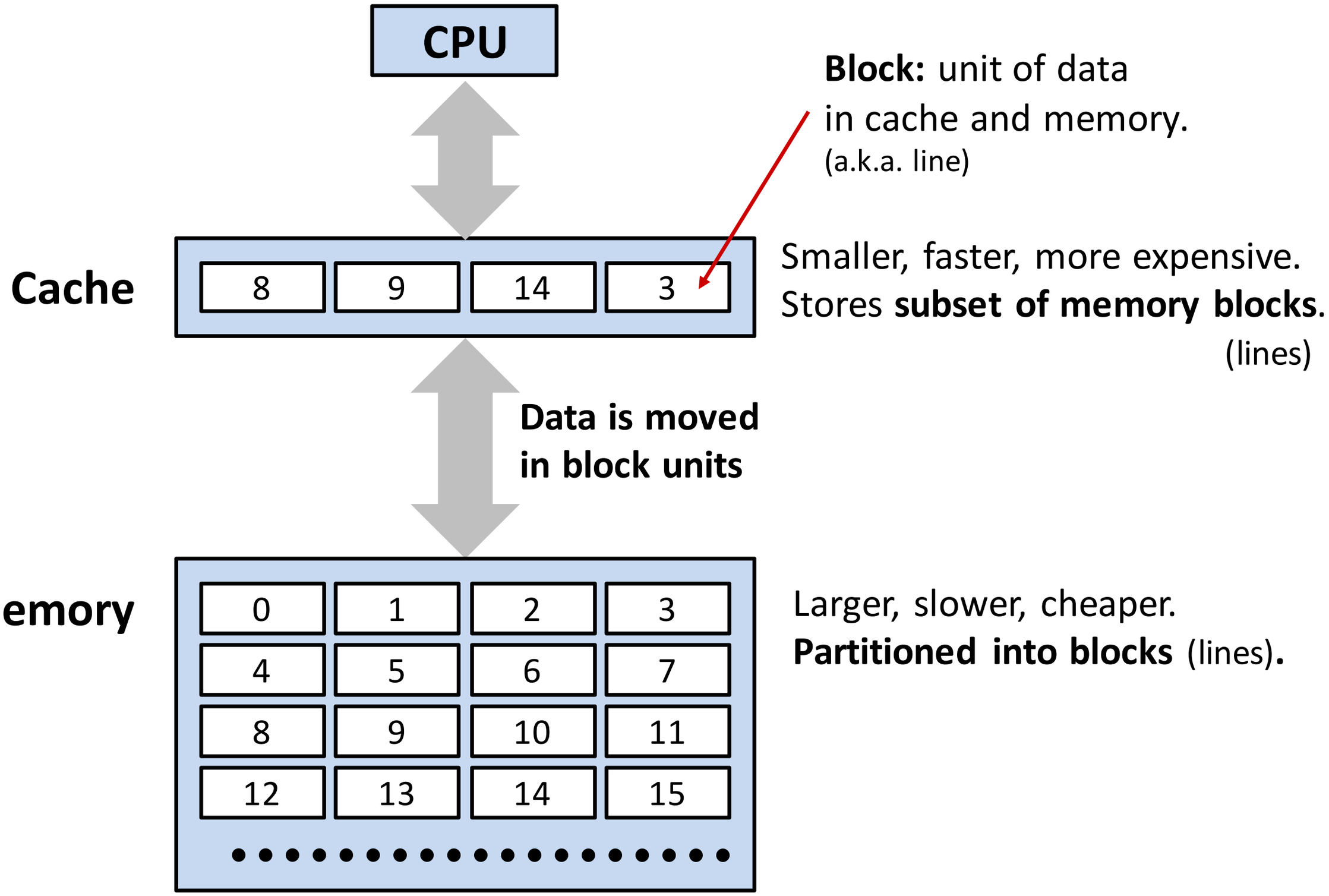
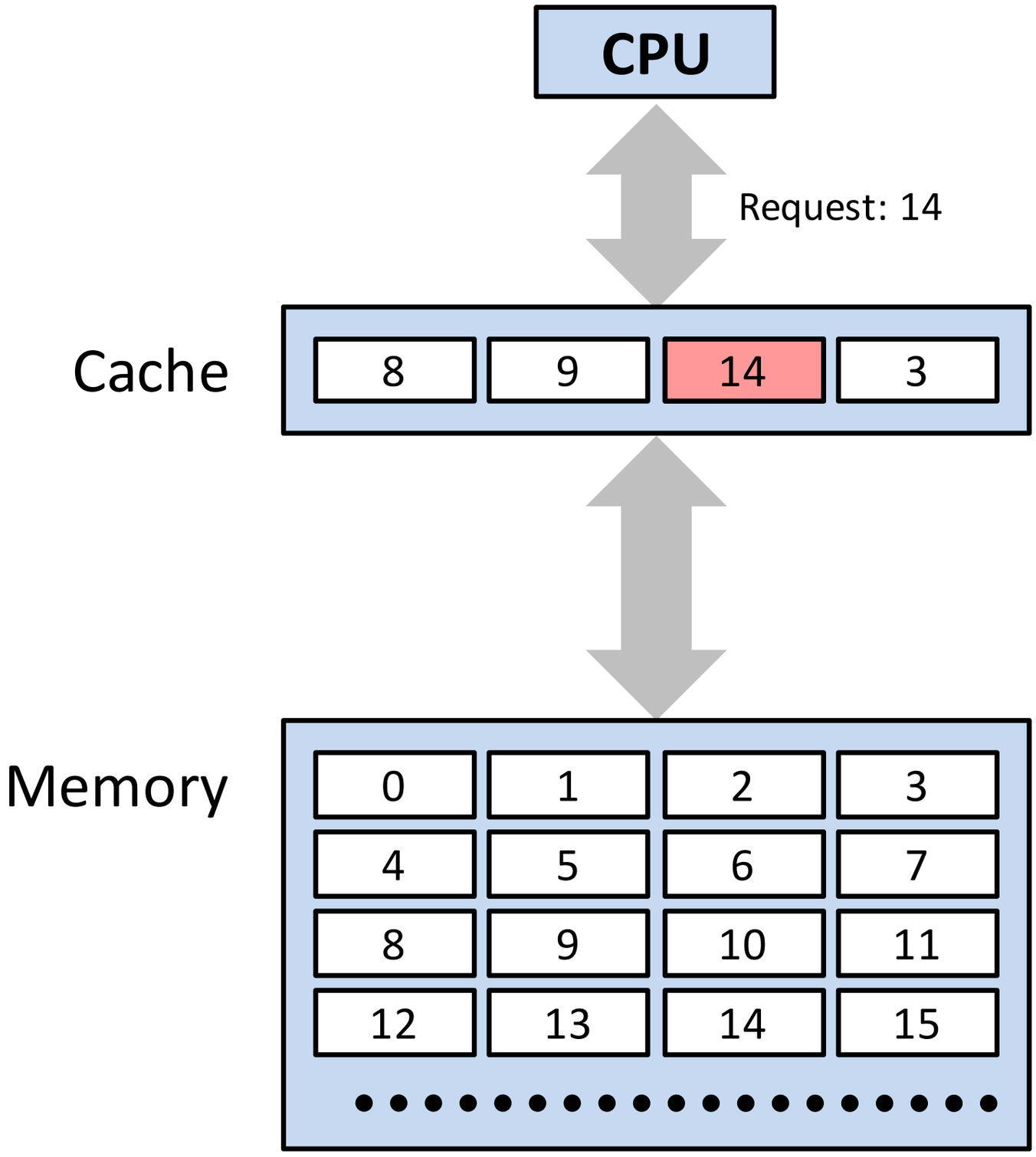
存储器层次结构

Part3：虚拟存储器

Cache原理


CPU
Block: unit of data in cache and memory. (a.k.a. line)
Cache
8
9
14
3
Smaller, faster, more expensive. Stores subset of memory blocks. (lines)
Data is moved in block units
Memory
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Larger, slower, cheaper. Partitioned into blocks (lines).

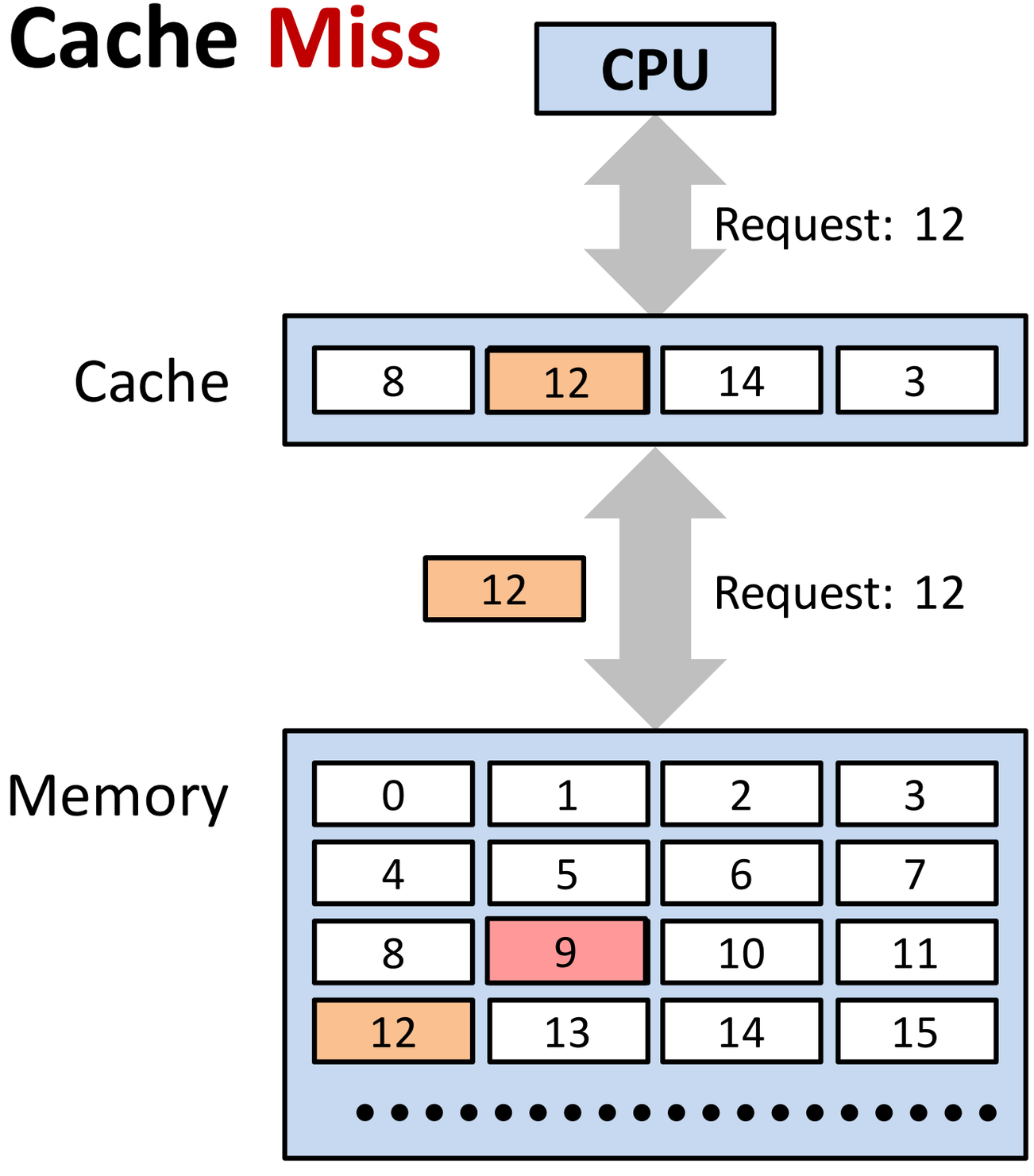
Cache Hit



1. Request** data in block **b.

2. Cache hit:
Block b is in cache.

Cache Miss



1. Request *data in block* ***b.***

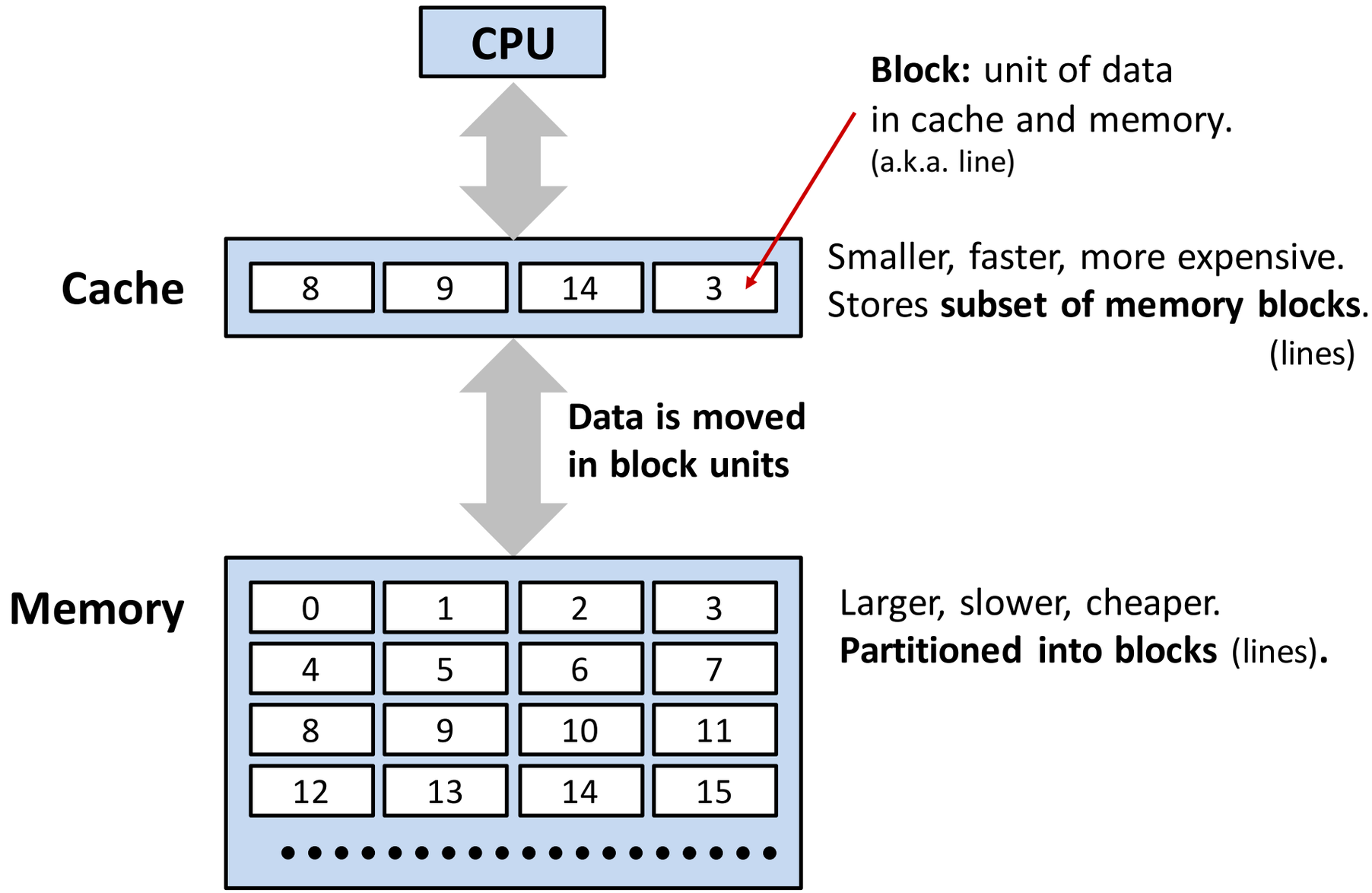
2. Cache miss:
block is not in cache

3. Cache eviction:
Evict a block to make room, maybe store to memory.

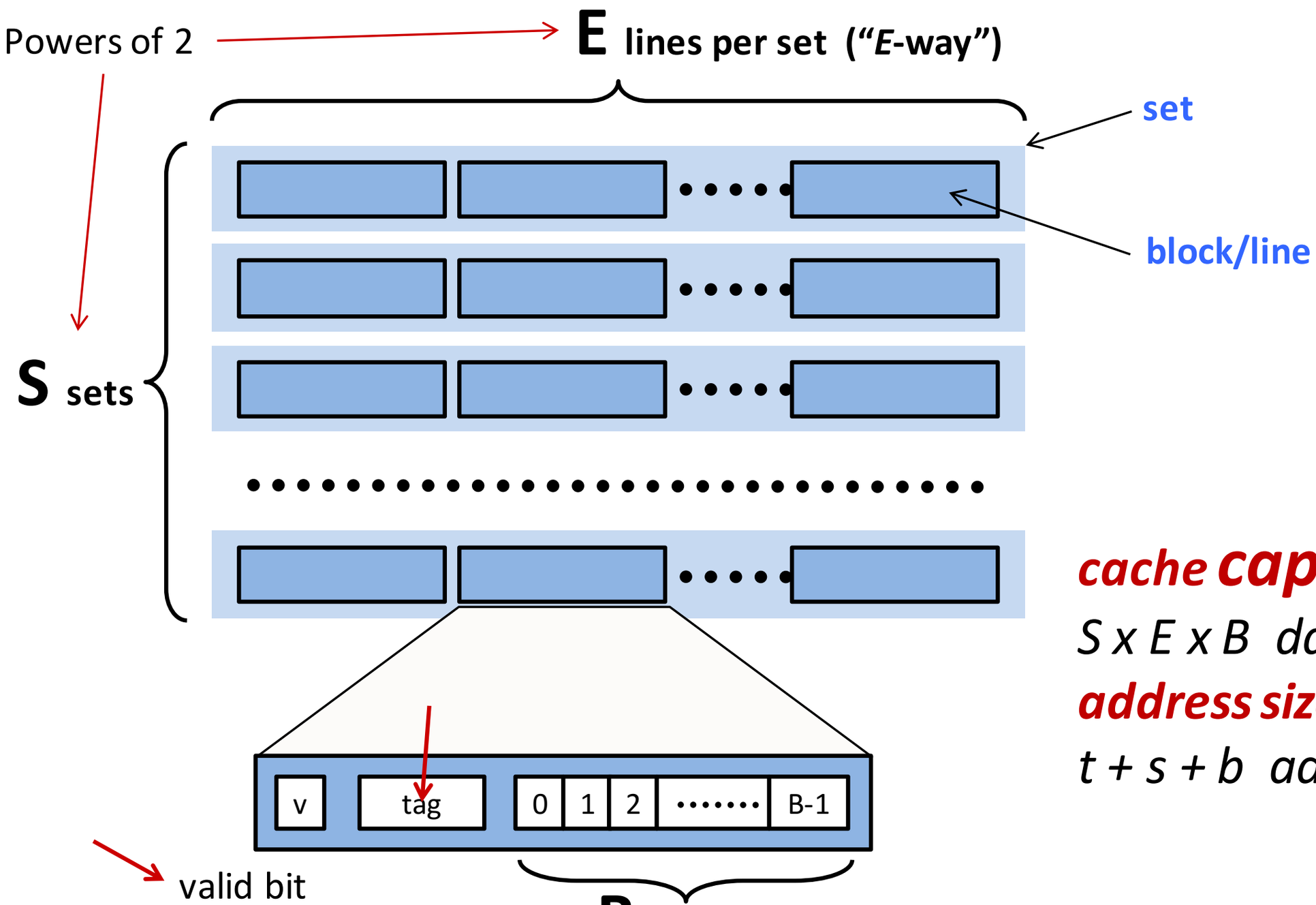
4. Cache fill:
Fetch block from memory, store in cache.

Placement Policy:
where to put block in cache

***Re*placement Policy:**
which block to evict


CPU
Block: unit of data in cache and memory. (a.k.a. line)
Cache
8
9
14
3
Smaller, faster, more expensive. Stores subset of memory blocks. (lines)
Data is moved in block units
Memory
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Larger, slower, cheaper. Partitioned into blocks (lines).

一般化的Cache组织形式



cache capacity:

S x E x B data bytes

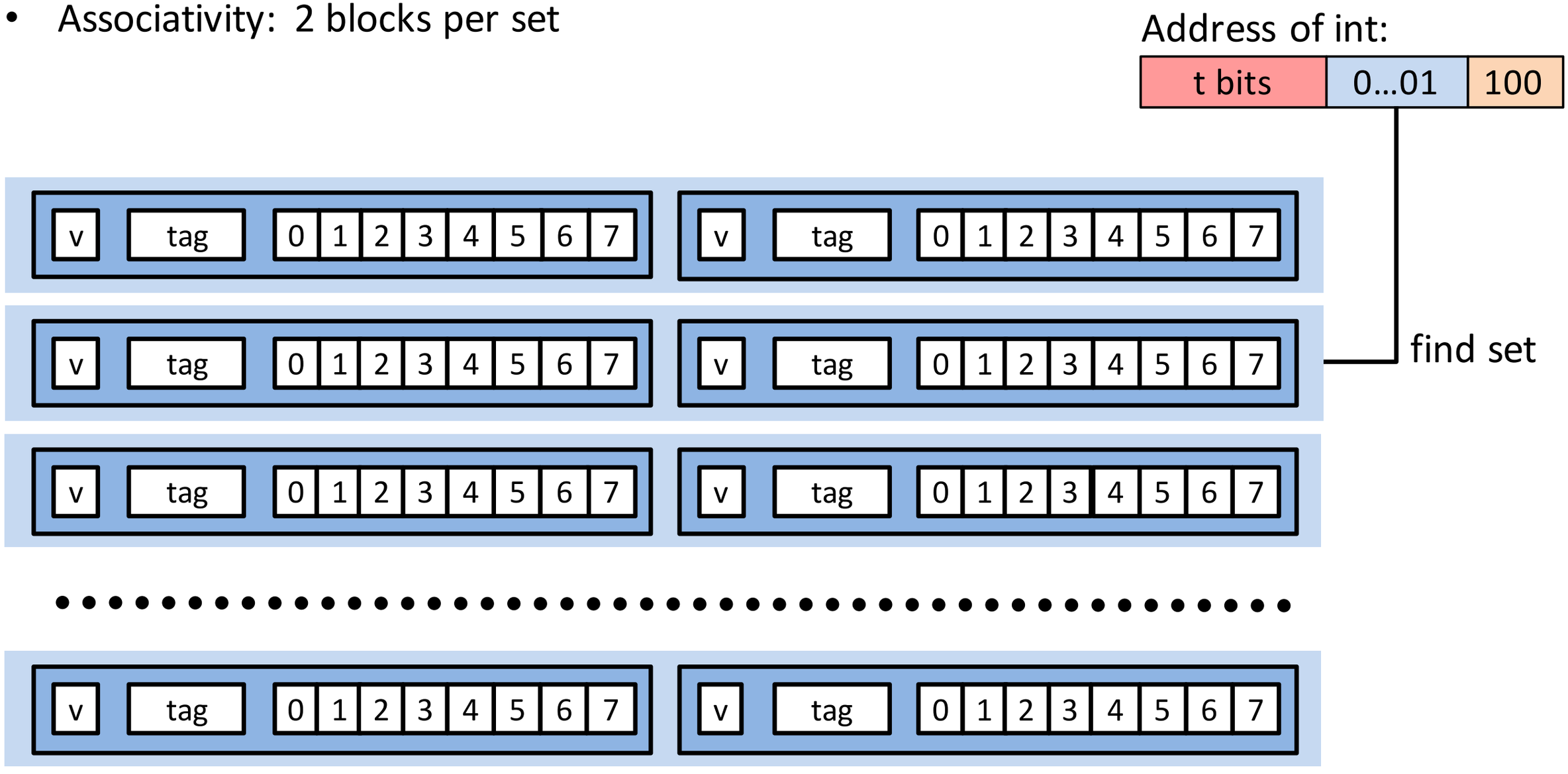
address size:

t + s + b address bits

读Cache：组相联映射

This cache:

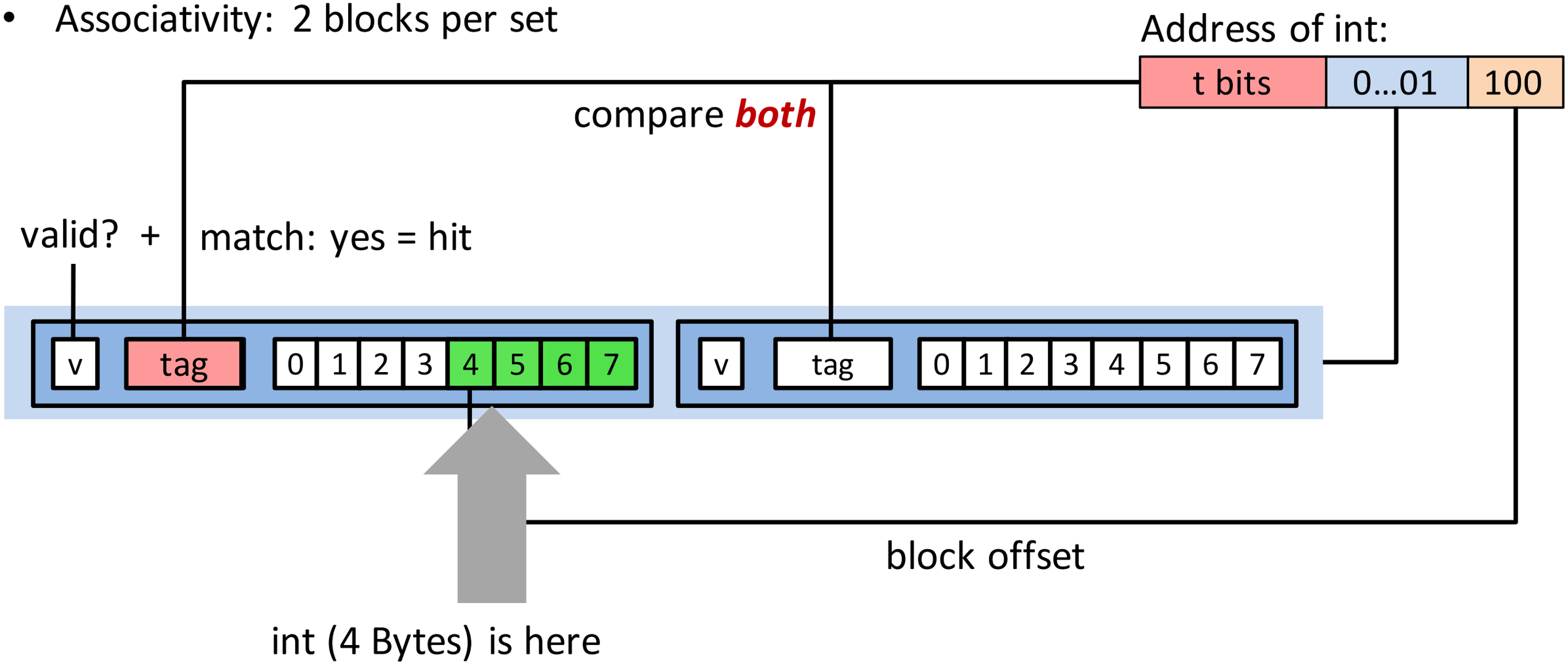
- Block size: 8 bytes
- Associativity: 2 blocks per set



读Cache：组相联映射

This cache:

- Block size: 8 bytes
- Associativity: 2 blocks per set



本讲提纲

- 虚拟存储器
  - 虚拟存储器基本概念
  - 虚拟地址到物理地址的转换
  - 虚拟存储器的页式管理

存储容量需求

- 应用需求
  - 海量数据处理
    - 天气预报、地震预测、石油勘探、搜索...
  - 多媒体信息处理
    - 语音、图形、图象...
- 软件需求
  - Nathan软件第一定律:软件是一种可以膨胀到充满整个容器的气体。
- 技术需求
  - 多进程、多道程序
- 给程序员一个比实际内存大得多的可管理的编址空间

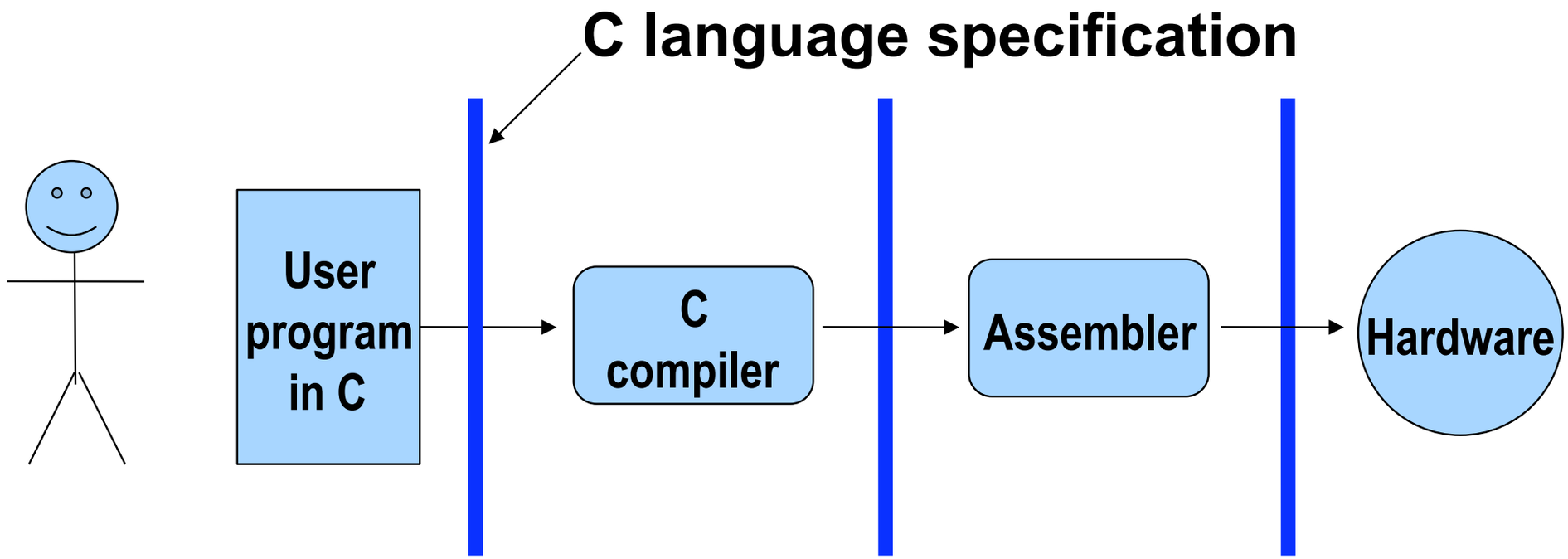
提高存储器容量

- 降低主存储器成本,在同样成本下,可以获得更大的主存容量
  - 主存的价格到今天也依然比较昂贵
  - 程序对主存的“胃口”的增加和主存价格的降低速度几乎同样的快
- 采用虚拟存储器
  - 只在确实需要的时候才把程序和数据装入到主存中

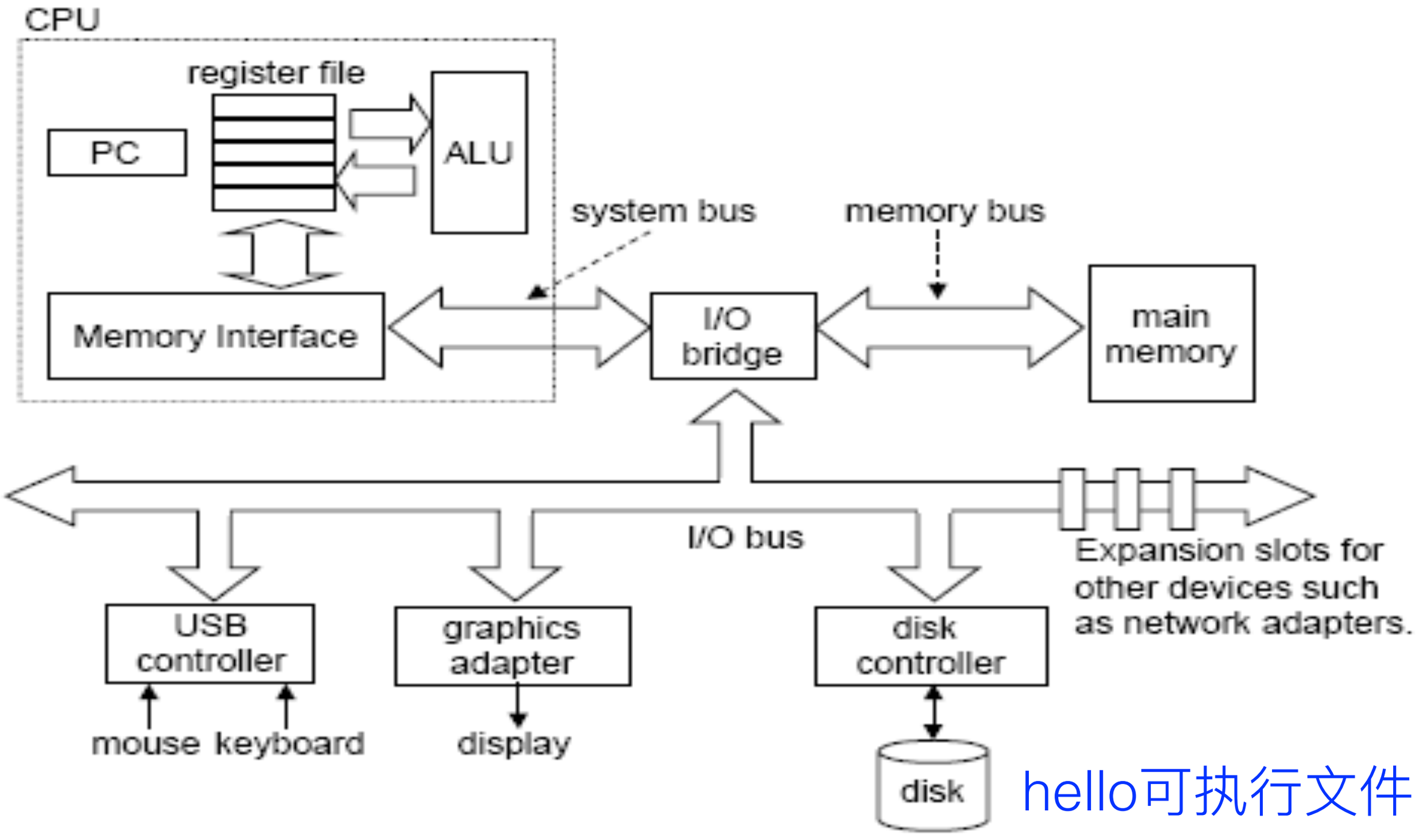
一个典型程序的转换处理过程

- 经典的C-源程序

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main()
4 {
5     printf("hello, world\n");
6 }
```

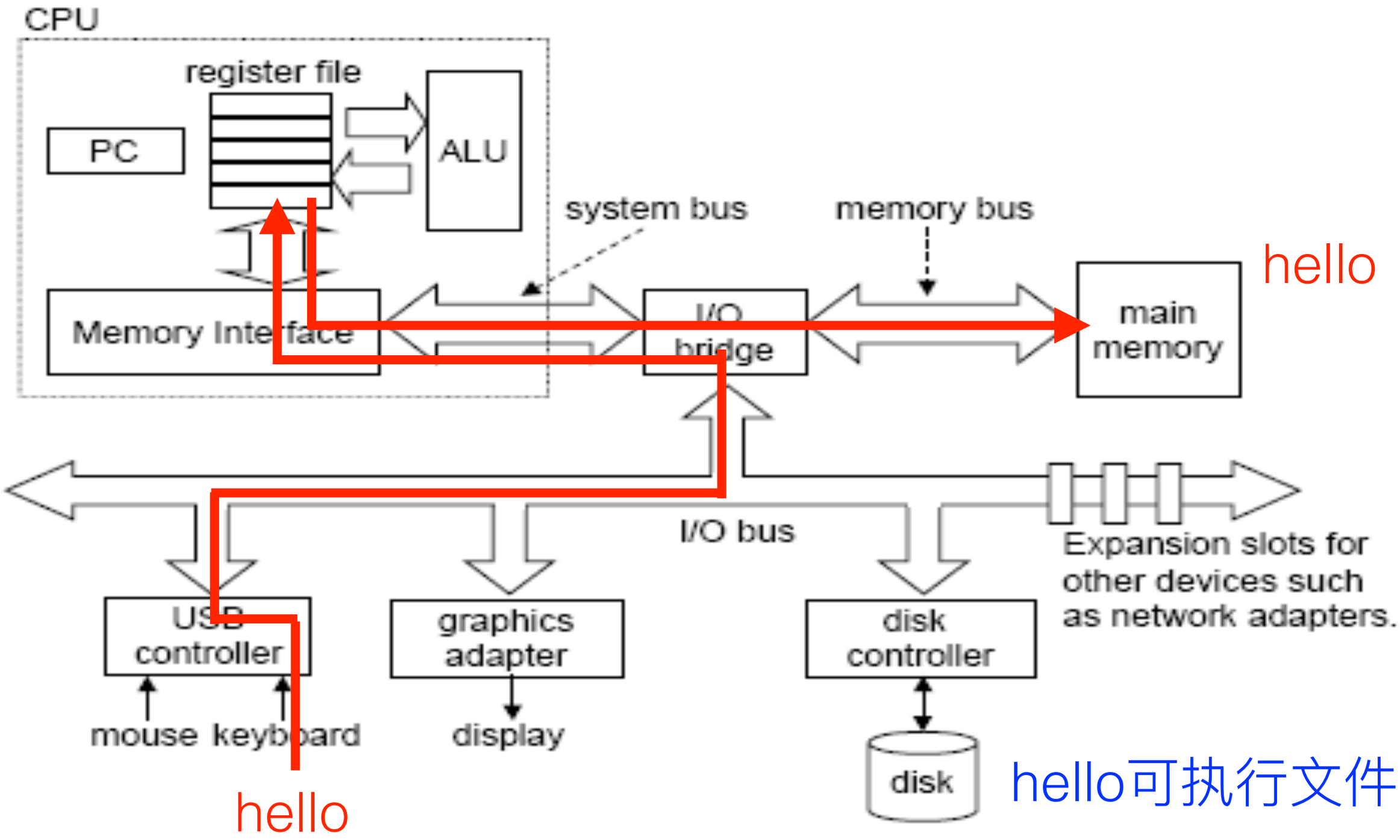


Hello程序的数据流动过程

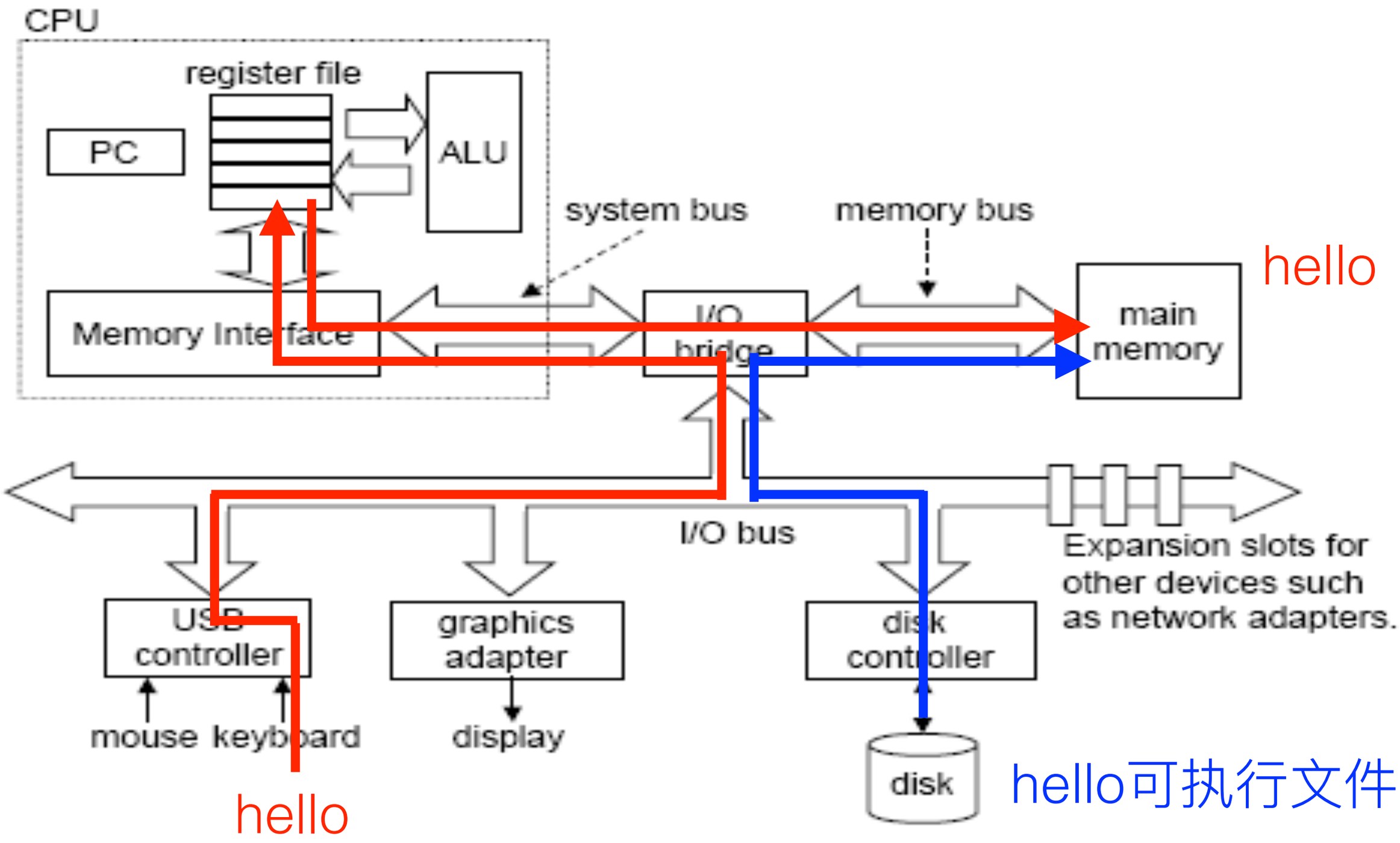


hello可执行文件

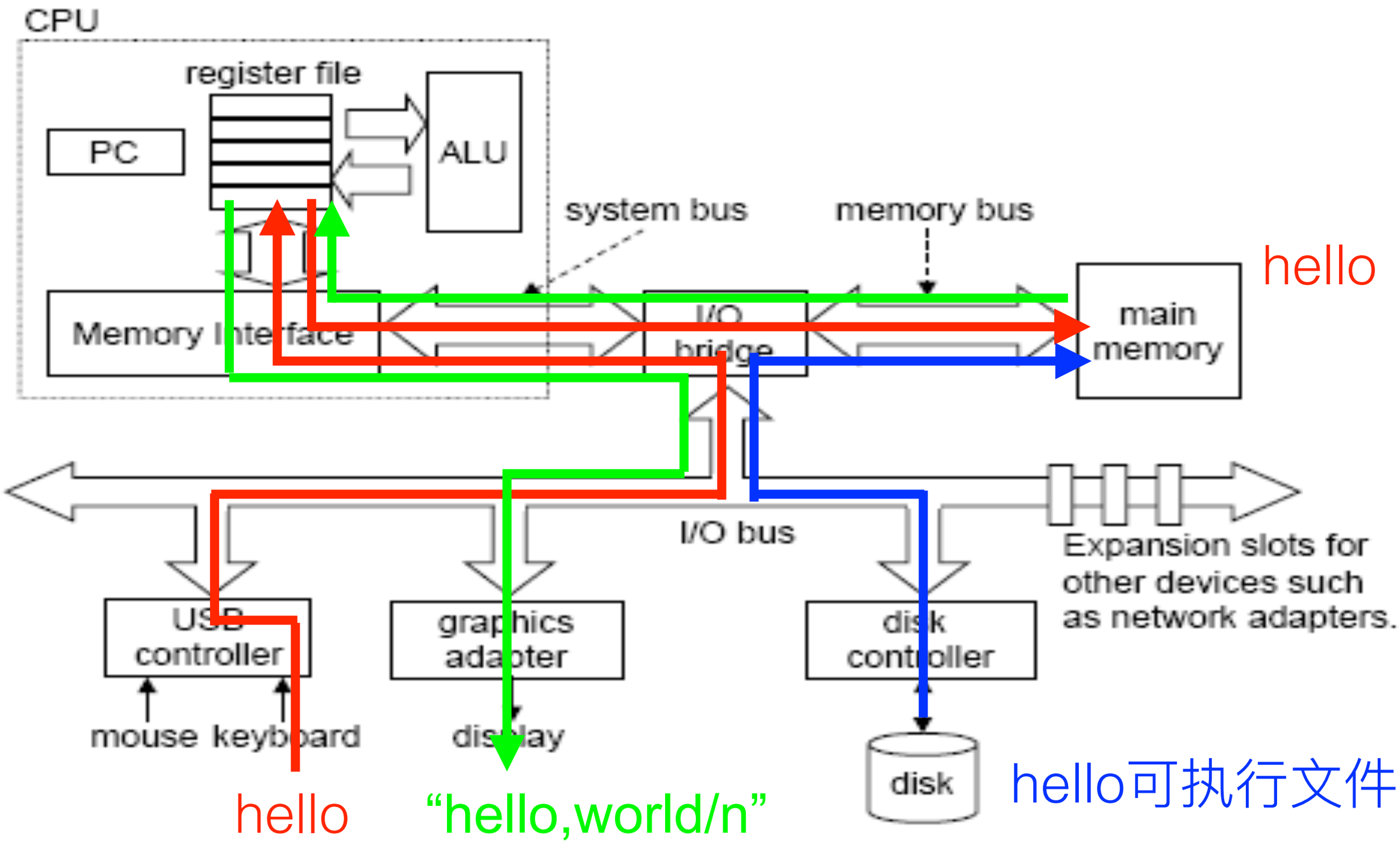
Hello程序的数据流动过程



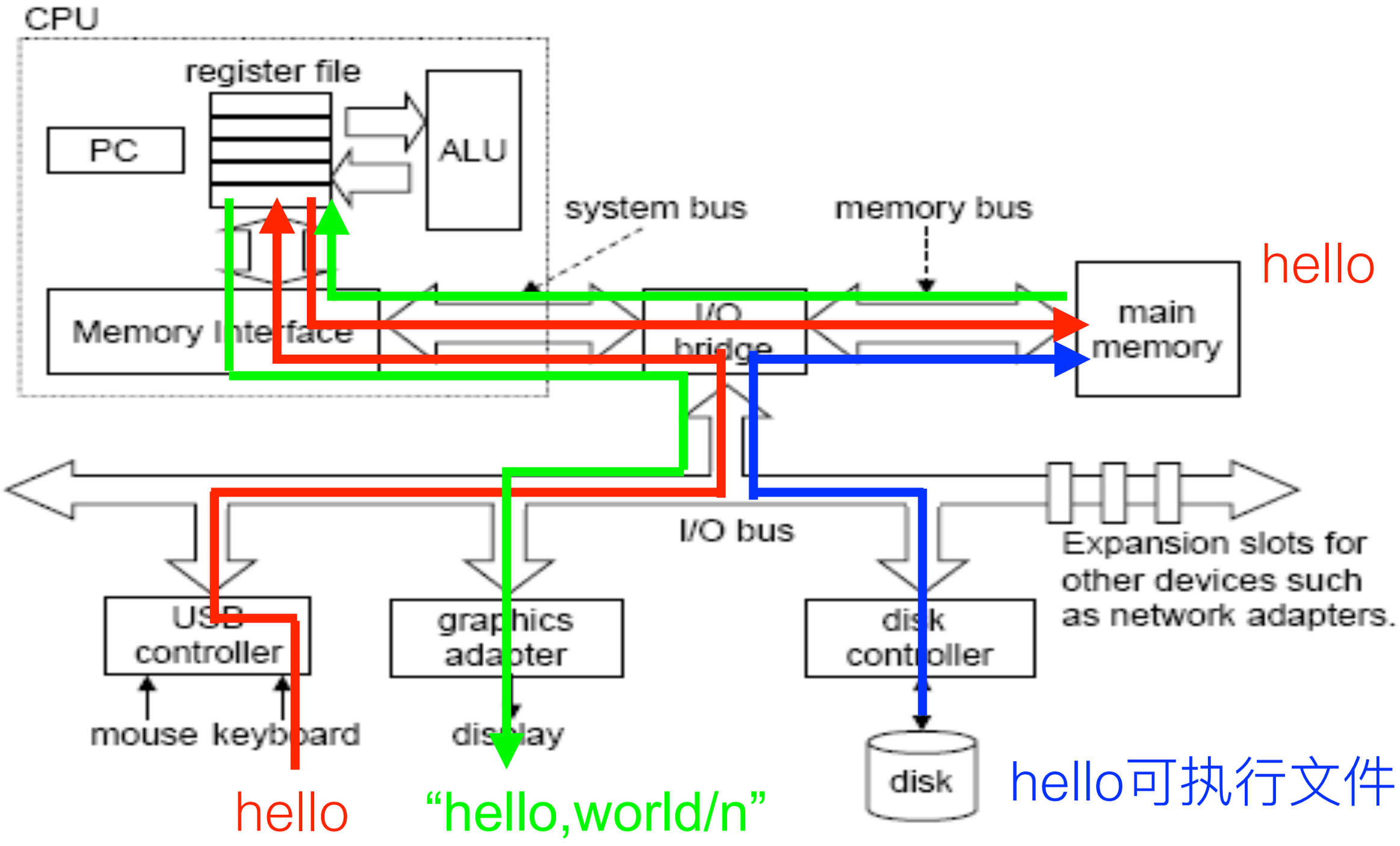
Hello程序的数据流动过程



Hello程序的数据流动过程



问题：hello程序何时被装？谁来装入？被谁启动？每次是否被装到相同的地方？Hello程序是否知道还有其他程序同时运行？是否能直接访问硬件资源？



操作系统在程序执行过程中的作用

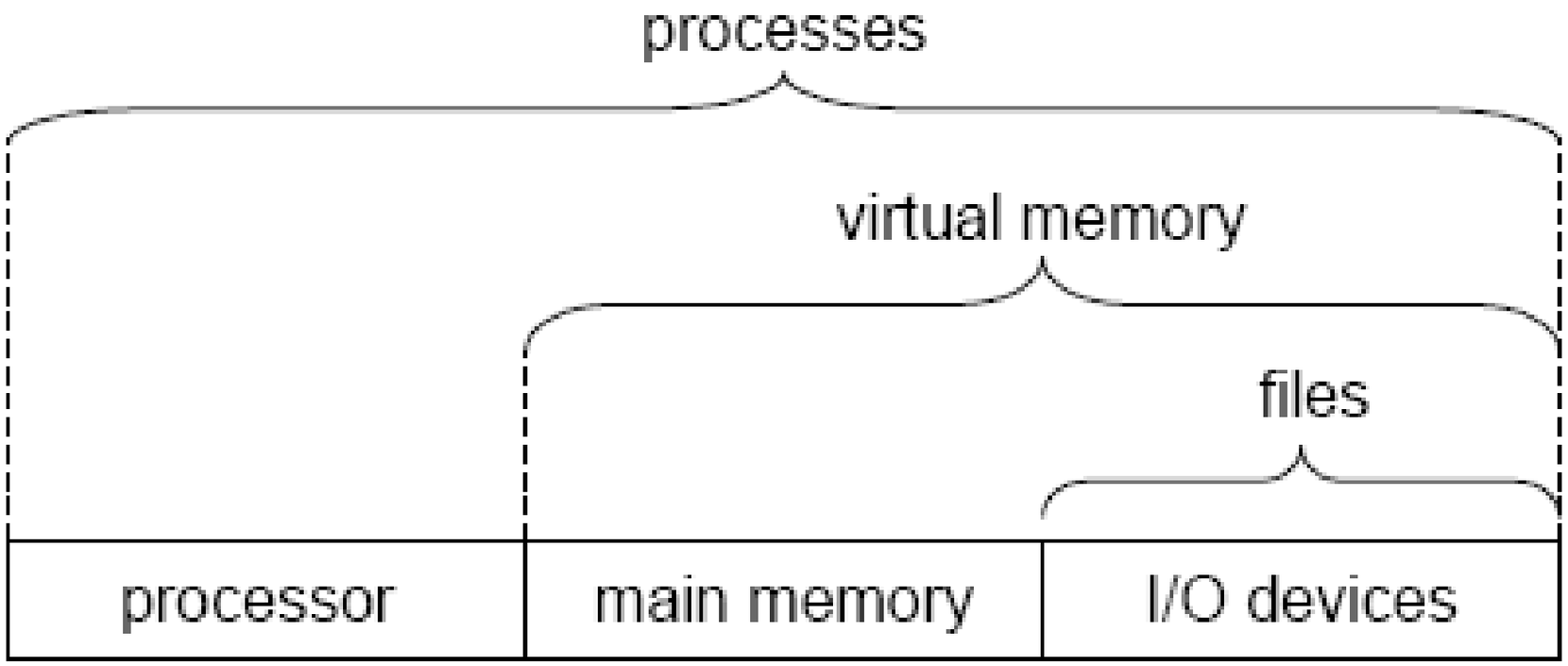
- 在Hello程序执行过程中，Hello程序本身没有直接访问键盘、显示器、磁盘和主存储器这些硬件资源，而是依靠操作系统提供的服务来间接访问。
- 操作系统是在应用程序和硬件之间插入的一个中间软件层。
- 操作系统的两个主要的作用：
  - 硬件资源管理，以达到以下两个目的：
    - 统筹安排和调度硬件资源，以防止硬件资源被用户程序滥用
    - 对于广泛使用的复杂低级设备，为用户程序提供一个简单一致的使用接口
  - 为用户使用系统提供一个操作接口

存储器管理

- 早期采用单道程序，系统的主存中包含：
  - 操作系统（常驻监控程序）
  - 正在执行的一个用户程序
  - 所以无需进行存储管理，即使有也很简单。
- 现在都采用多道程序，系统的存储器中包含：
  - 操作系统
  - 若干个用户程序
  - 如果在存储器中进程数很少，则由于进程花费很多时间来等待I/O，常使处理机处于空闲状态。因此，存储器需要进行合理分配，尽可能让更多进程进入存储器。
- 在多道程序系统中，存储器的“用户”部分须进一步划分以适应多个进程。划分的任务由OS动态执行，这被称为存储器管理(memory management)。

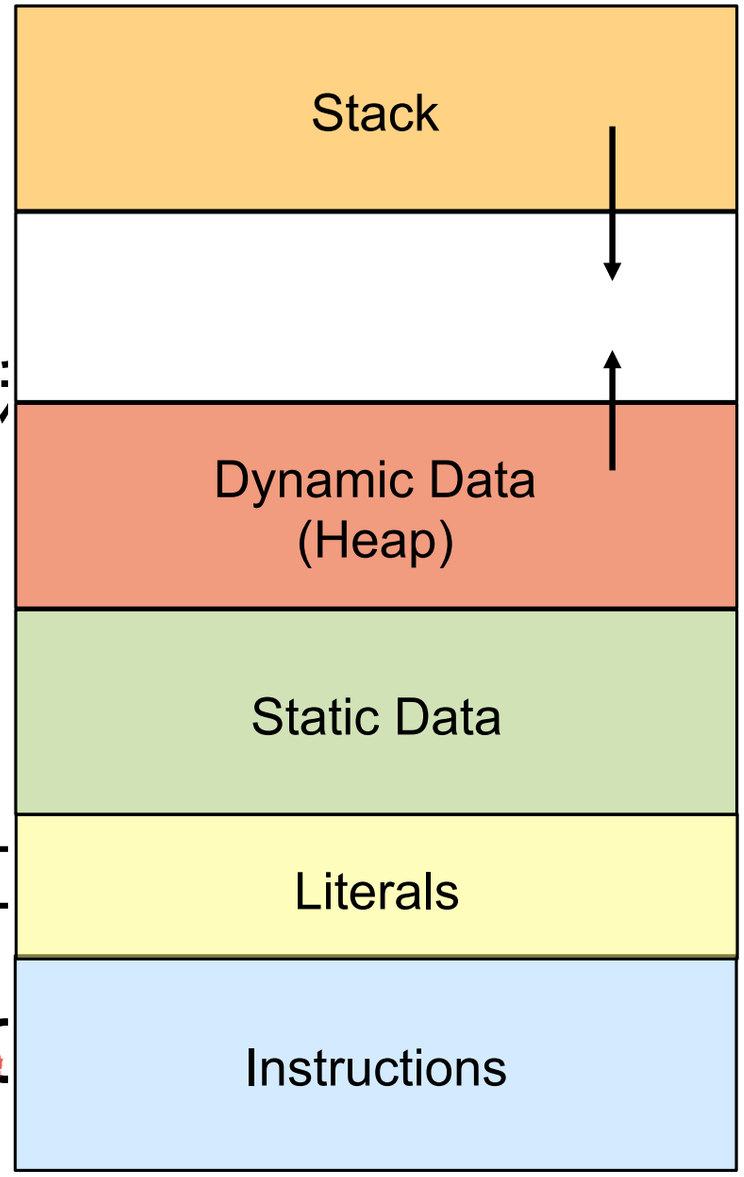
进程

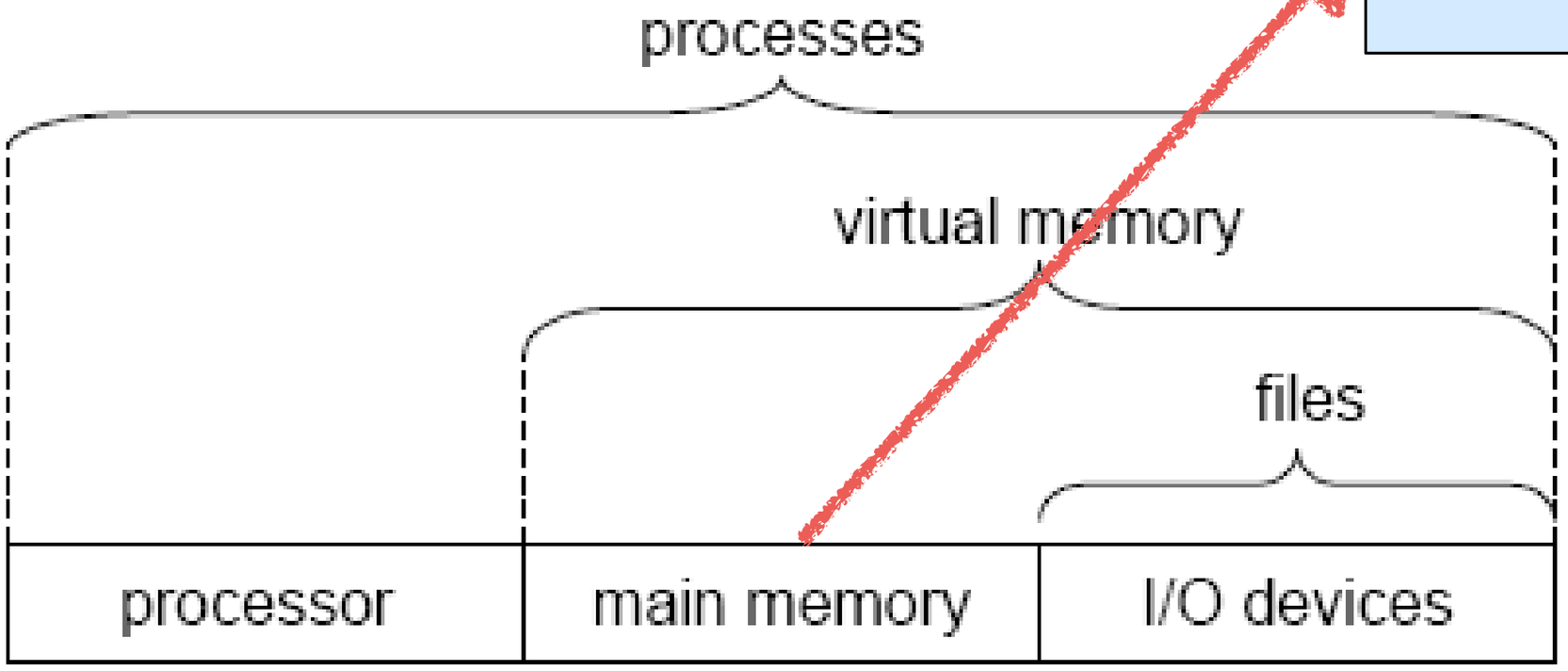
- 操作系统通过三个基本的抽象概念（进程、虚拟存储器、文件）实现硬件资源管理
  - 文件（files）是对I/O设备的抽象
  - 虚拟存储器（Virtual Memory）是对主存和磁盘I/O的抽象
  - 进程（processes）是对处理器、主存和I/O设备的抽象



进程

- 操作系统通过三个基本的抽象概念（进
器、文件）实现硬件资源管理
  - 文件（files）是对I/O设备的抽象
  - 虚拟存储器（Virtual Memory）是对主存和
  - 进程（processes）是对处理器、主存和I/





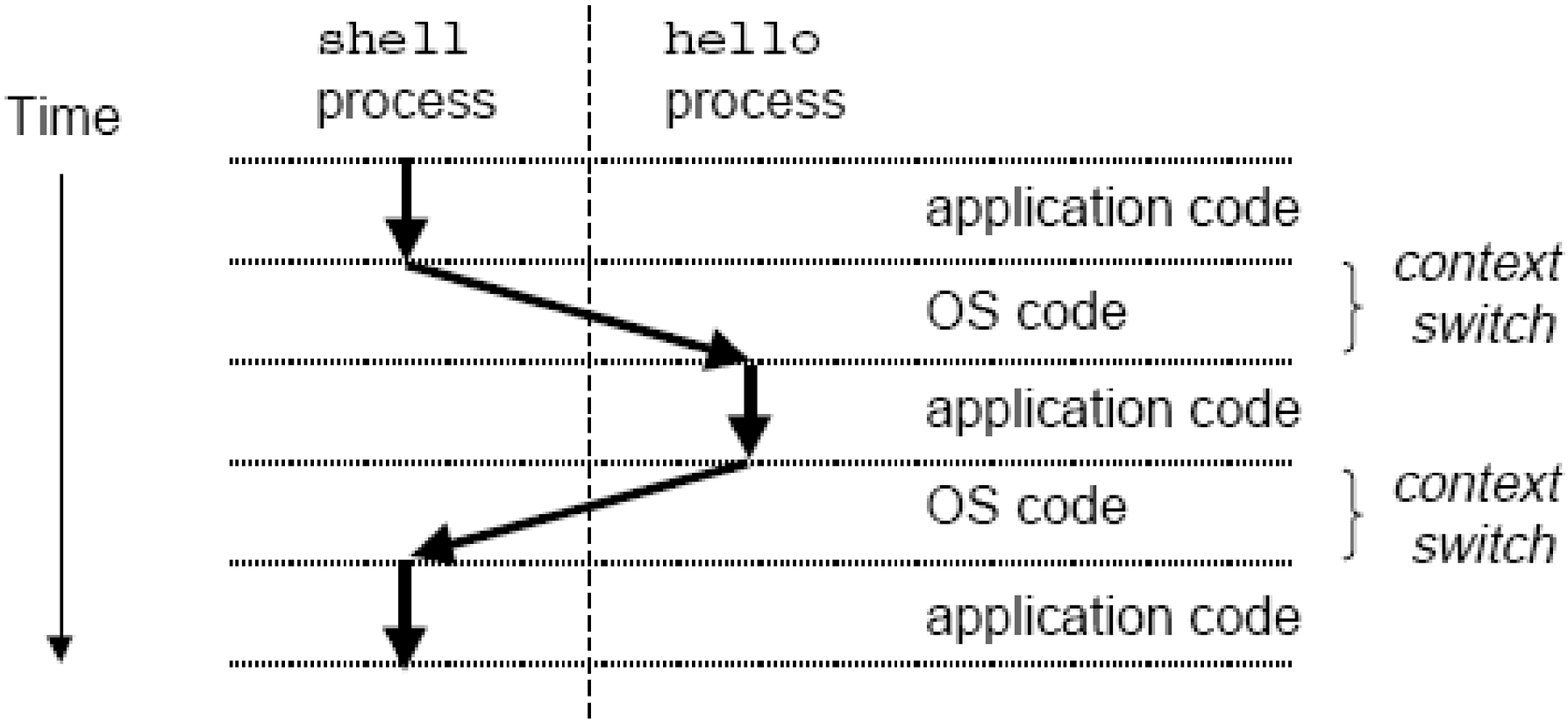
进程

- Hello程序运行时，Hello程序会以为（错觉）：
  - 所有系统资源都被自己独占使用
  - 处理器始终在执行本程序的一条条指令
- 进程是操作系统对运行程序的一种抽象
  - 一个系统可同时运行很多进程，但每个进程都好像自己独占使用系统
  - 实际上，操作系统让处理器交替执行很多进程中的指令
  - 操作系统实现交替指令执行的机制称为“上下文切换（context switching）”

进程

- 进程的上下文
  - 指进程运行所需的所有状态信息，例如：PC、寄存器堆的当前值、cache内容、段/页表等
  - 系统中有一套状态单元，用以存放当前运行进程的上下文
- 上下文切换过程（任何时刻，系统中只有一个进程正在运行）
  - 上下文切换指把正在运行的进程换下，换一个新进程到处理器执行，上下文切换时，必须保存换下进程的上下文，恢复换上进程的上下文

进程



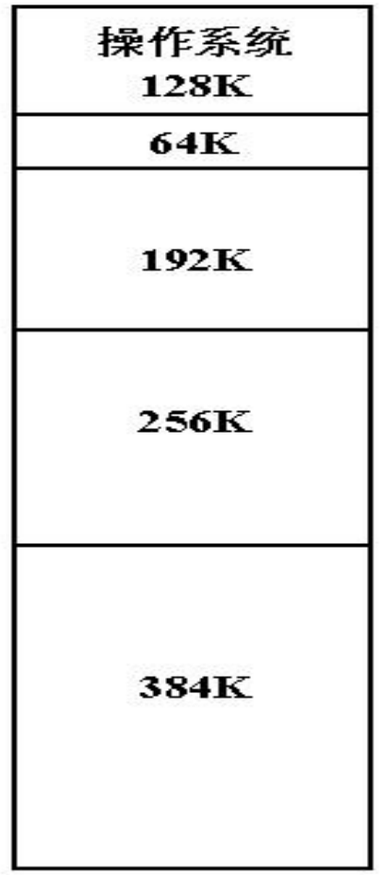
- 开始，Shell进程等待命令行输入
- 输入“Hello”后Shell进行系统调用
- OS保存shell上下文，创建并换入hello进程
- Hello进程中止时，进行系统调用
- OS恢复shell进程上下文，并换入shell进程

使系统中尽量多地存储用户程序的解决办法

- (1) 扩大主存(程序越来越长、主存贵，不是根本办法)
- (2) 采用交换(Exchange)方式和覆盖(Overlap)技术
  - 存储器中无处于就绪状态的进程（例如：某一时刻所有进程都在等待I/O）时，处理器将一些进程调出写回到磁盘，然后OS再调入其他进程执行，或新的作业直接覆盖老作业的存储区。
  - 分区(Partitioning)和分页(Paging)是交换的两种实现方式
  - “交换”和“覆盖”技术的缺点：对程序员不透明、空间利用率差

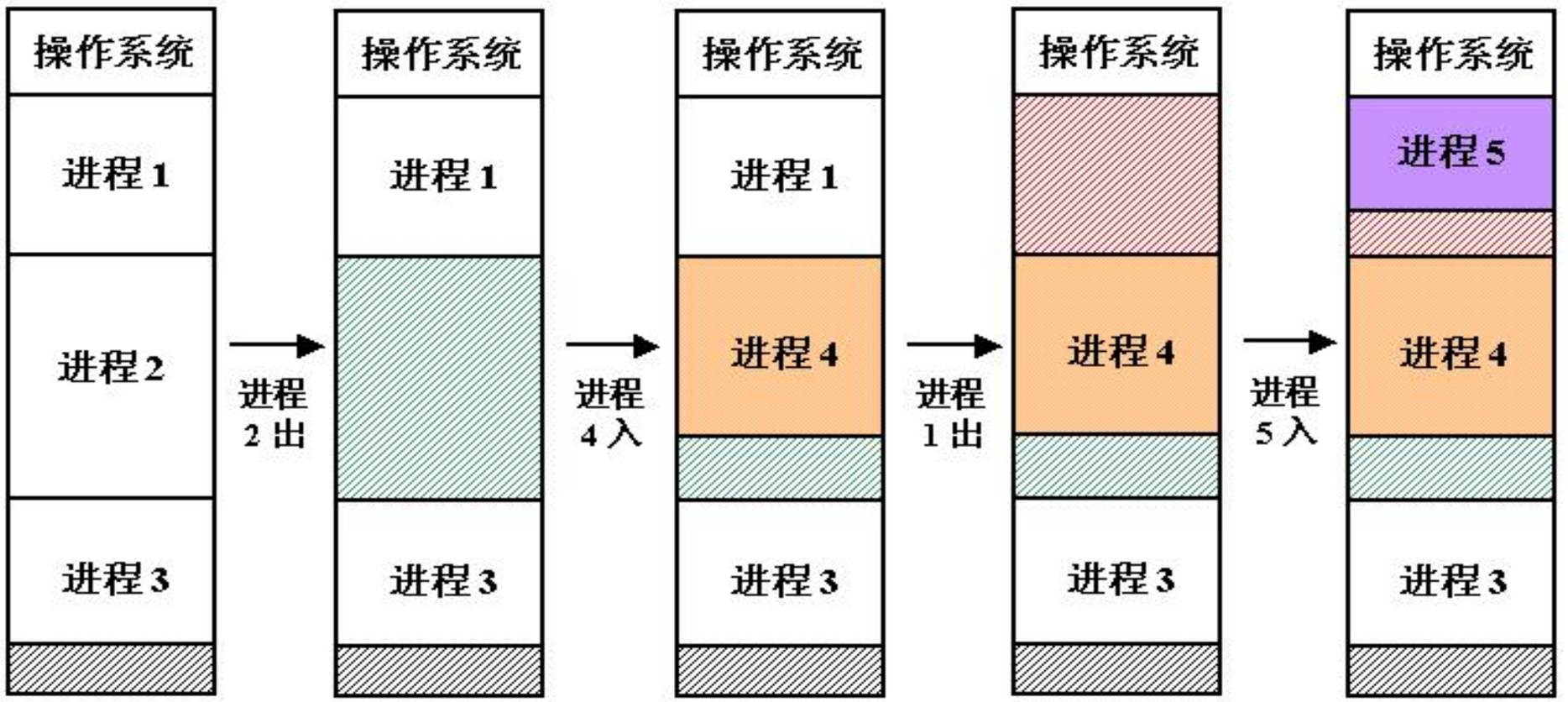
分区

- 简单分区
  - 主存分配：操作系统（固定）+用户区（分区）
  - 使用长度不等的固定长分区(fixed-size partition)。
  - 当一个进程调入主存时，分配给它一个能容纳它的最小的分区。
- 简单分区方式的缺点：
  - 因为是固定长度的分区，故可能会浪费主存空间。多数情况下，进程对分区大小的需求不可能和提供的分区大小一样。



分区

- 可变长分区
  - 分配的分区大小与进程所需大小一样。
  - 特点：开始较好，但到最后在存储器中会有许多小空块出现。时间越长，存储器中的碎片就会越来越多，因而存储器的利用率下降。



分页

- 基本思想：
  - 内存被分成固定长且比较小的存储块（页框、实页、物理页）
  - 每个进程也被划分成固定长的程序块（页、虚页、逻辑页）
  - 程序块可装到存储器中可用的存储块中
  - 无需用连续页框来存放一个进程
  - 操作系统为每个进程生成一个页表
  - 通过页表(page table)实现逻辑地址向物理地址转换（Address Mapping ）
- 逻辑地址（Logical Address）：
  - 程序中的指令所用的地址，也称为虚拟地址
- 物理地址（physical或Memory Address）：
  - 存放指令或数据的实际内存地址，也称为实地址、主存地址

使系统中尽量多地存储用户程序的解决办法

- (1) 扩大主存(程序越来越长、主存贵，不是根本办法)
- (2) 采用交换(Exchange)方式和覆盖(Overlap)技术
  - 存储器中无处于就绪状态的进程（例如：某一时刻所有进程都在等待I/O）时，处理器将一些进程调出写回到磁盘，然后OS再调入其他进程执行，或新的作业直接覆盖老作业的存储区。
  - 分区(Partitioning)和分页(Paging)是交换的两种实现方式
  - “交换”和“覆盖”技术的缺点：对程序员不透明、空间利用率差
- (3) 虚拟存储器(Virtual Memory)
  - 类似上述分页方式，但不是把所有页面一起调到主存，而是采用“按需调页Demand Paging”，在外存和主存间以固定页面进行调度。
  - 虚拟存储器方式下，引入了虚拟地址空间的概念。

虚拟存储器

- 提供一种容量非常大的存储器
  - 多个任务所需存储器的总和大于实际存储器空间
  - 单个程序的地址空间超过了实际存储器
- 使得珍贵的物理存储器得到更好地利用
- 简化对存储的管理

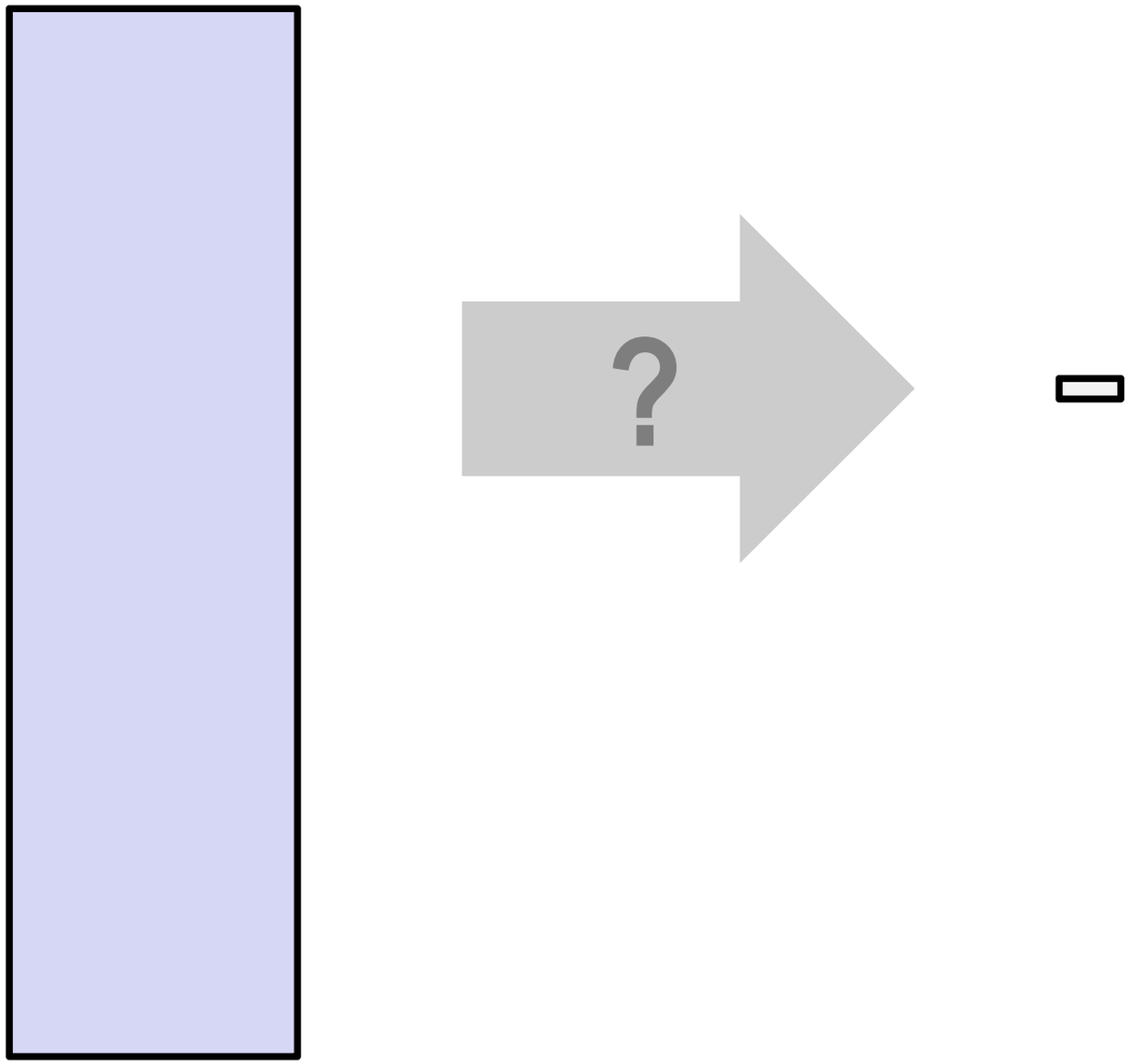
虚拟存储器基本概念

- 虚拟存储技术的实质
  - 程序员在比实际主存空间大得多的逻辑地址空间中编写程序
  - 程序执行时，把当前需要的程序段和相应的数据块调入主存，其他暂不用的部分存放在磁盘上
  - 指令执行时，通过硬件将逻辑地址（也称虚拟地址或虚地址）转化为物理地址（也称主存地址或实地址）
  - 在发生程序或数据访问失效时，由操作系统进行主存和磁盘之间的信息交换
- 虚拟存储器机制由硬件与操作系统共同协作实现，涉及到操作系统中的许多概念，如进程、进程的上下文切换、存储器分配、虚拟地址空间、缺页处理等。

如何将所需的数据都装入主存

64-bit addresses:
16 Exabyte

Physical main memory:
Few Gigabytes

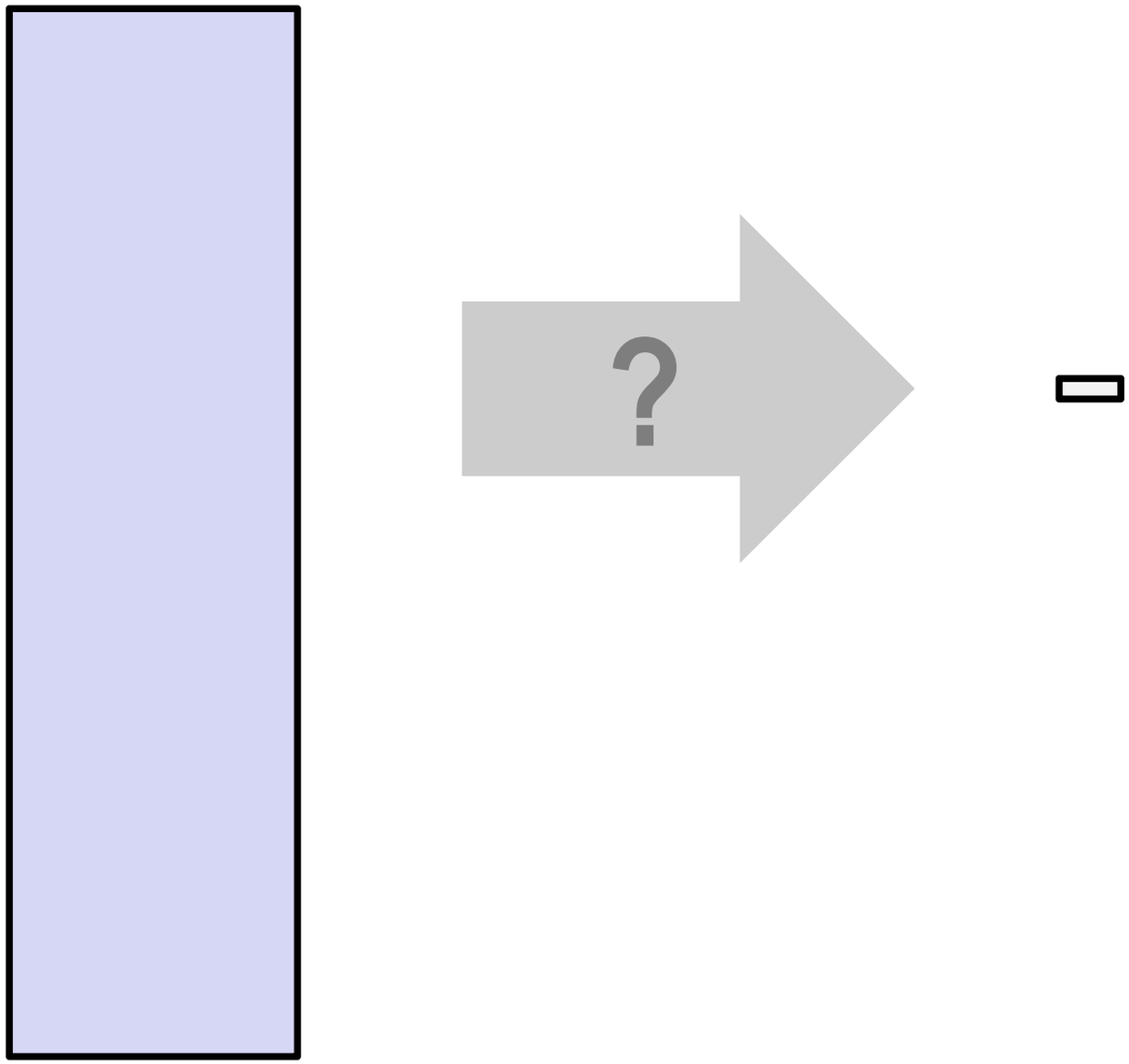


And there are many processes ….

如何将所需的数据都装入主存

64-bit addresses:
16 Exabyte

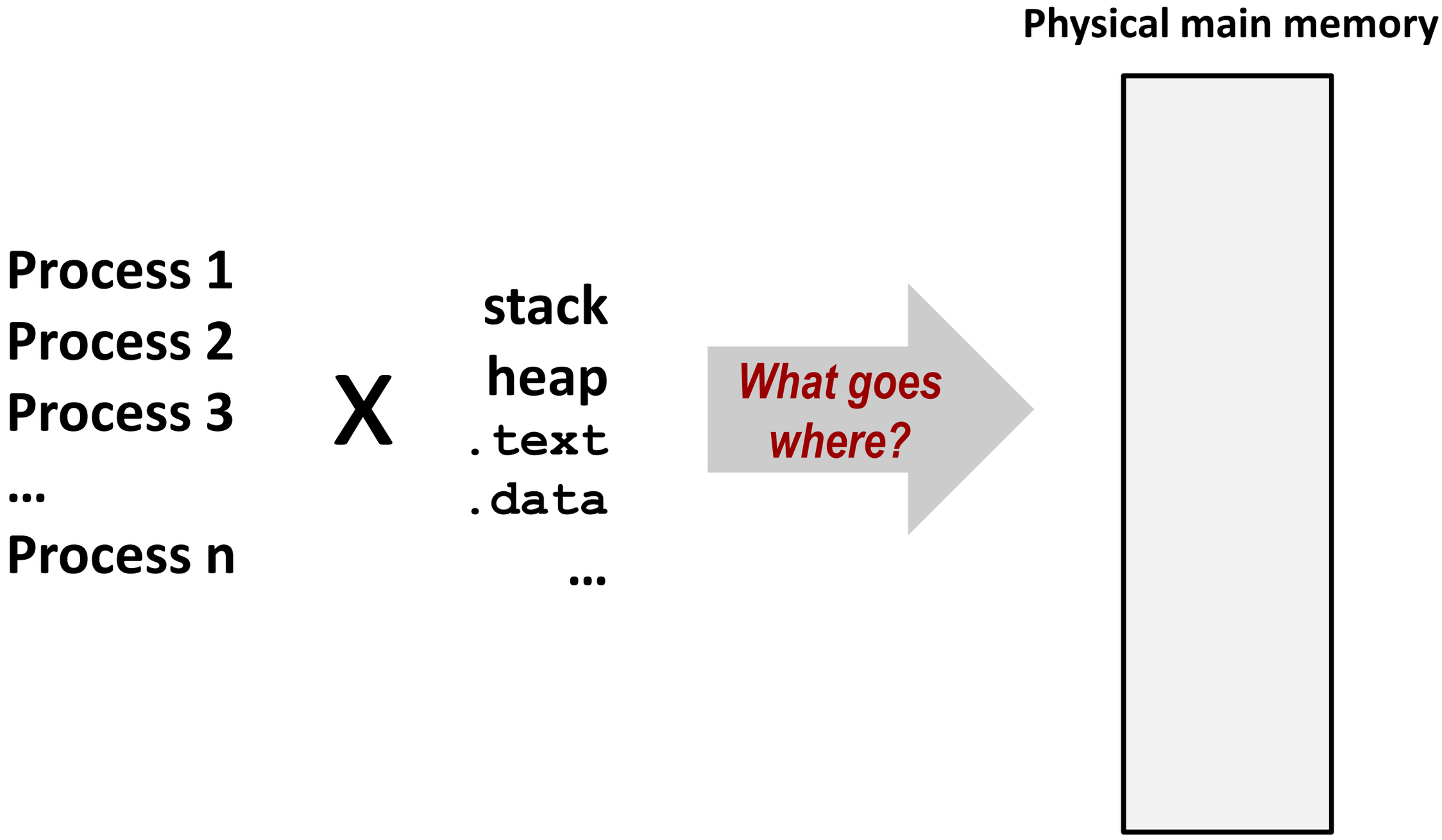
Physical main memory:
Few Gigabytes



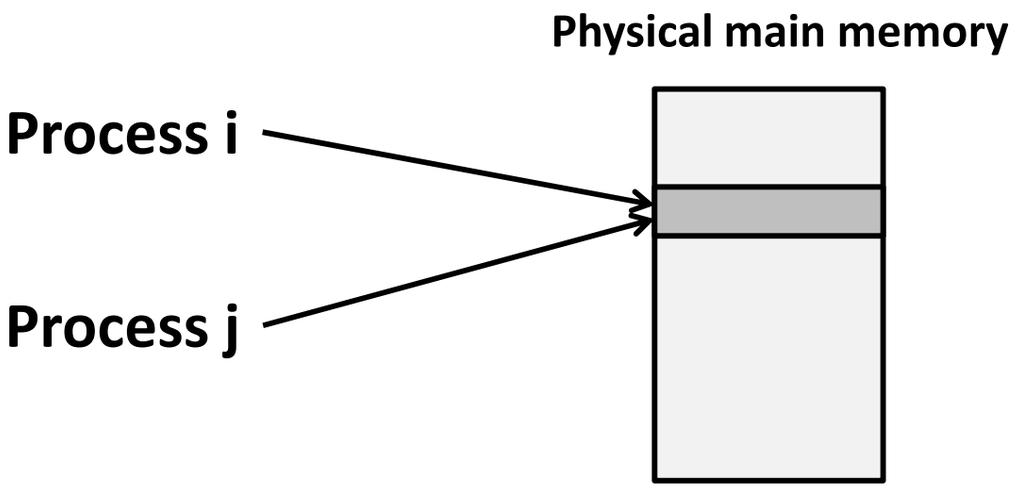
二进制前缀 (IEC 60027-2)		
名字	缩写	次方
kibibyte	KiB	2^{10}
mebibyte	MiB	2^{20}
gibibyte	GiB	2^{30}
tebibyte	TiB	2^{40}
pebibyte	PiB	2^{50}
exbibyte	EiB	2^{60}
zebibyte	ZiB	2^{70}
yobibyte	YiB	2^{80}

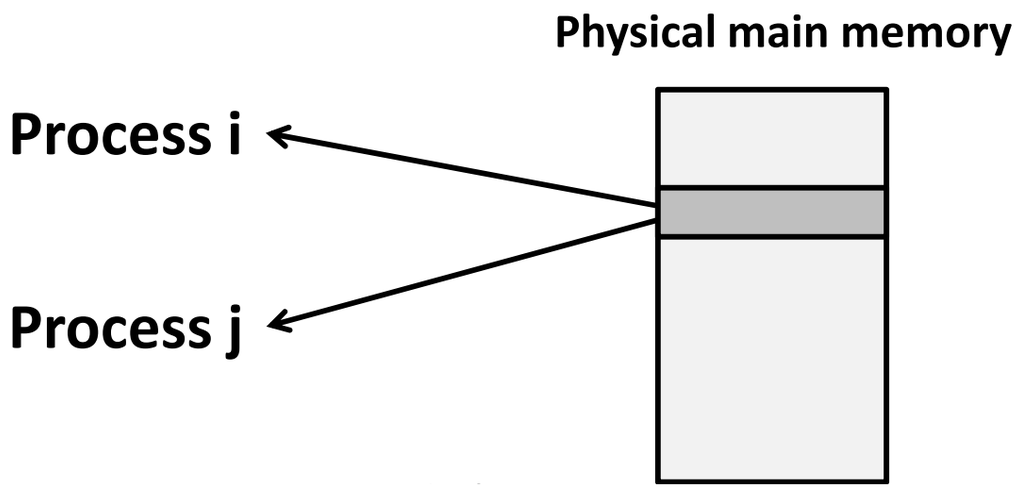
And there are many processes ….

如何有效地管理存储资源

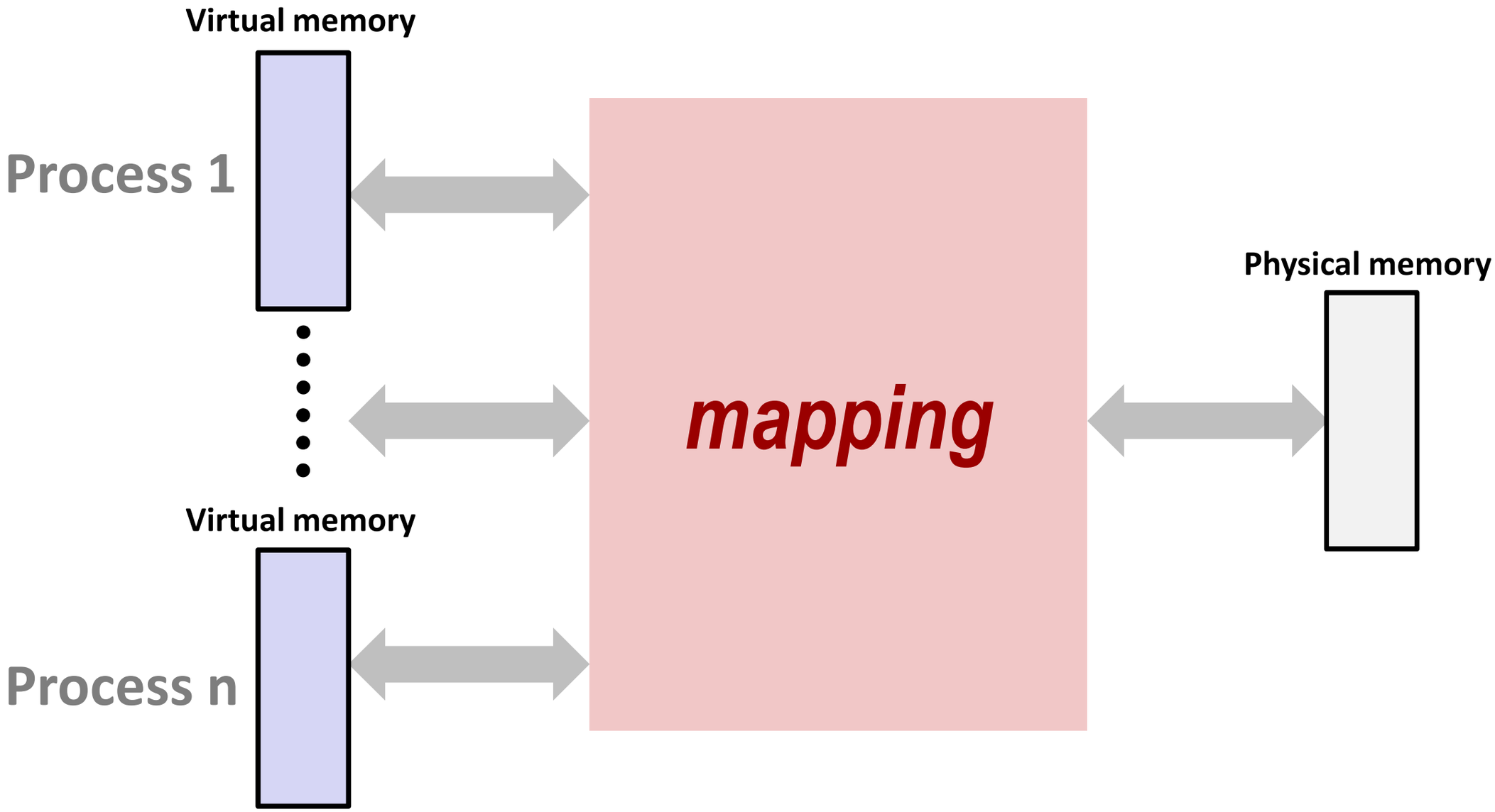


如何内存共享和保护?


Physical main memory
Process i
Process j

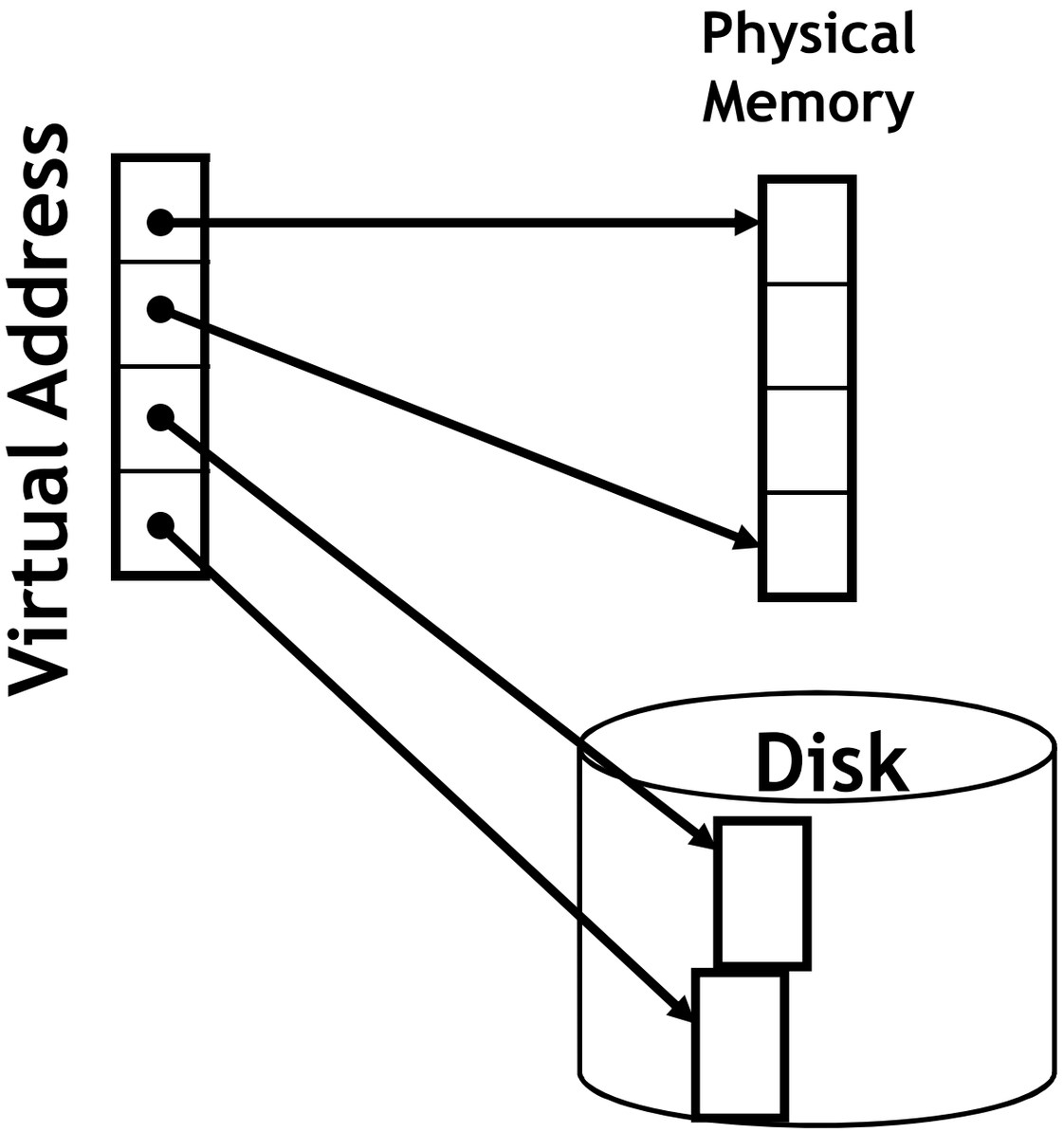

Physical main memory
Process i
Process j

虚拟存储器



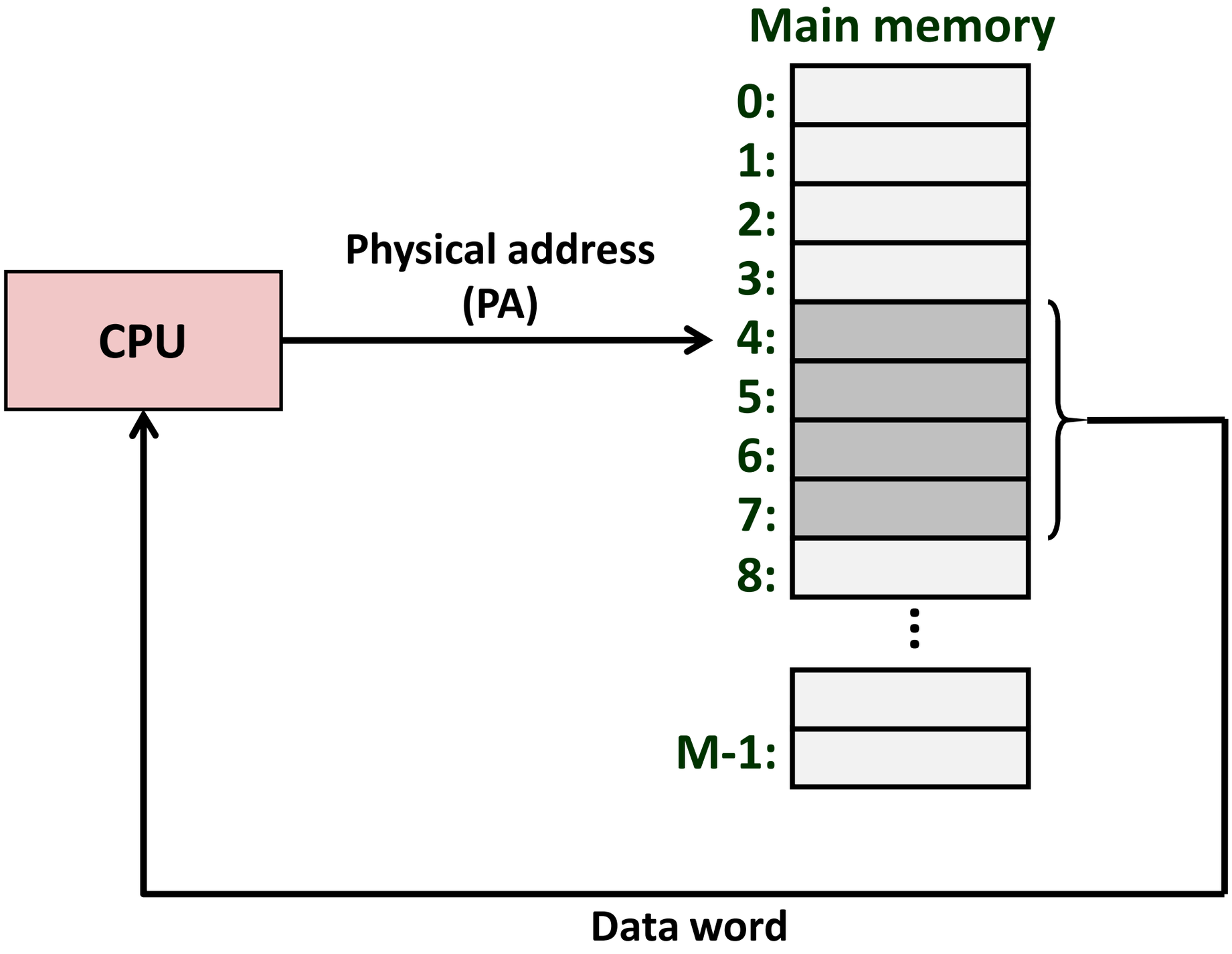
每个进程拥有自己的虚拟地址空间

地址映射



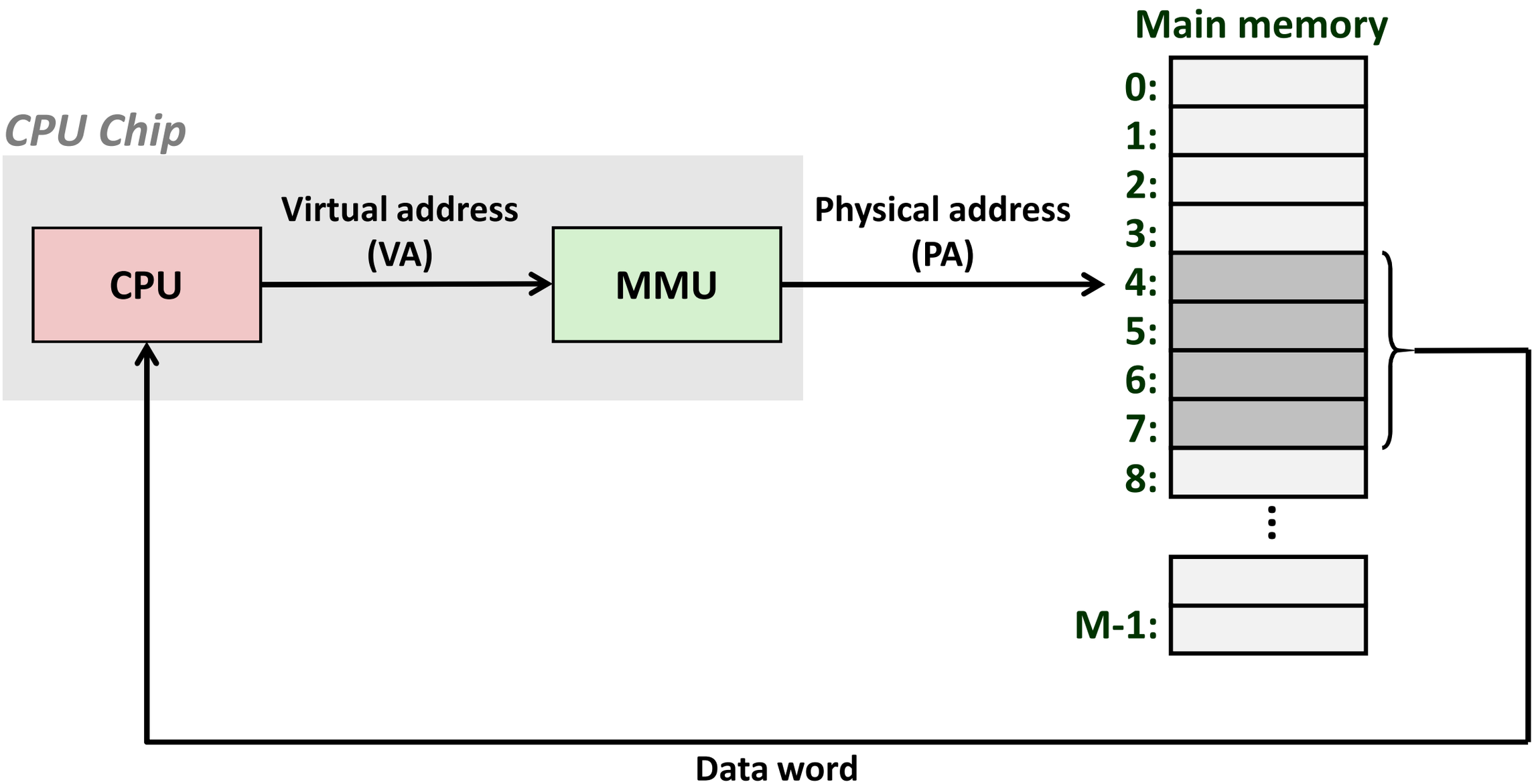
A virtual address can be mapped to either physical memory or disk.

使用物理地址的计算机系统



嵌入式系统：汽车、电梯、电子相框等

使用虚拟存储器的计算机系统

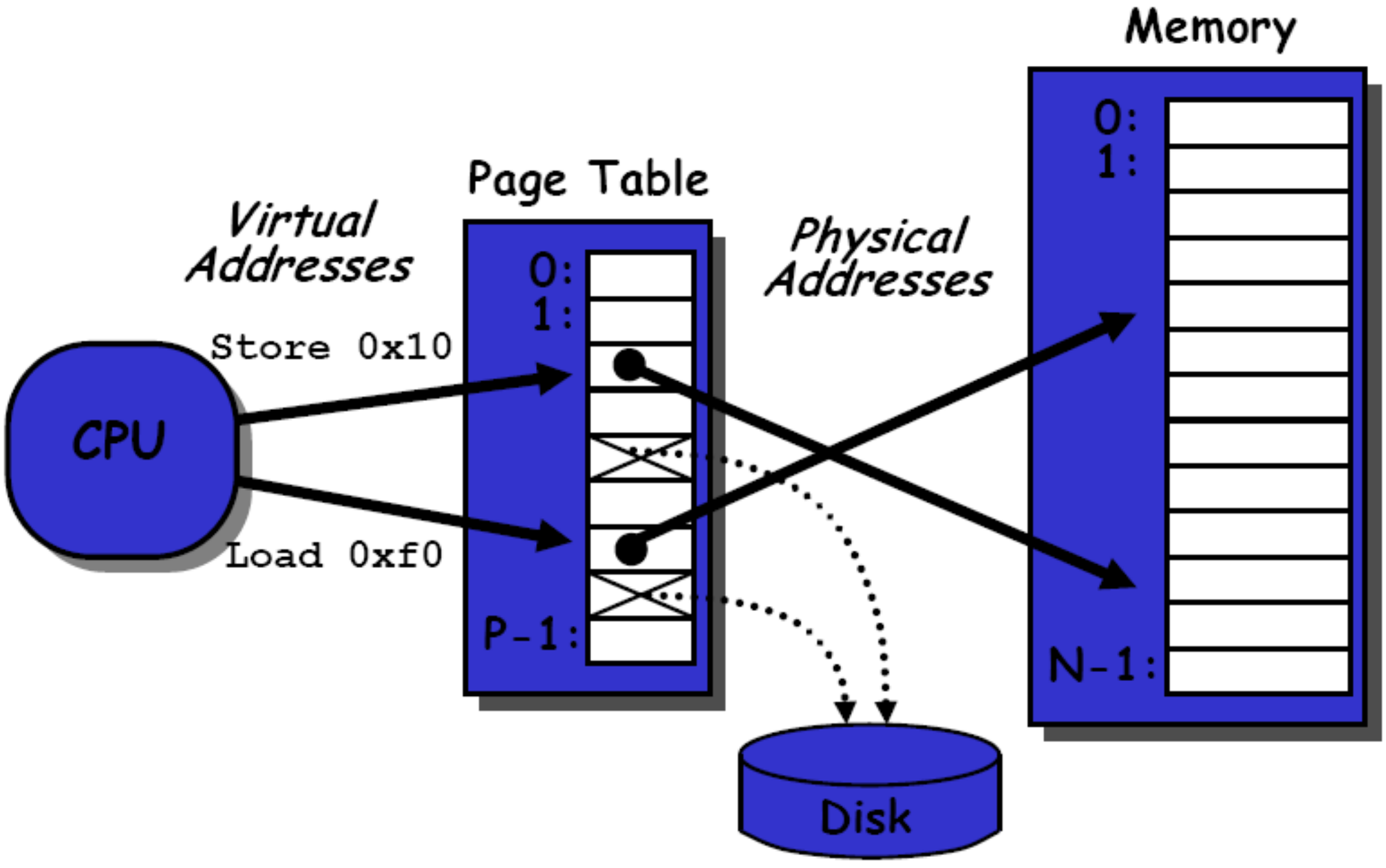


所有现代计算机，包括个人电脑、工作站等
计算机科学中的一个重要创新

虚拟存储器的作用

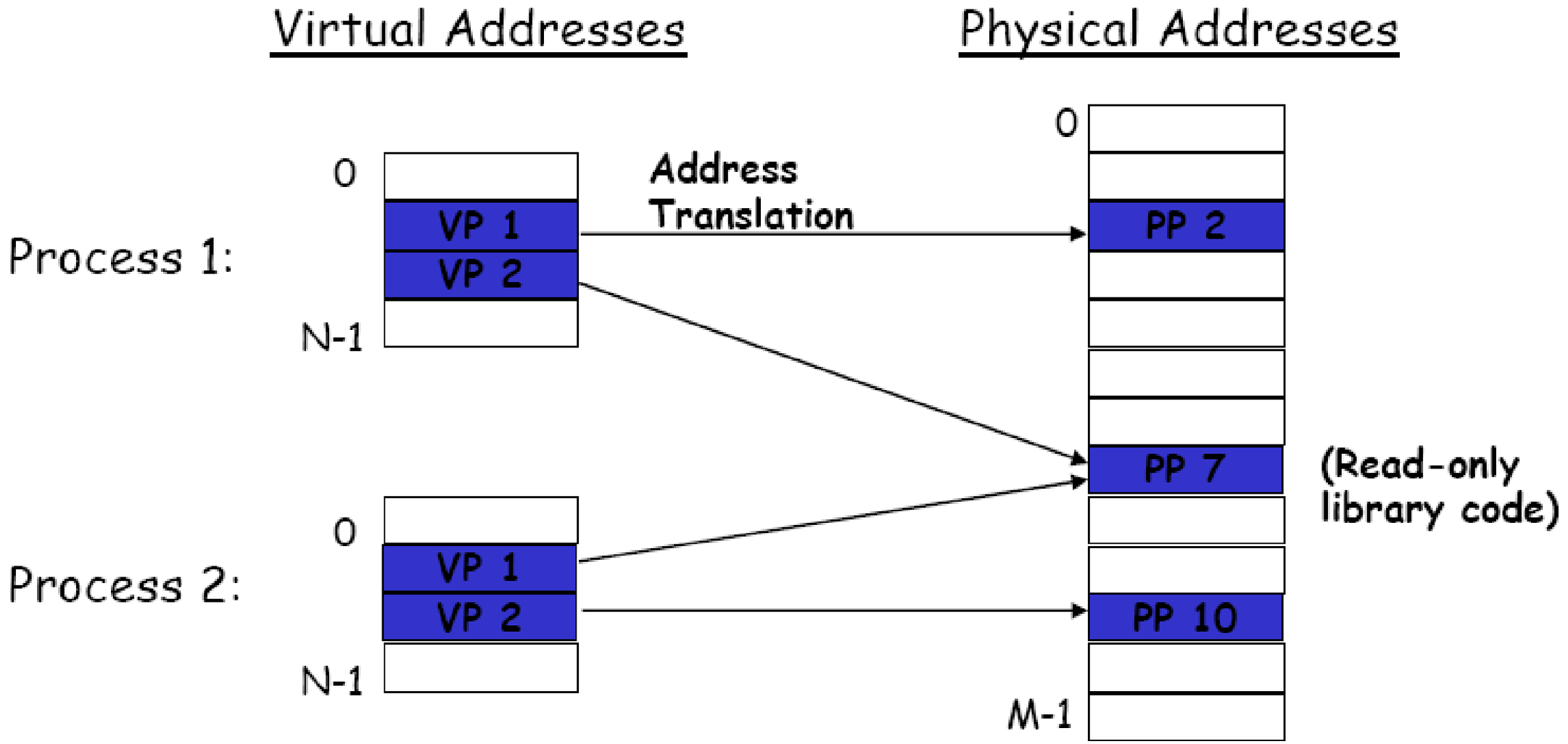
- 获得更大的逻辑空间
- 实现内存共享
- 实现内存保护

更大的逻辑地址空间



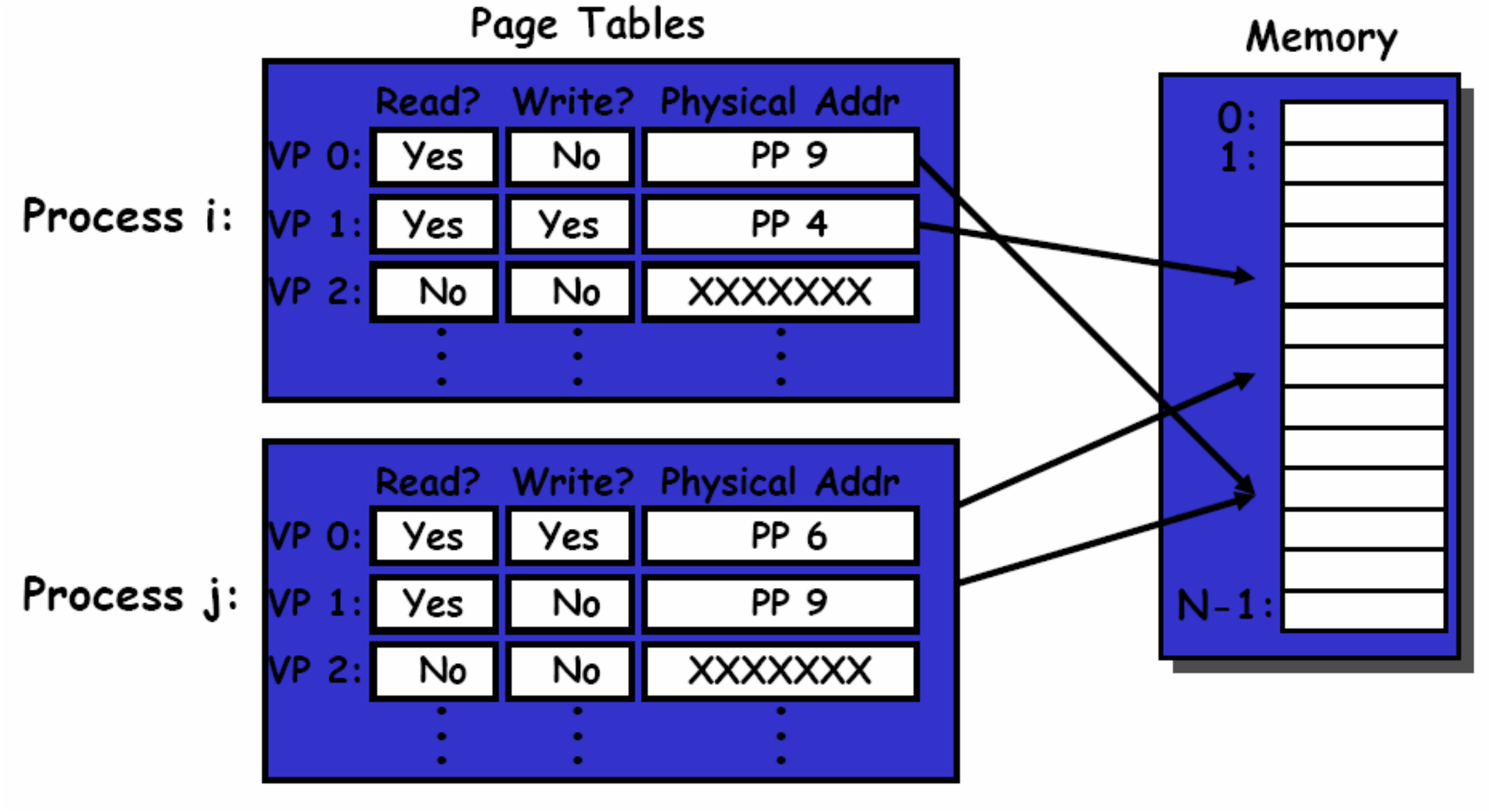
- 通过页表将虚地址转换为实地址

实现内存共享



- 每个进程有独立的逻辑地址空间
- 操作系统来控制逻辑地址和物理地址的转换

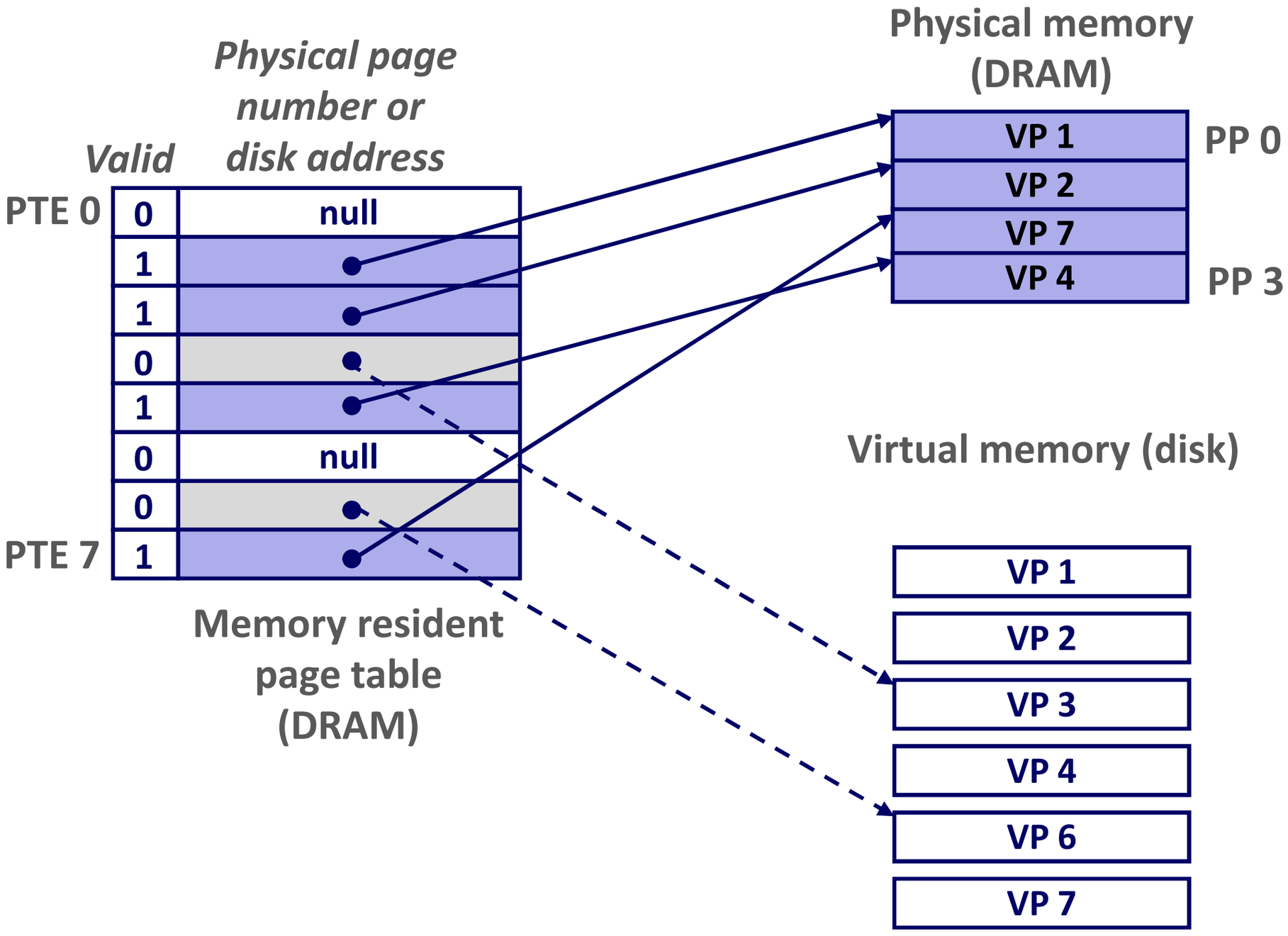
实现内存保护



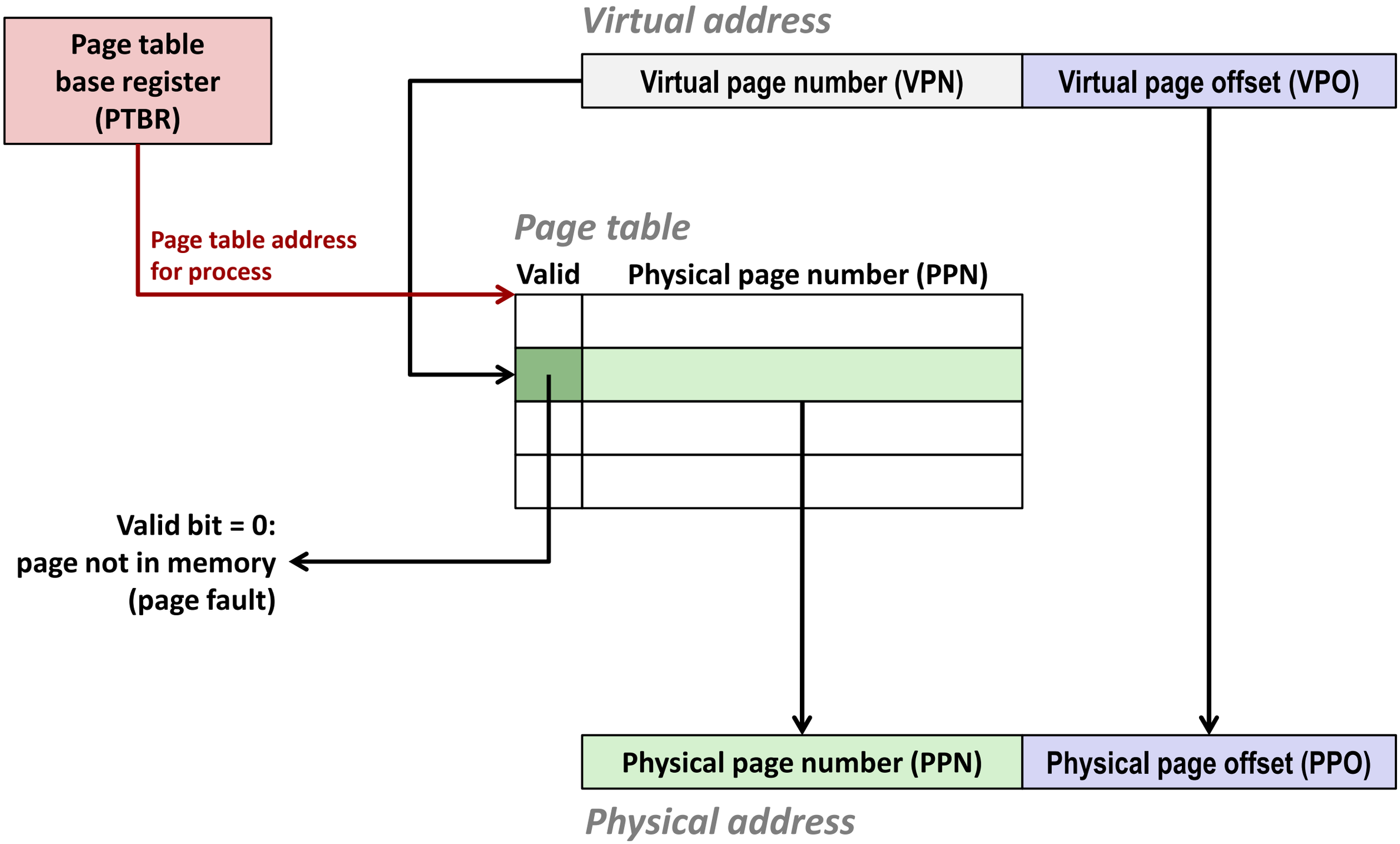
- 页表中存放有访问权限

通过页表的地址转换

- 页表记录了一组由虚拟页向物理页的映射

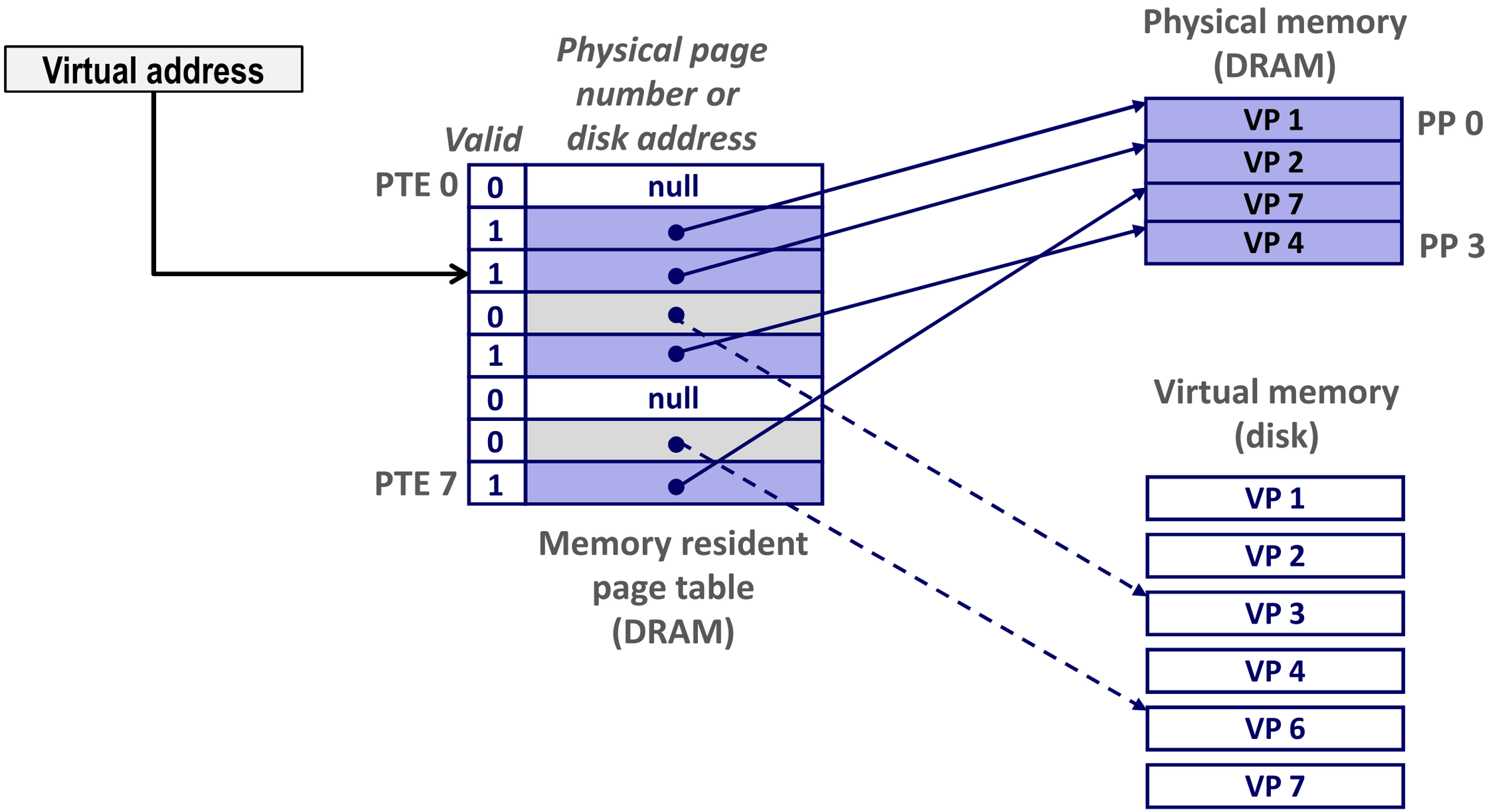


通过页表的地址转换


Page table base register (PTBR)
Virtual address
Virtual page number (VPN)
Virtual page offset (VPO)
Page table address for process
Page table
Valid
Physical page number (PPN)
Valid bit = 0: page not in memory (page fault)
Physical page number (PPN)
Physical page offset (PPO)
Physical address

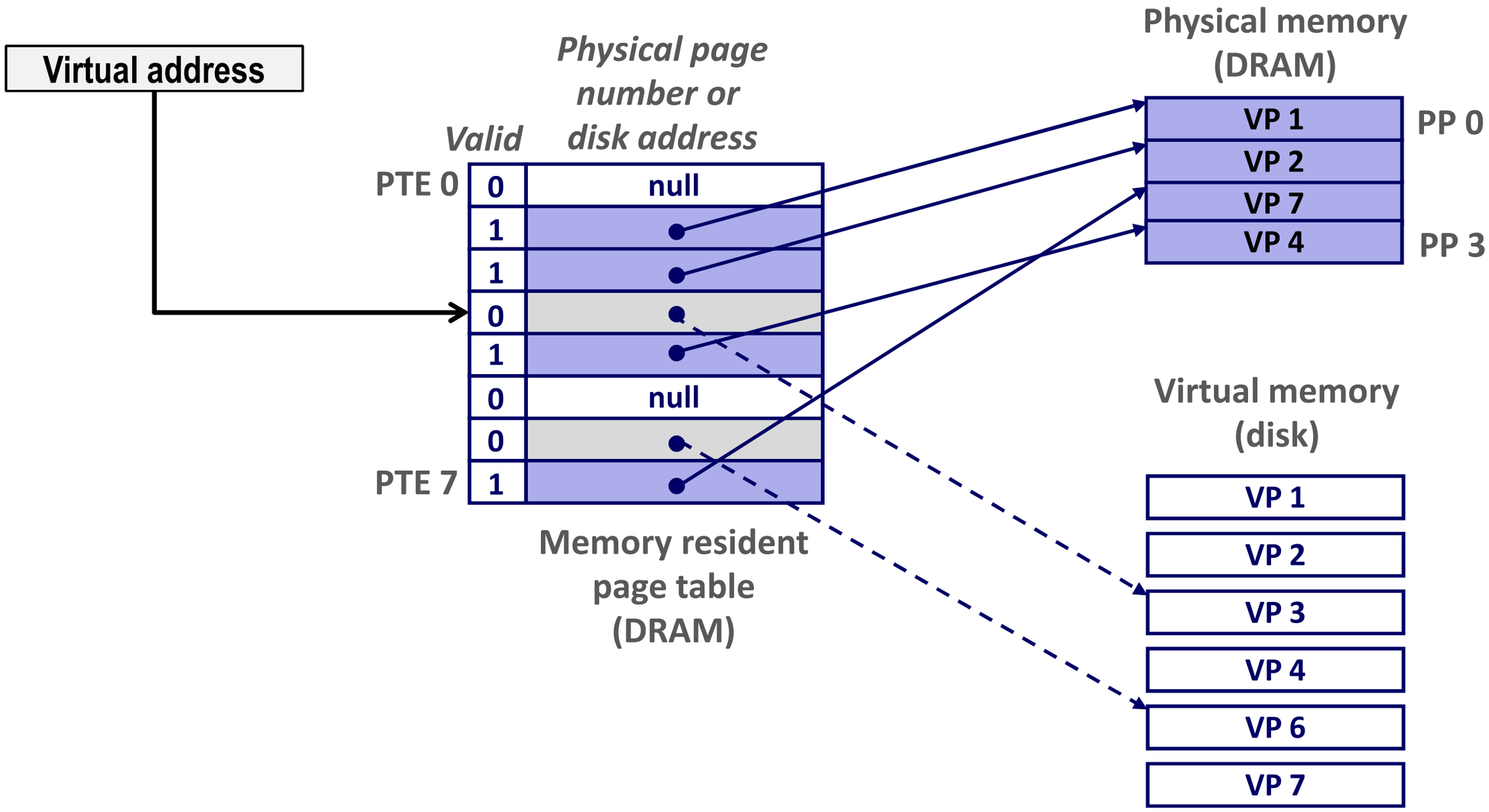
页命中

- 需要访问的虚地址中的字在主存中（有效位为1）



缺页

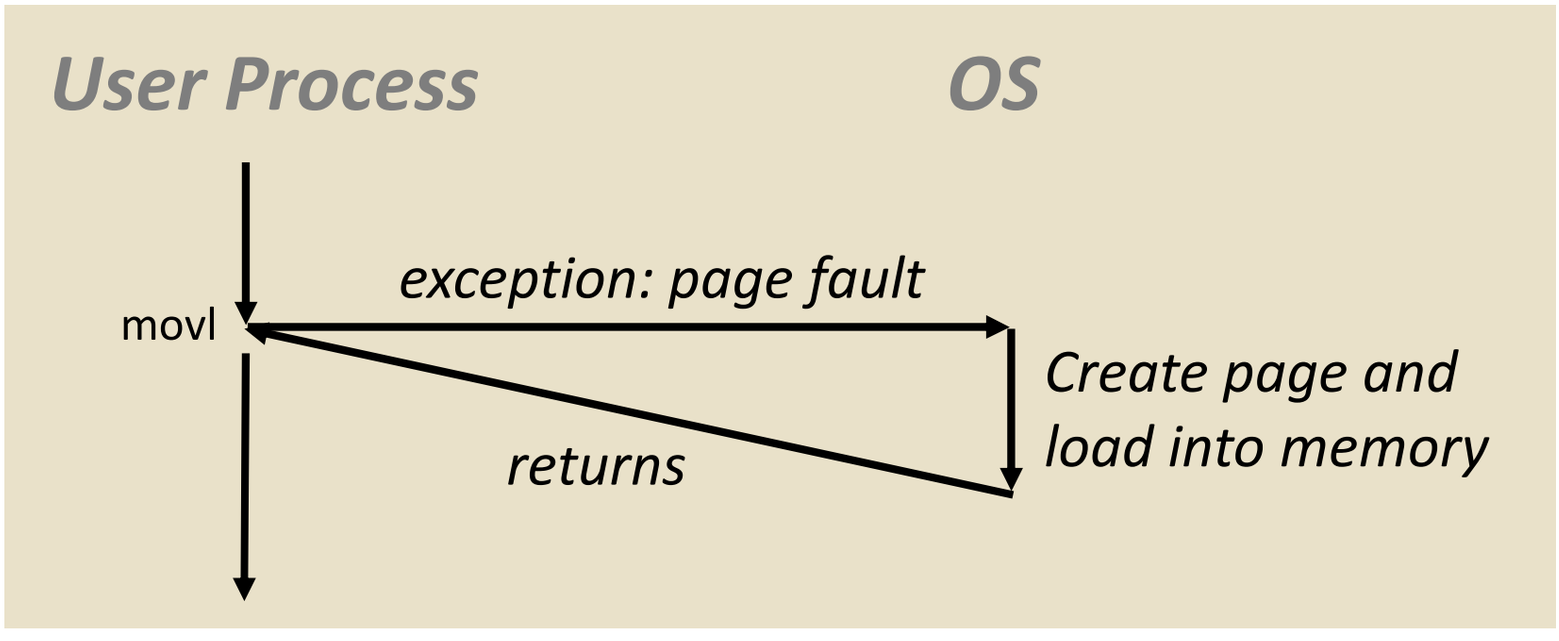
- 需要访问的虚地址中的字在不主存中（有效位为0）



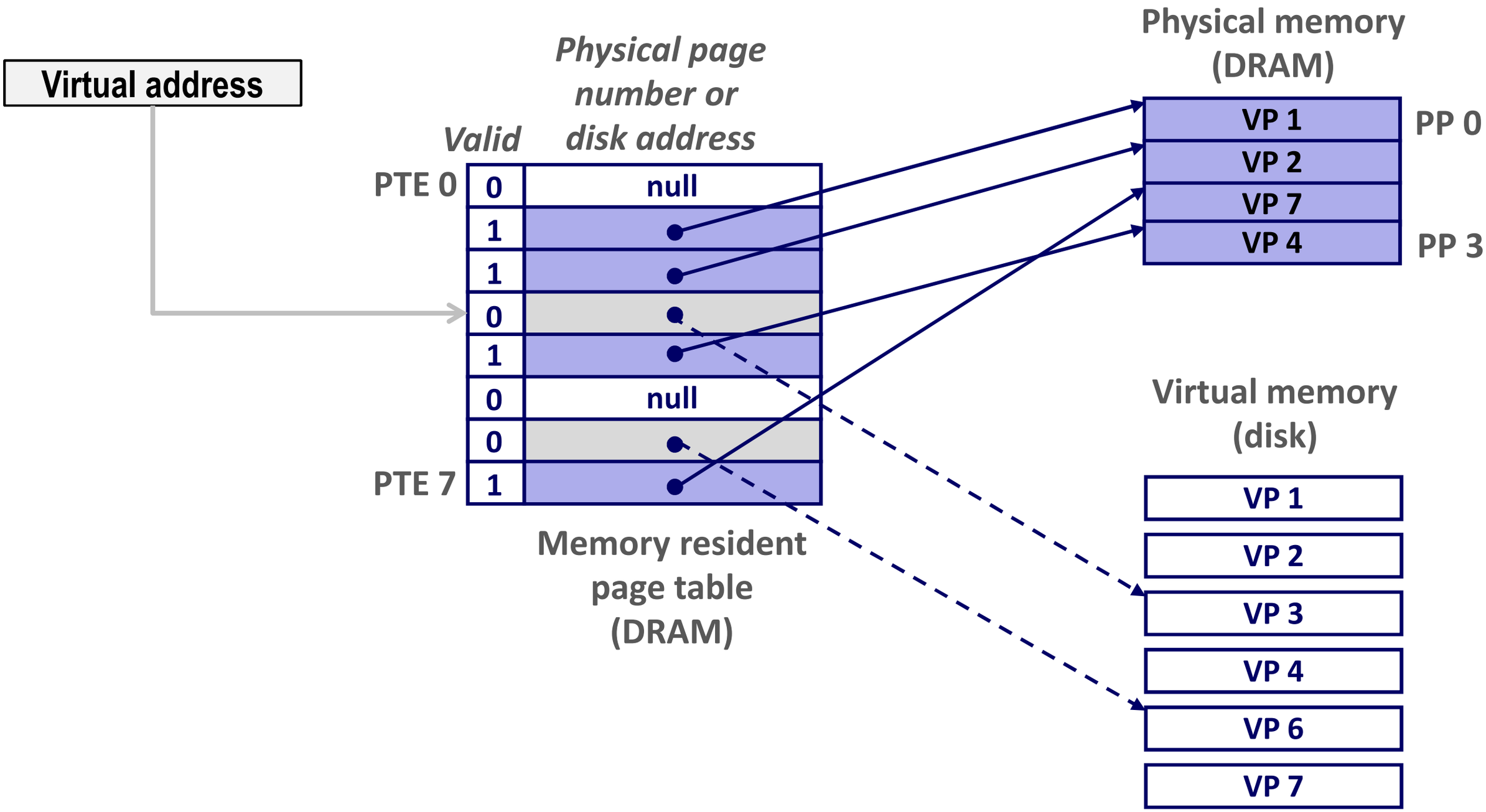
发生缺页

- 发生缺页后，操作系统将获得控制权（异常机制），其在下一级存储层次（通常是磁盘）中找到该页，然后将请求页放到主存的某个位置

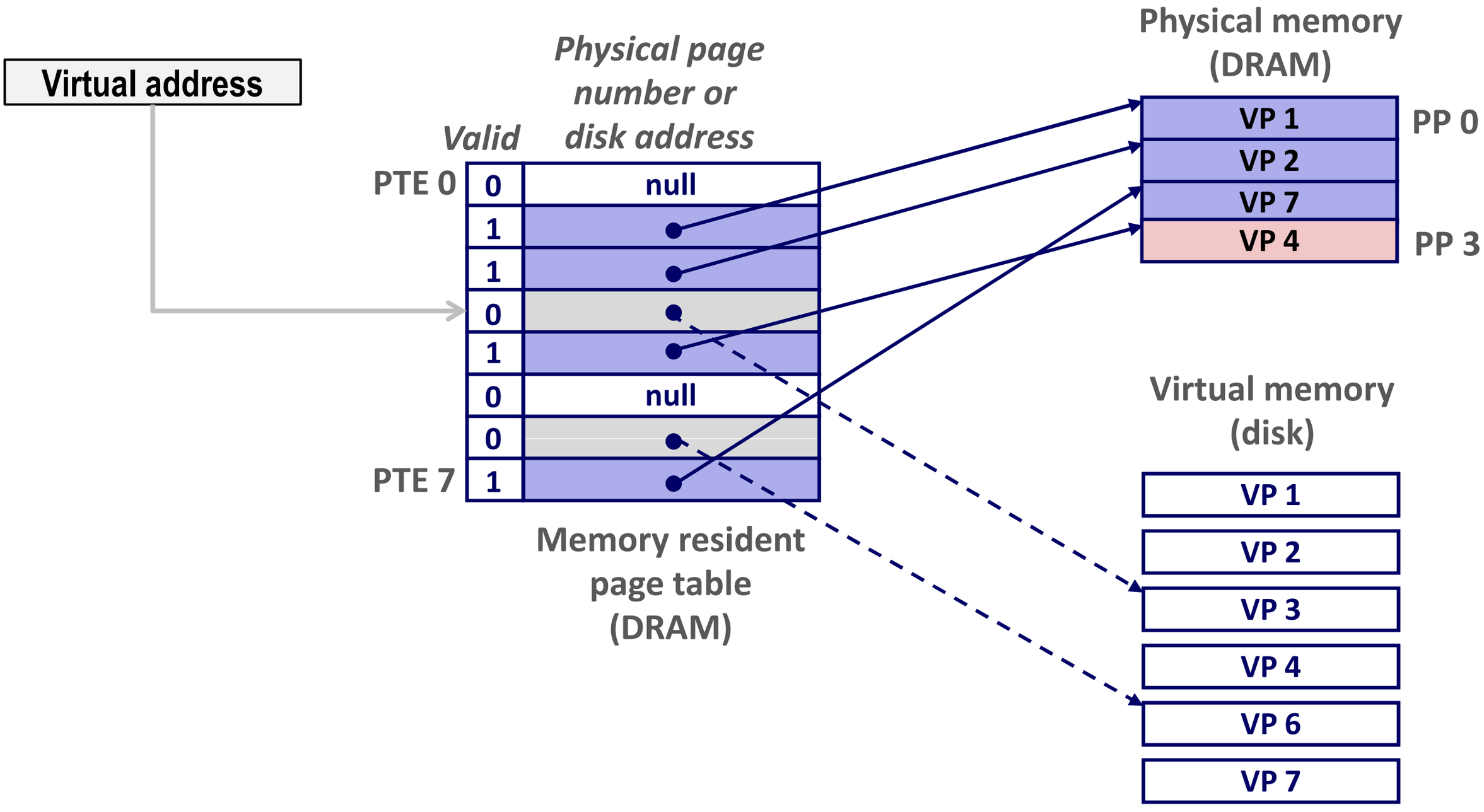
```
int a[1000];
main ()
{
    a[500] = 13;
}
```



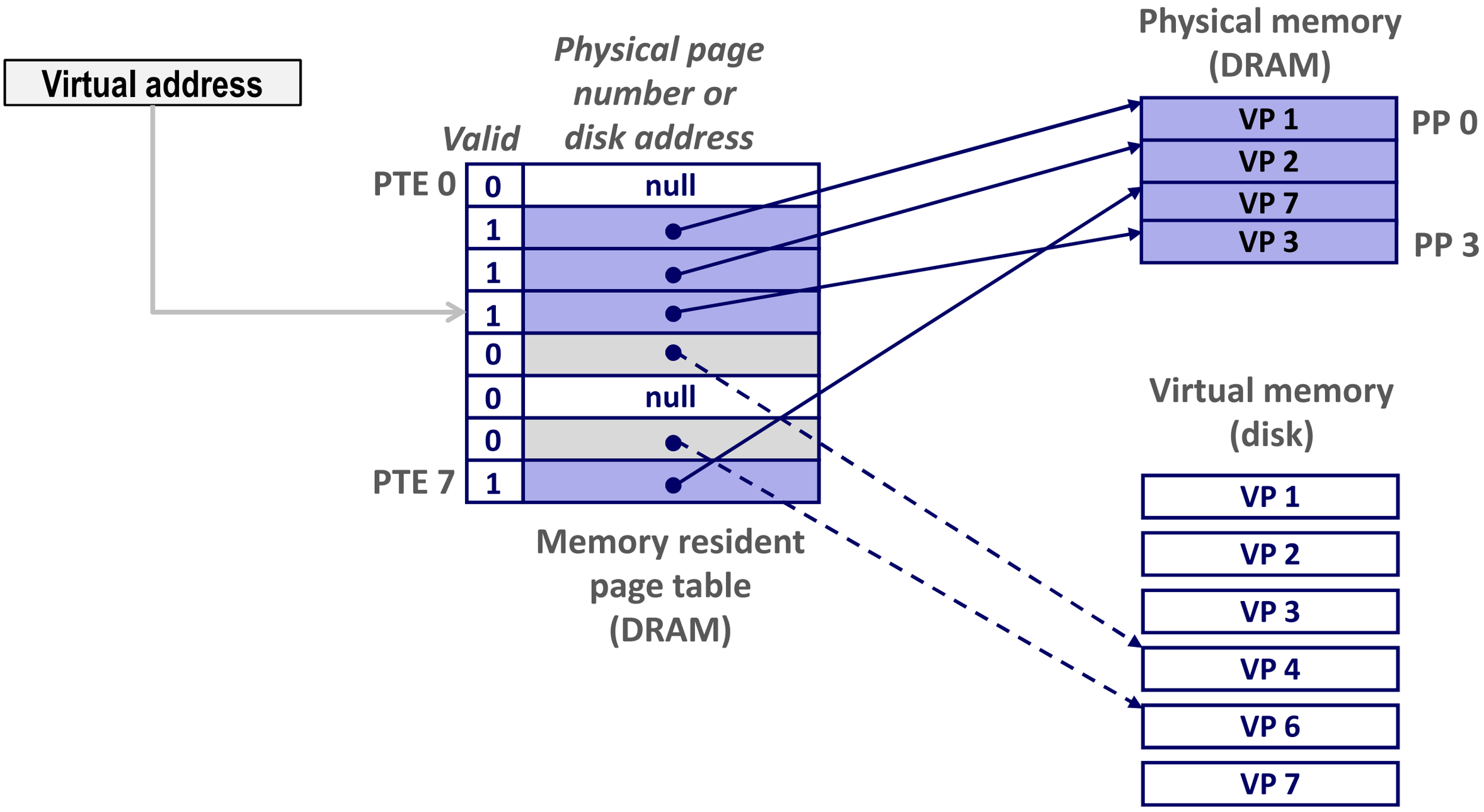
缺页处理


Virtual address
Physical page number or disk address
Valid
PTE 0
0
null
1
1
0
1
0
null
0
PTE 7
1
Memory resident page table (DRAM)
Physical memory (DRAM)
VP 1
VP 2
VP 7
VP 4
PP 0
PP 3
Virtual memory (disk)
VP 1
VP 2
VP 3
VP 4
VP 6
VP 7

缺页处理


Virtual address
Physical page number or disk address
Valid
PTE 0
0
null
1
1
0
1
0
null
0
PTE 7
1
Memory resident page table (DRAM)
Physical memory (DRAM)
VP 1
VP 2
VP 7
VP 4
PP 0
PP 3
Virtual memory (disk)
VP 1
VP 2
VP 3
VP 4
VP 6
VP 7

缺页处理


Virtual address
Physical page number or disk address
Valid
PTE 0
0
null
1
1
1
0
0
null
0
PTE 7
1
Memory resident page table (DRAM)
Physical memory (DRAM)
VP 1
VP 2
VP 7
VP 3
PP 0
PP 3
Virtual memory (disk)
VP 1
VP 2
VP 3
VP 4
VP 6
VP 7

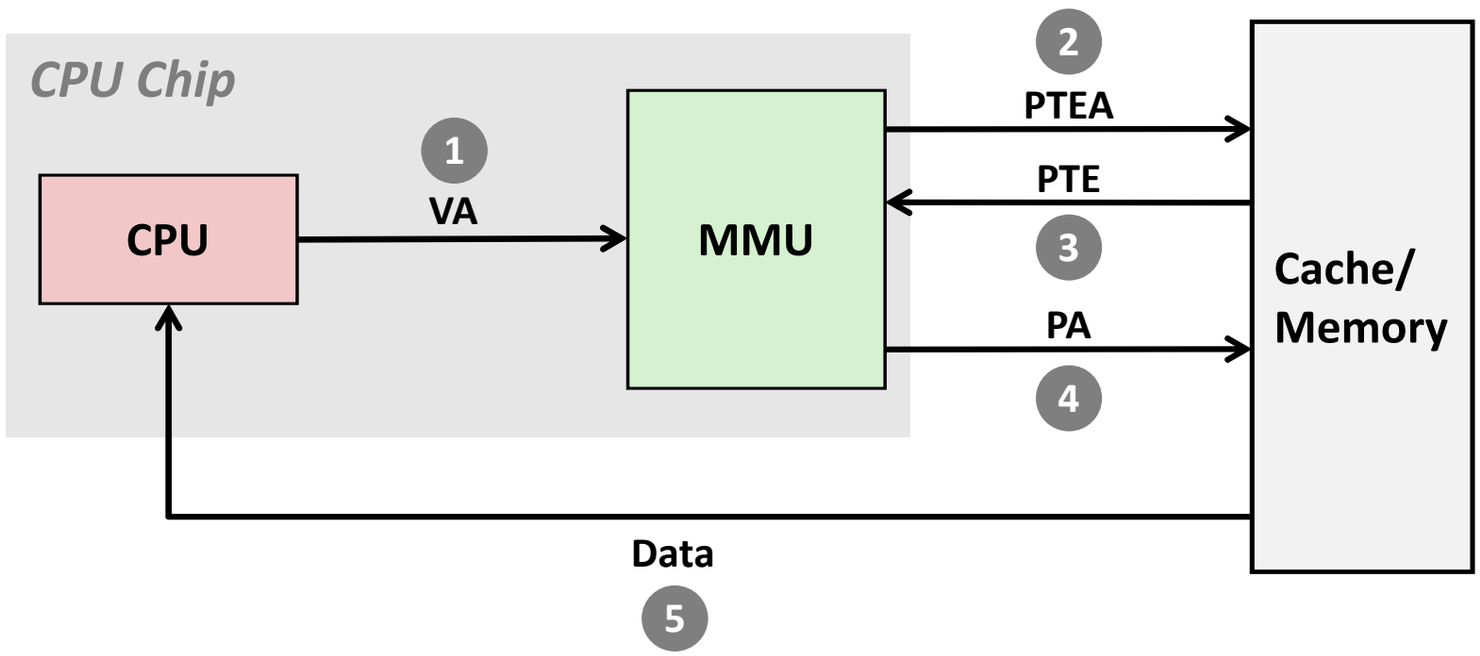
页面替换算法

- 最近最少使用(LRU)
  - 将页帧按照最近最多使用到最近最少使用进行排序,再次访问一个页帧时,将该页帧移到表头,替换时将表尾的页帧换出

虚拟存储器目的

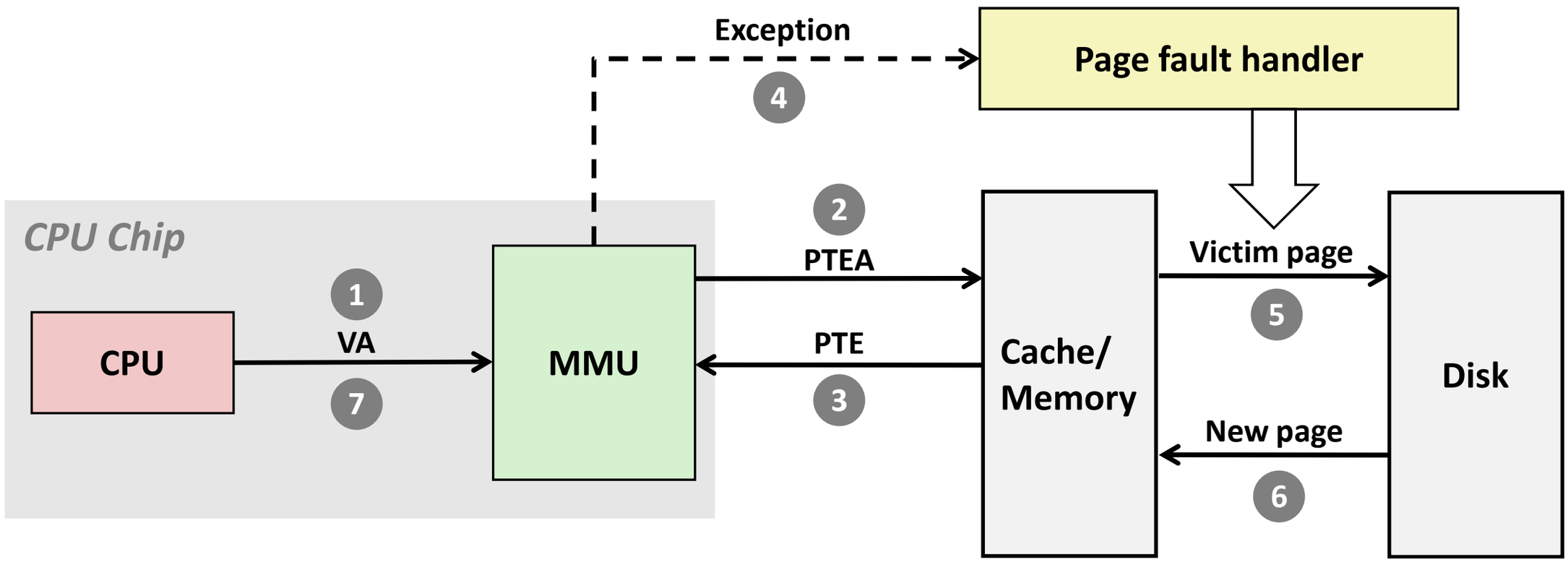
- 根本目的
  - 获得运行比物理存储器更大空间程序的能力
- 保护
  - 操作系统可以对虚拟存储空间进行特定的保护 . . .
- 灵活
  - 程序的某部分可以装入主存的任意位置
- 提高存储效率
  - 只在主存储器中保留最重要的部分
- 提高并行度
  - 在进行段页替换的同时可以执行其它进程
- 可扩展
  - 为对象提供了扩展空间的能力.

地址转换：页命中



- (1)CPU向MMU发送虚拟地址
- (2-3)MMU从页表中获取页表项
- (4)MMU向主存或cache发送物理地址
- (5)主存或cache向CPU发送数据字

地址转换：缺页

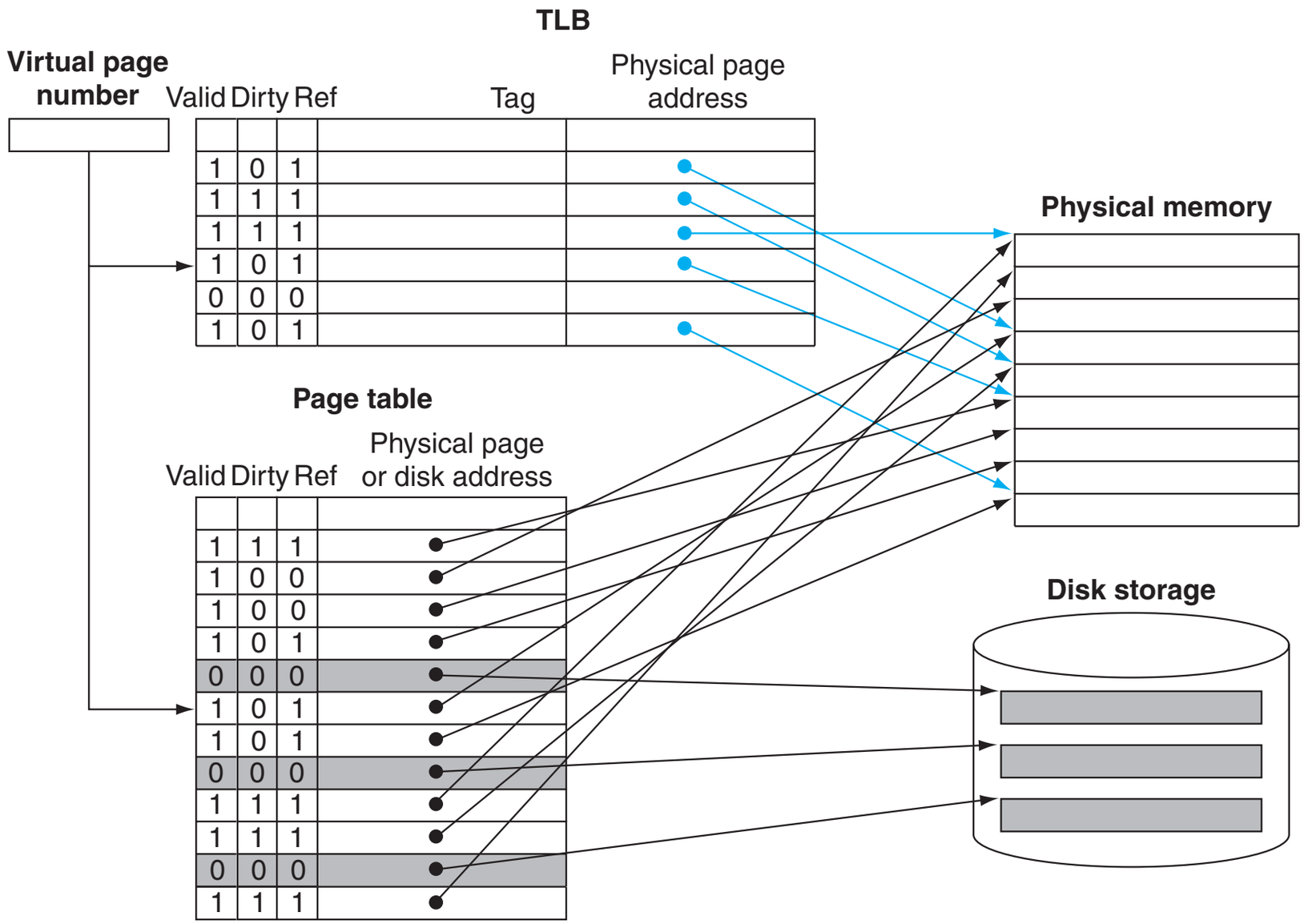


- (1)CPU向MMU发送虚拟地址
- (2-3)MMU从页表中获取页表项
- (4)有效位为0，MMU触发缺页异常
- (5)选择被替换的页
- (6)在主存中插入新的页
- (7)返回原来的进程，重新执行刚才发生异常的操作

地址转换的效率问题

- 由于页表存放在主存中，因此程序每次访存至少需要两次：
  - 一次访存获取物理地址
  - 第二次访存获取数据
- 提高地址转换速度的方法
  - 利用页表的访问局部性，即当一个转换的虚拟页号被使用时，它可能在不久的将来再次被使用；
  - 解决方案：转换旁路缓冲TLB
    - 包含在处理器中的一个特殊的cache，用以追踪最近使用过的地址变换

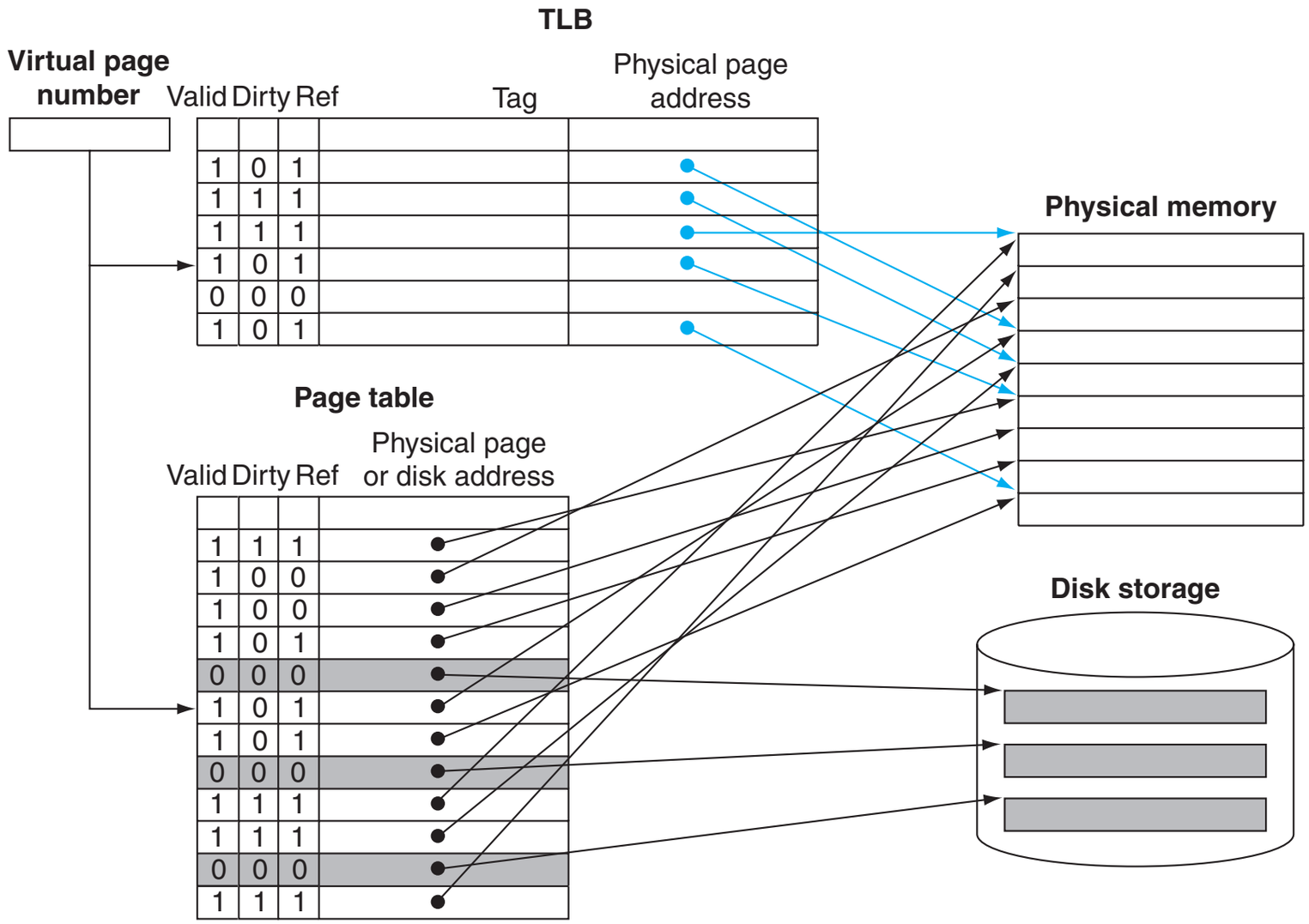
转换旁路缓冲TLB



- 两种缺失
  - TLB缺失：TLB中没有访问的虚页号，但是该页在主存中
  - 缺页：访问的页不在主存中

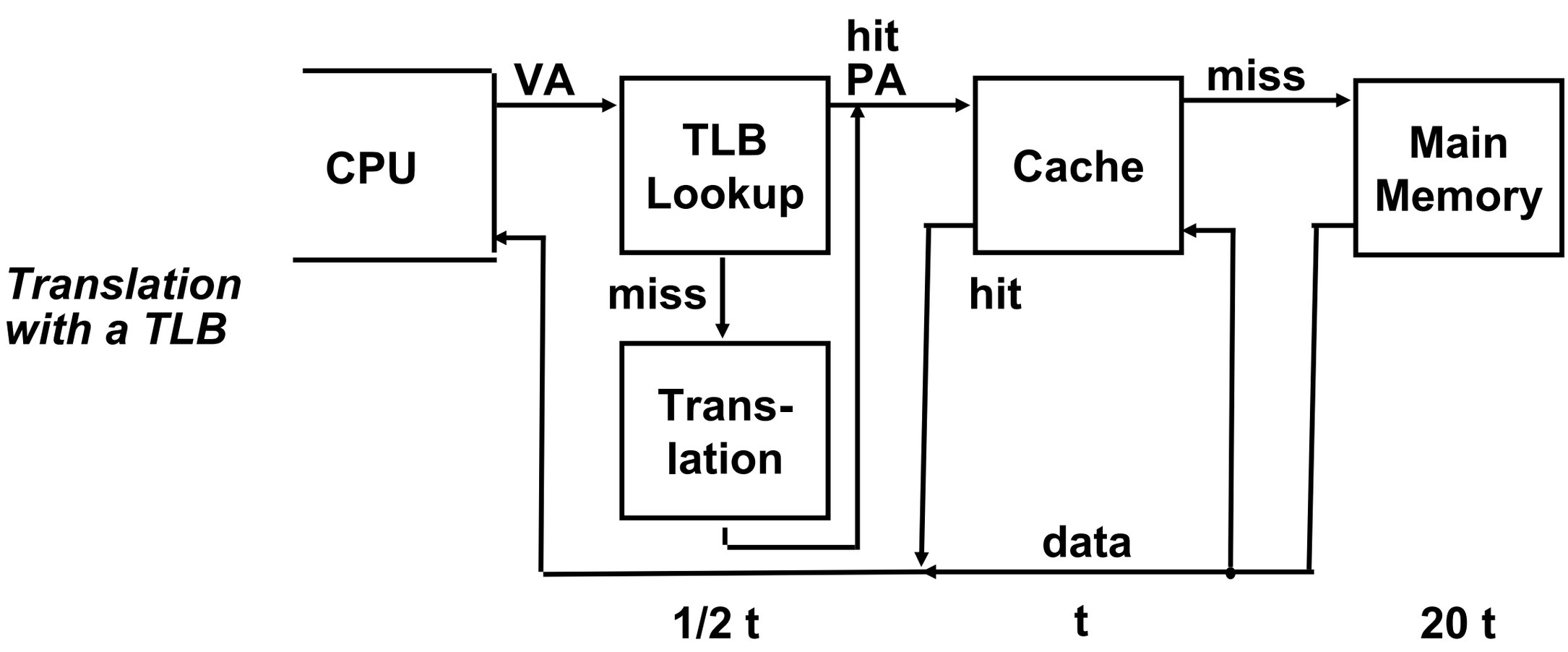
转换旁路缓冲TLB

- 访问频繁:速度第一
- TLB 缺失将造成:
  - 流水线停止
  - 通知操作系统
  - 读页表
  - 将表项写入TLB
  - 返回到用户程序
  - 重新访问
- 因此,应尽量减少缺失:
  - 多路组相连
  - 再尽量提高TLB的容量



TLB

- 为页表设置的专用Cache,实现虚页号到实页号的转换
- 多路组相连、全相连
- 容量较小,128~256个表项



虚拟存储器与Cache比较

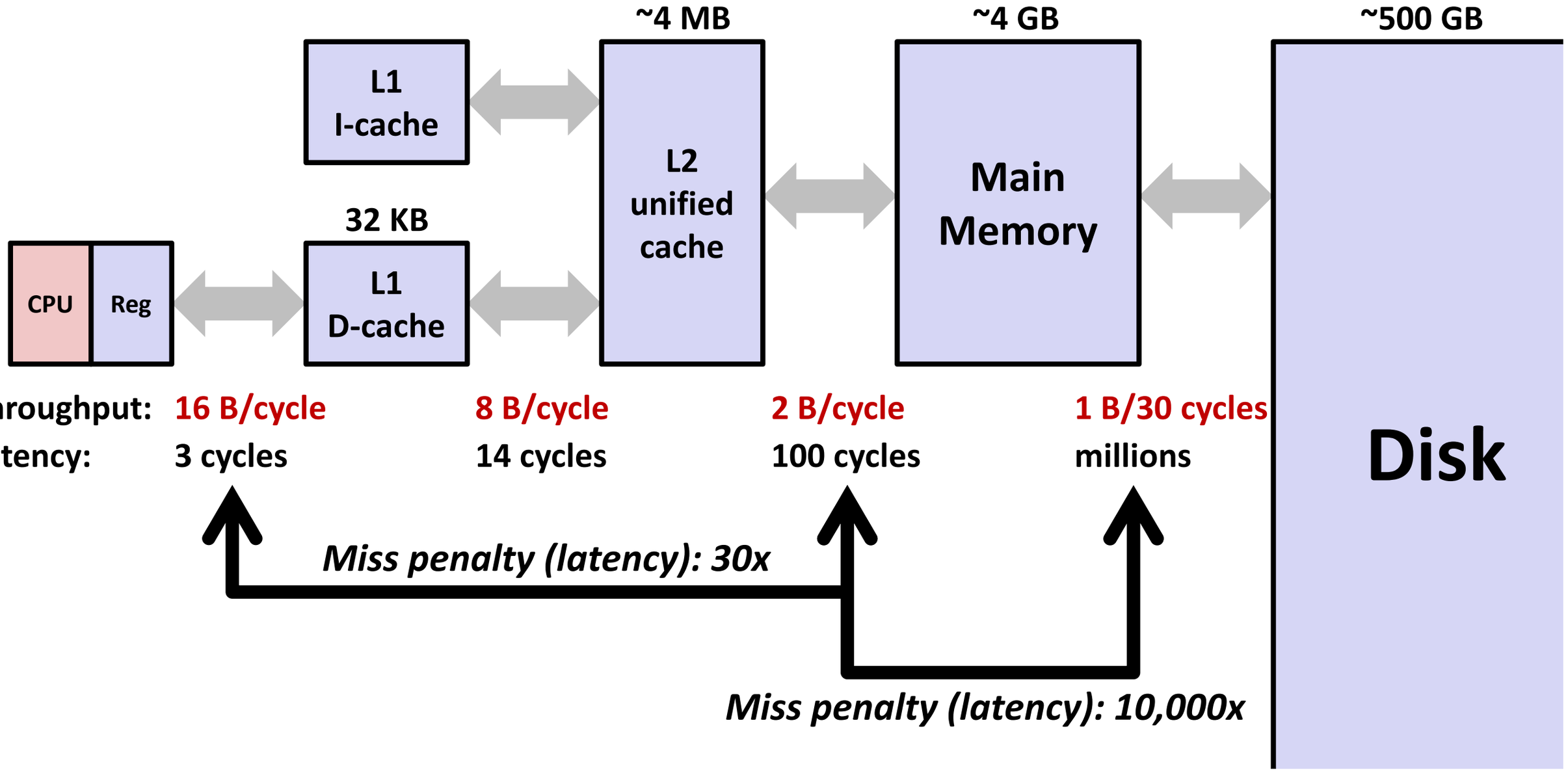
- 虚存
  - “主存——辅存层次”,主要目的是解决存储容量的问题。
  - 单位时间内数据交换次数较少,但每次交换的数据量大,达几十至几千字节。
- Cache
  - Cache主要目的是解 决存储速度问题,使存储器的访问速度不 太影响CPU的运行速度。
  - 单位时间内数据交换的次数较多,每次交换的数据量较小,只有几个到几十个字节。

虚拟存储器与Cache的不同

- 虚拟存储器
  - 克服存储容量的不足
  - 获得对主存储器管理的便利
  - 由操作系统管理
- 高速缓冲存储器
  - 解决主存储器与CPU 性能的差距
  - 获得最小粒度的访问
  - 由硬件实现

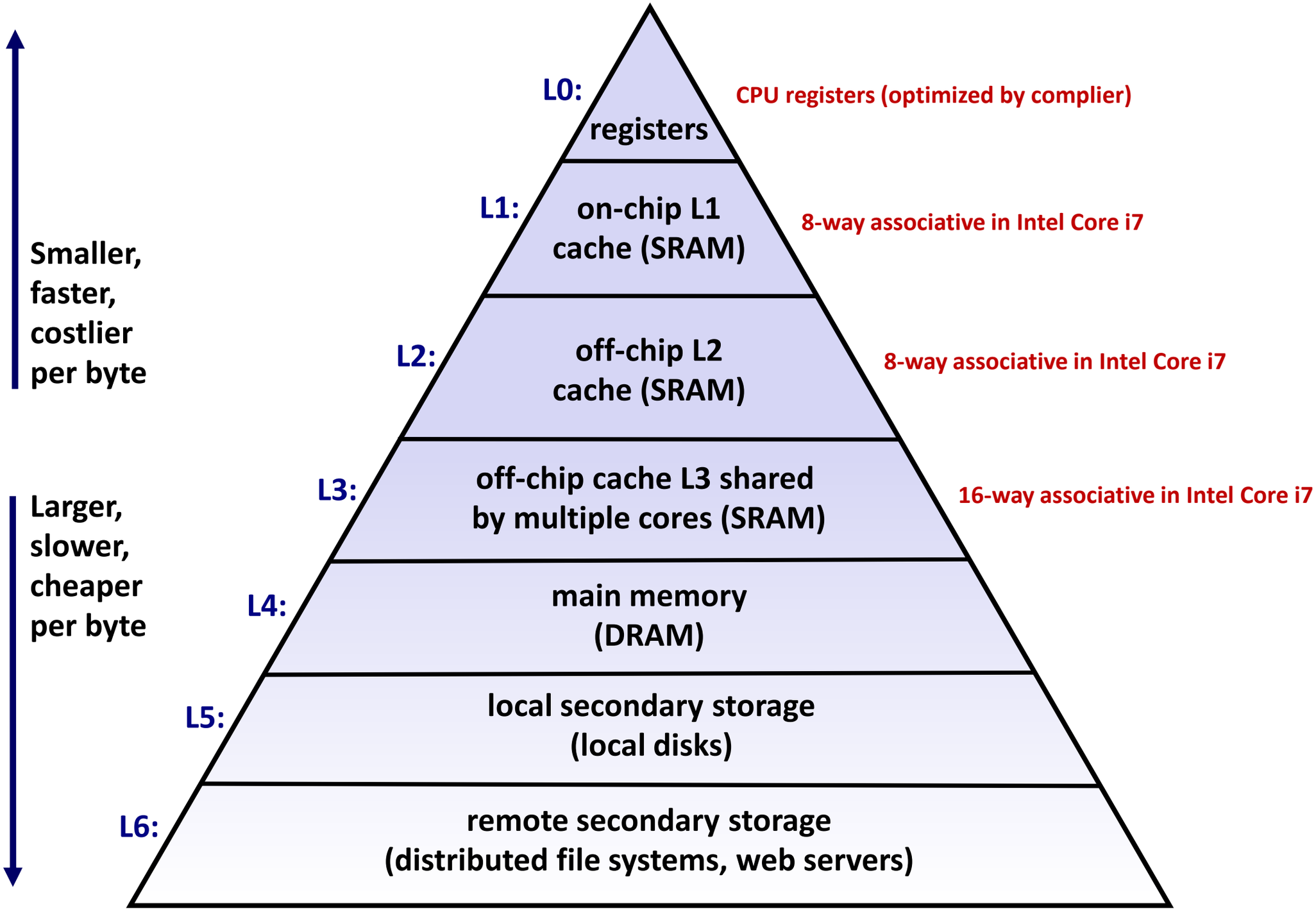
Core 2 Duo的层次存储系统

L1/L2 cache: 64 B blocks



存储器层次结构

Typical Memory Hierarchy (Intel Core i7)



本讲小结

- 虚拟存储器
  - 虚拟存储器基本概念
  - 虚拟地址到物理地址的转换
  - 虚拟存储器的页式管理