliografia

- GCC (The GNU Compiler Collection) Tutorial
 - <http://gcc.gnu.org/>
 - <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Optimize-Options.html>
- GDB (The GNU Project Debugger) Tutorial
 - <https://www.sourceware.org/gdb/>
 - <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Debugging-Options.html>
- Python Tutorial
 - <https://docs.python.org/3/tutorial/>
- PDB (The Python Debugger) Tutorial
 - <https://docs.python.org/3/library/pdb.html>