第8章 异常控制流——异常和进程

Exceptional Control Flow——Exceptions and Processes

- 教 师： 吴锐
- 计算机科学与技术学院
- 哈尔滨工业大学

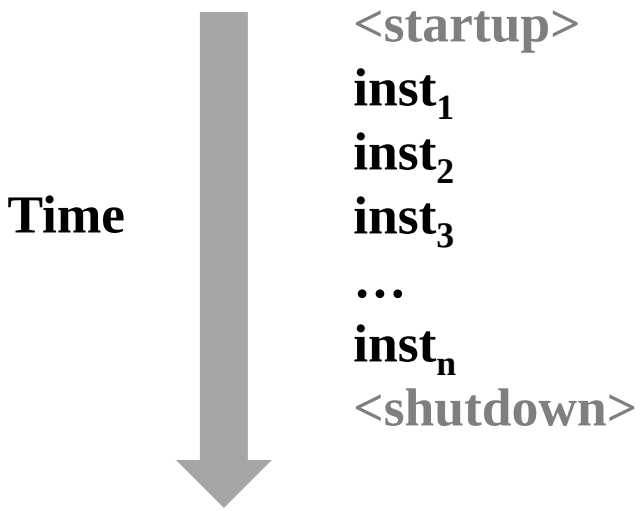
主要内容

- 异常控制流(Exceptional Control Flow)
- 异常(Exceptions)
- 进程(Processes)
- 进程控制(Processes Control)

控制流(Control Flow)

- 处理器只做一件事
  - 处理器从加电到断电，处理器只是简单地读取和执行一个指令序列(一次执行一条指令)
  - 这个指令序列就是处理器的控制流 (*control flow* or *flow of control*)

Physical control flow



改变控制流(Altering the Control Flow)

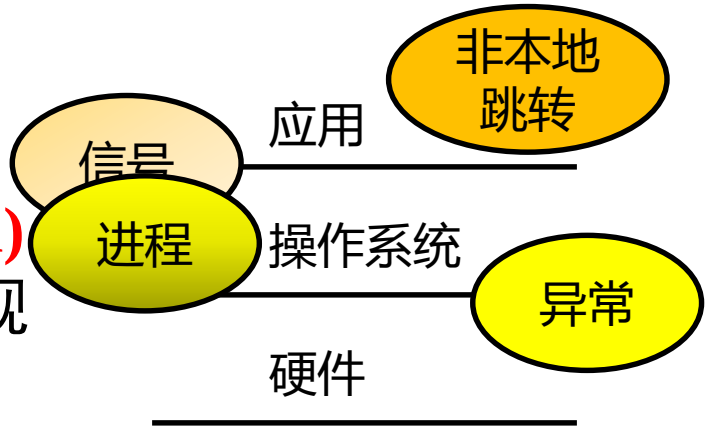
- 改变控制流的两种机制:
  - 跳转和分支(Jumps and branches)
  - 调用和返回(Call and return)

  能够对(由程序变量表示的)***程序状态***的变化做出反应
- 不足：难以对*系统状态*的变化做出反应
  - 磁盘或网络适配器的数据到达
  - 除零错误
  - 用户的键盘输入(Ctrl-C)
  - 系统定时器超时

  上述系统变化不能用程序变量表示
- 现代系统通过使控制流发生突变对这些情况做出反应，称为“异常控制流”

异常控制流(Exceptional Control Flow)

- 发生在计算机系统的所有层次
- 低层机制(硬件层)
  - 1.**异常 (Exceptions)**
    - 硬件检测到的事件会触发控制转移到异常处理程序
    - 操作系统和硬件共同实现
- 高层机制
  - 2. **进程切换(Process context switch)**
    - 通过操作系统和硬件定时器实现
  - 3. **信号(Signals)**
    - 操作系统实现
  - 4. **非本地跳转(Nonlocal jumps)**: setjmp() and longjmp()
    - C运行库实现

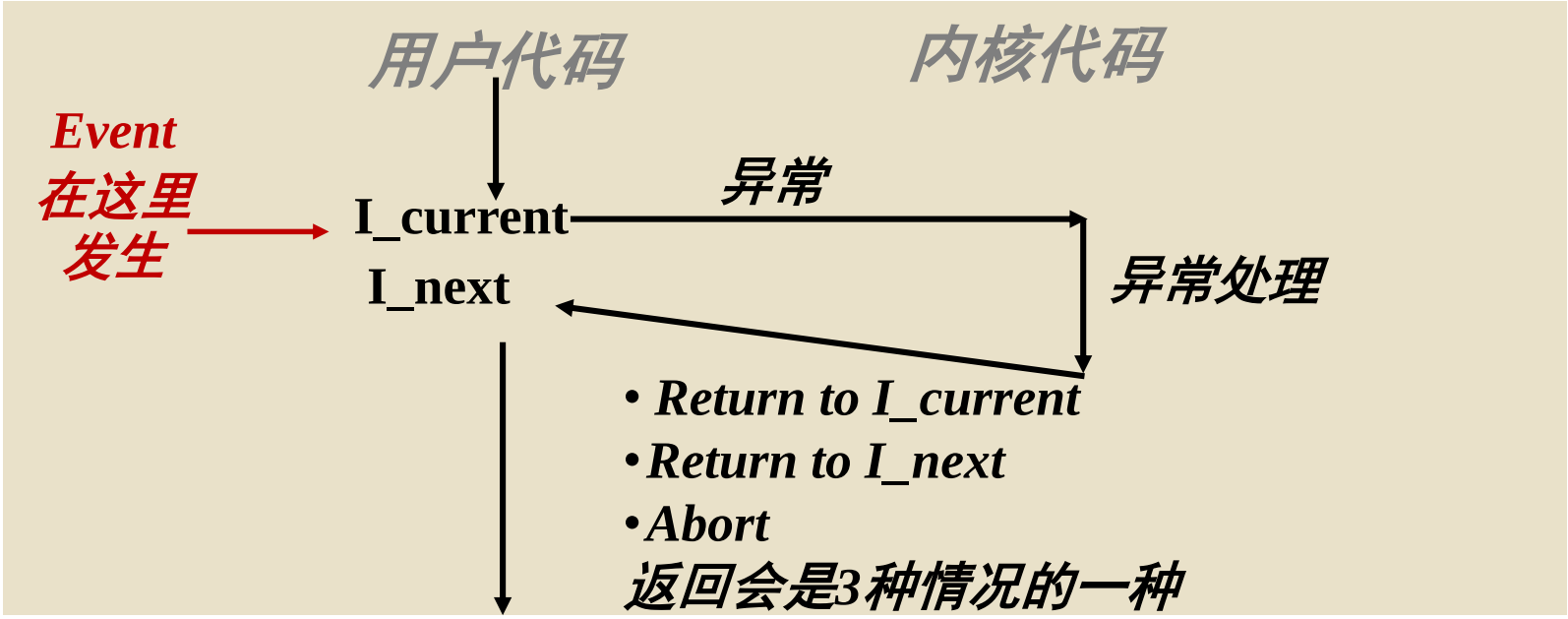


主要内容

- 异常控制流(Exceptional Control Flow)
- **异常(Exceptions)**
- 进程(Processes)
- 进程控制(Processes Control)

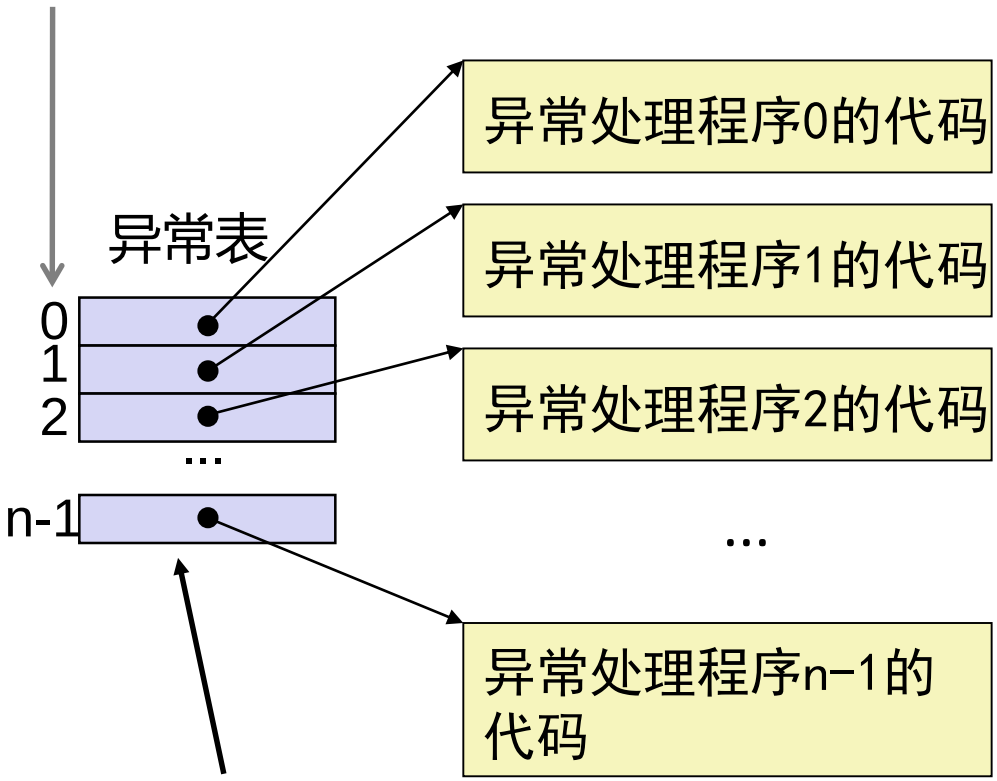
异常(Exceptions)

- 异常是指为响应某个事件将控制权转移到操作系统内核中的情况
  - 内核指操作系统常驻内存的部分
  - 事件示例：被零除、算术运算溢出、缺页、 I/O请求完成、键盘输入



异常处理

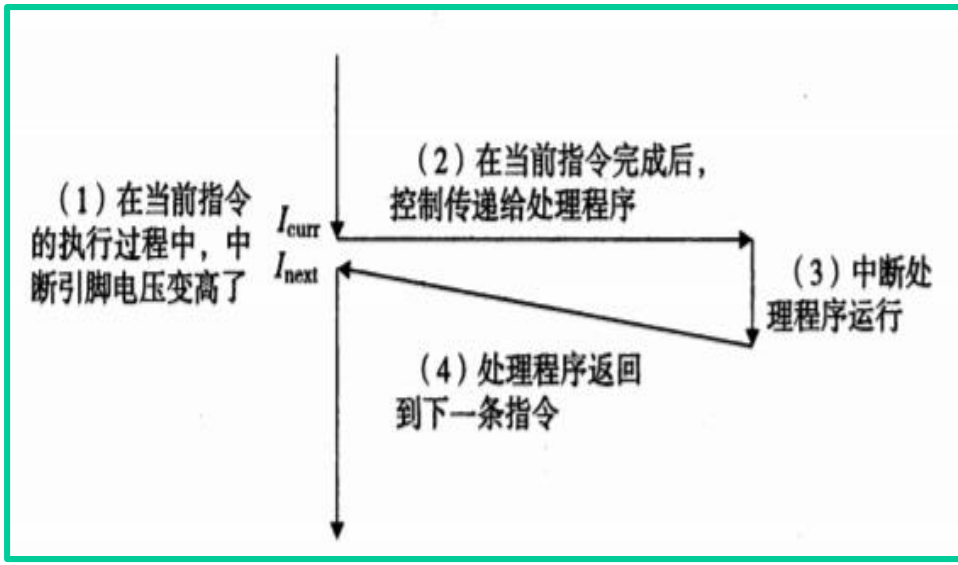
硬件+软件的配合



- 每种类型的事件有一个唯一的异常号(Exception numbers)k
- 异常号k是到异常表的索引(又名中断向量)
- 任何时候异常k发生，则异常k的处理程序立刻被调用

异步异常Asynchronous Exceptions (中断Interrupts)

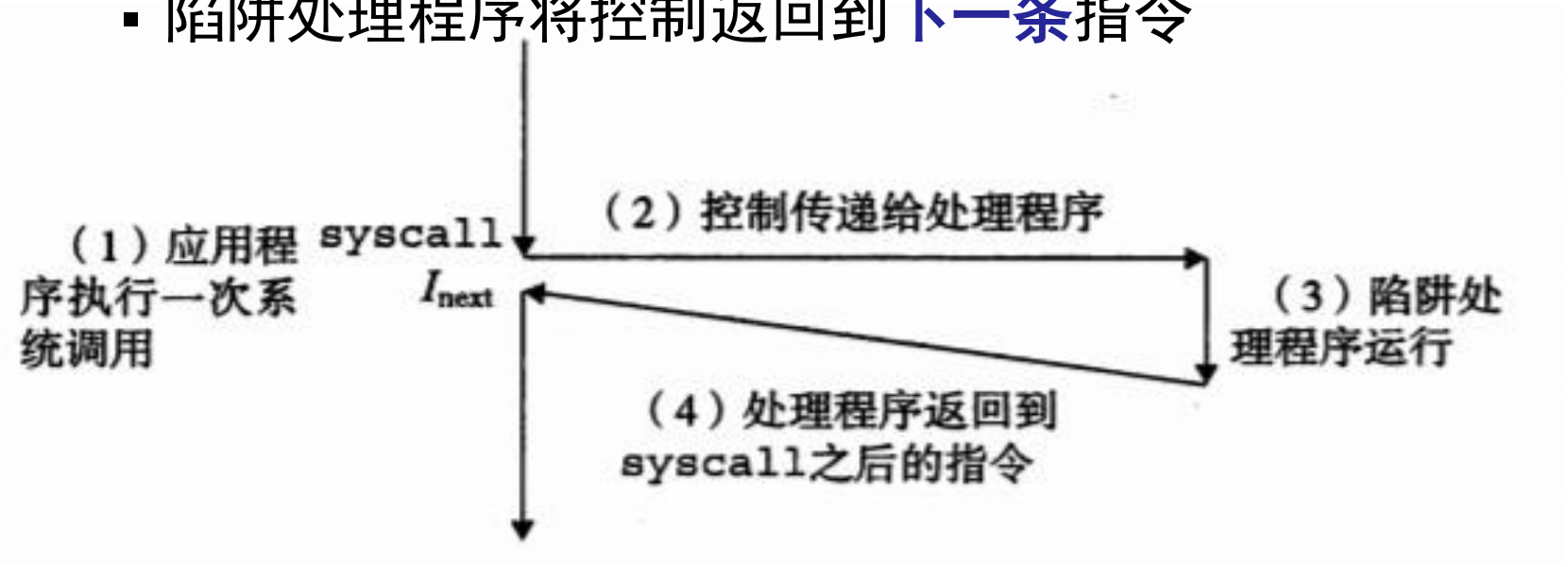
- 处理器外部I/O设备引起
  - 由处理器的中断引脚指示
  - 中断处理程序返回到 下一条指令处



- Examples:
  - 时钟中断(Timer interrupt)
    - 定时器芯片每隔几毫秒触发一次中断
    - 内核从用户程序取回控制权
  - 外部设备的I/O中断(I/O interrupt from external device)
    - 键盘上敲击一个 Ctrl-C
    - 网络数据包到达
    - 磁盘数据的到达

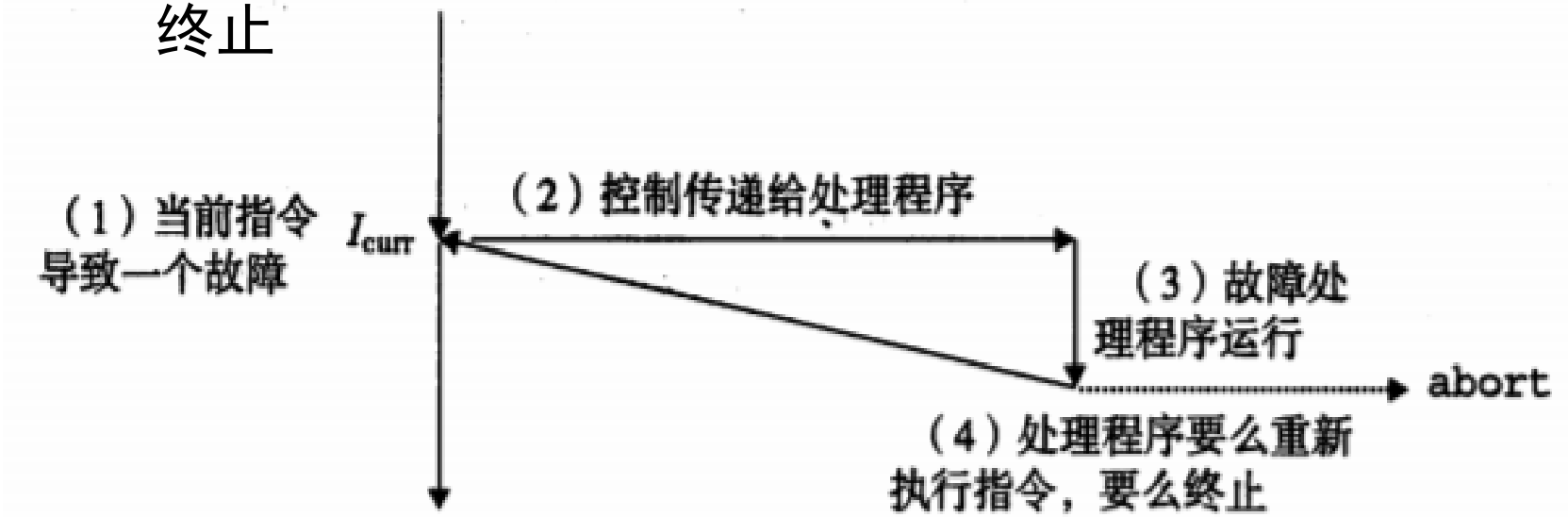
同步异常(Synchronous Exceptions)

- 执行指令产生的结果:
  - *陷阱 (Traps)*
    - 有意的，执行指令的结果
    - Examples: *系统调用(System Call)*,用户程序和内核之间的一个接口
    - 陷阱处理程序将控制返回到下一条指令



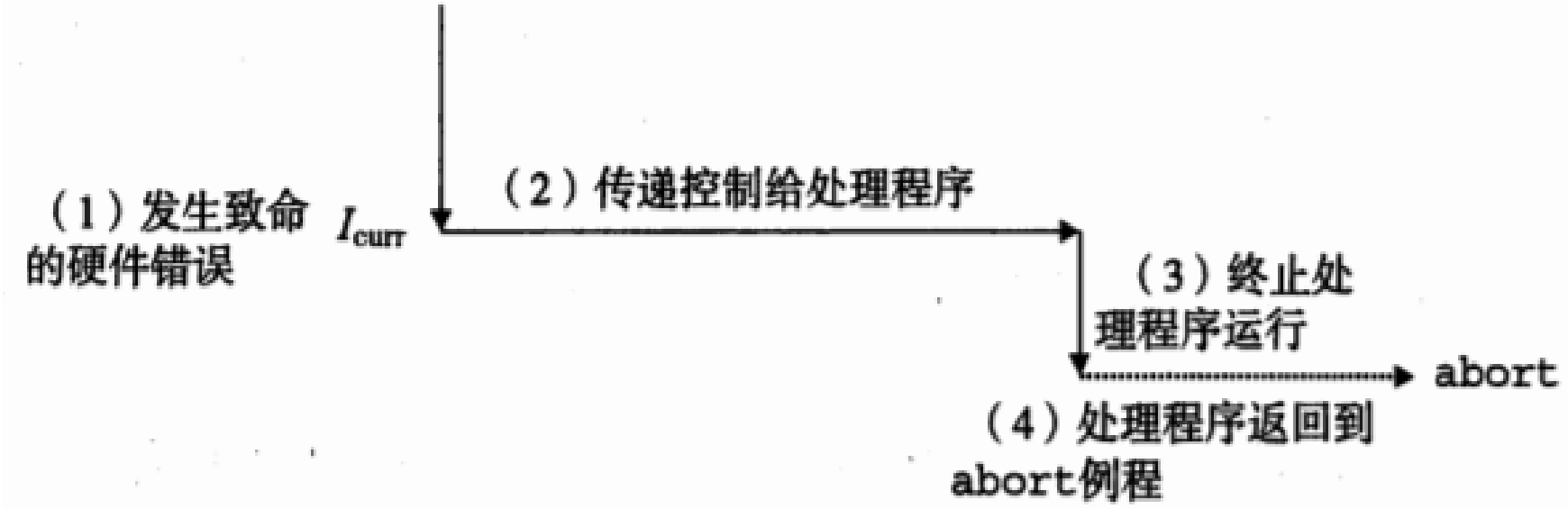
同步异常(Synchronous Exceptions)

- 执行指令产生的结果:
  - ***故障 (Faults)***
    - 不是有意的，但可能被修复
    - Examples: 缺页(可恢复),保护故障(protection faults，不可恢复), 浮点异常(floating point exceptions)
    - 处理程序要么重新执行引起故障的指令(已修复)，要么终止



同步异常(Synchronous Exceptions)

- 执行指令产生的结果:
  - *终止 (Aborts)*
    - 非故意，不可恢复的致命错误造成
    - Examples: 非法指令,奇偶校验错误(parity error),机器检查(machine check)
    - 中止当前程序



系统调用(System Call)

每个x86-64系统调用有一个唯一的ID号

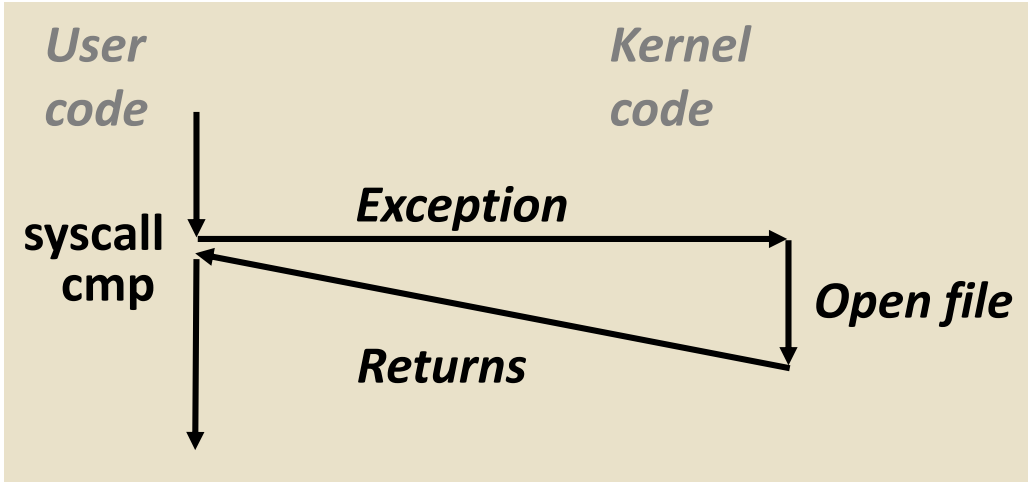
- Examples(Linux系统调用):

Number	*Name*	*Description*
0	`read`	Read file
1	`write`	Write file
2	`open`	Open file
3	`close`	Close file
4	`stat`	Get info about file
57	`fork`	Create process
59	`execve`	Execute a program
60	`_exit`	Terminate process
62	`kill`	Send signal to process

系统调用的例子: 打开文件

- 用户调用函数: `open(filename, options)`
- 调用`__open`函数，该函数使用系统调用指令`syscall`

```
00000000000e5d70 <__open>:
...
e5d79:   b8 02 00 00 00      mov  $0x2,%eax  # open is syscall #2
e5d7e:   0f 05                syscall        # Return value in %rax
e5d80:   48 3d 01 f0 ff ff    cmp  $0xfffffffffffff001,%rax
...
e5dfa:   c3                   retq
```



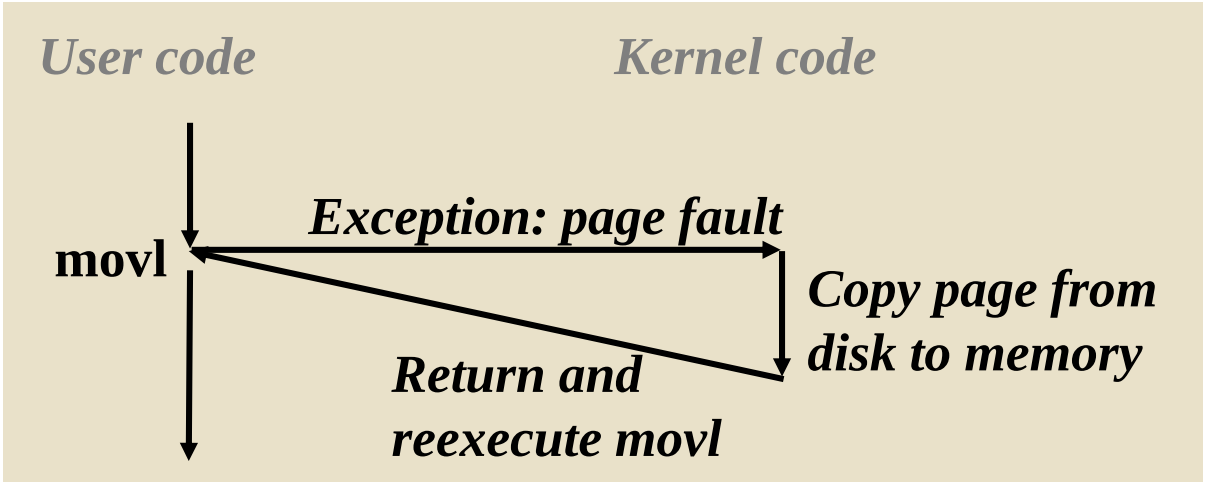
- `%rax` 包含系统调用号
- 其他参数(至多6个)依次在 `%rdi`, `%rsi`, `%rdx`, `%r10`, `%r8`, `%r9`
- 返回值在 `%rax`
- 负数返回值表明发生了错误，对应于负的 `errno`

Fault Example:缺页故障(Page Fault)

- 用户写内存地址(虚拟地址)
- 该地址对应的物理页不在内存，在磁盘中

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

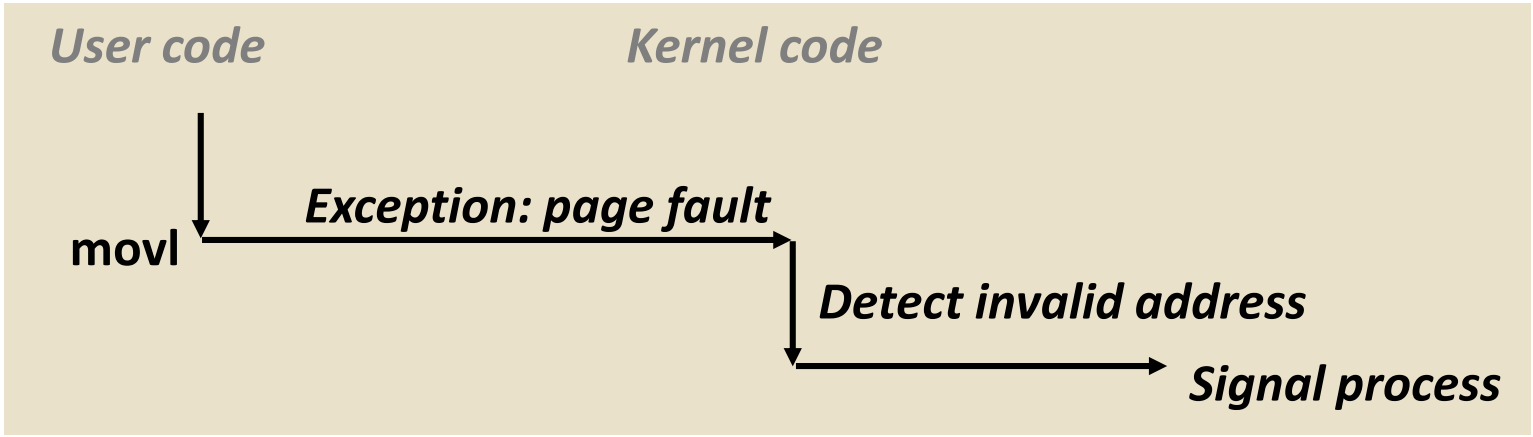
```
80483b7:        c7 05 10 9d 04 08 0d        movl   $0xd,0x8049d10
```



Fault Example:非法内存引用

```
int a[1000];
main ()
{
    a[5000] = 13;
}
```

```
80483b7:        c7 05 60 e3 04 08 0d        movl   $0xd,0x804e360
```



- OS发送 **SIGSEGV** 信号给用户进程(不尝试恢复)
- 用户进程以“段错误”(segmentation fault)退出

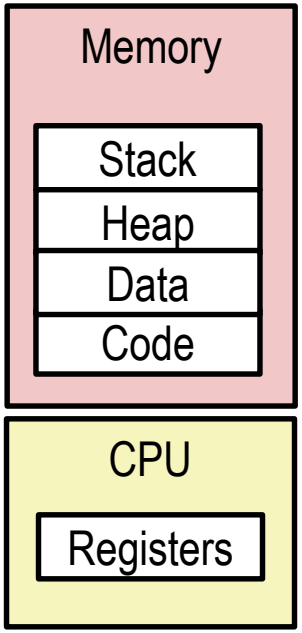
主要内容

- 异常控制流(Exceptional Control Flow)
- 异常(Exceptions)
- **进程(Processes)**
- 进程控制(Processes Control)

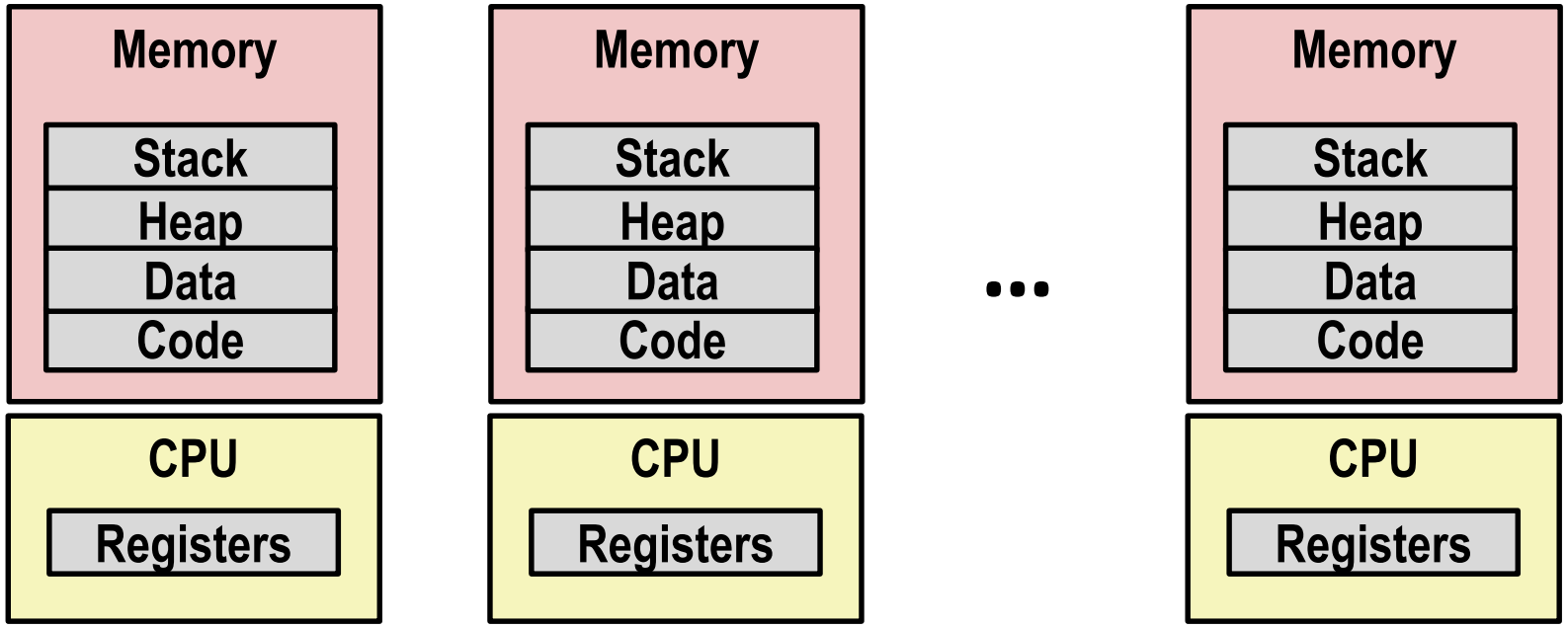
进程(Processes)

- **定义: A *process* is an instance of a running program.**
  一个执行中程序的实例
  - 计算机科学最深刻的概念之一
  - 不同于“程序”或“处理器”

- **进程提供给应用程序两个关键抽象**
  - ***逻辑控制流 (Logical control flow)***
    - 每个程序似乎独占地使用CPU
    - 通过OS内核的*上下文切换*机制提供
  - ***私有地址空间 (Private address space)***
    - 每个程序似乎独占地使用内存系统
    - OS内核的*虚拟内存*机制提供

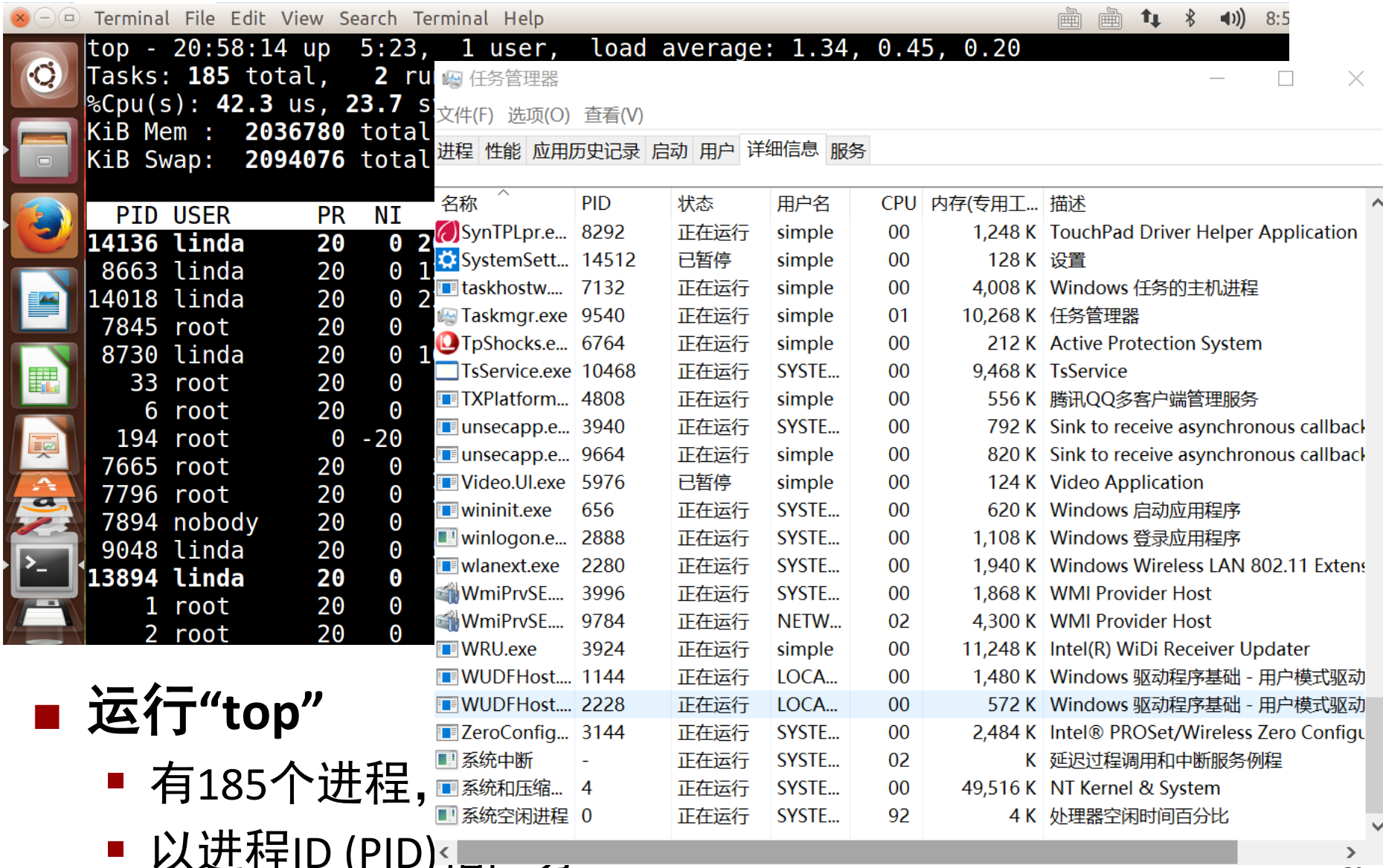


多重处理:假象(Multiprocessing: The Illusion☺)



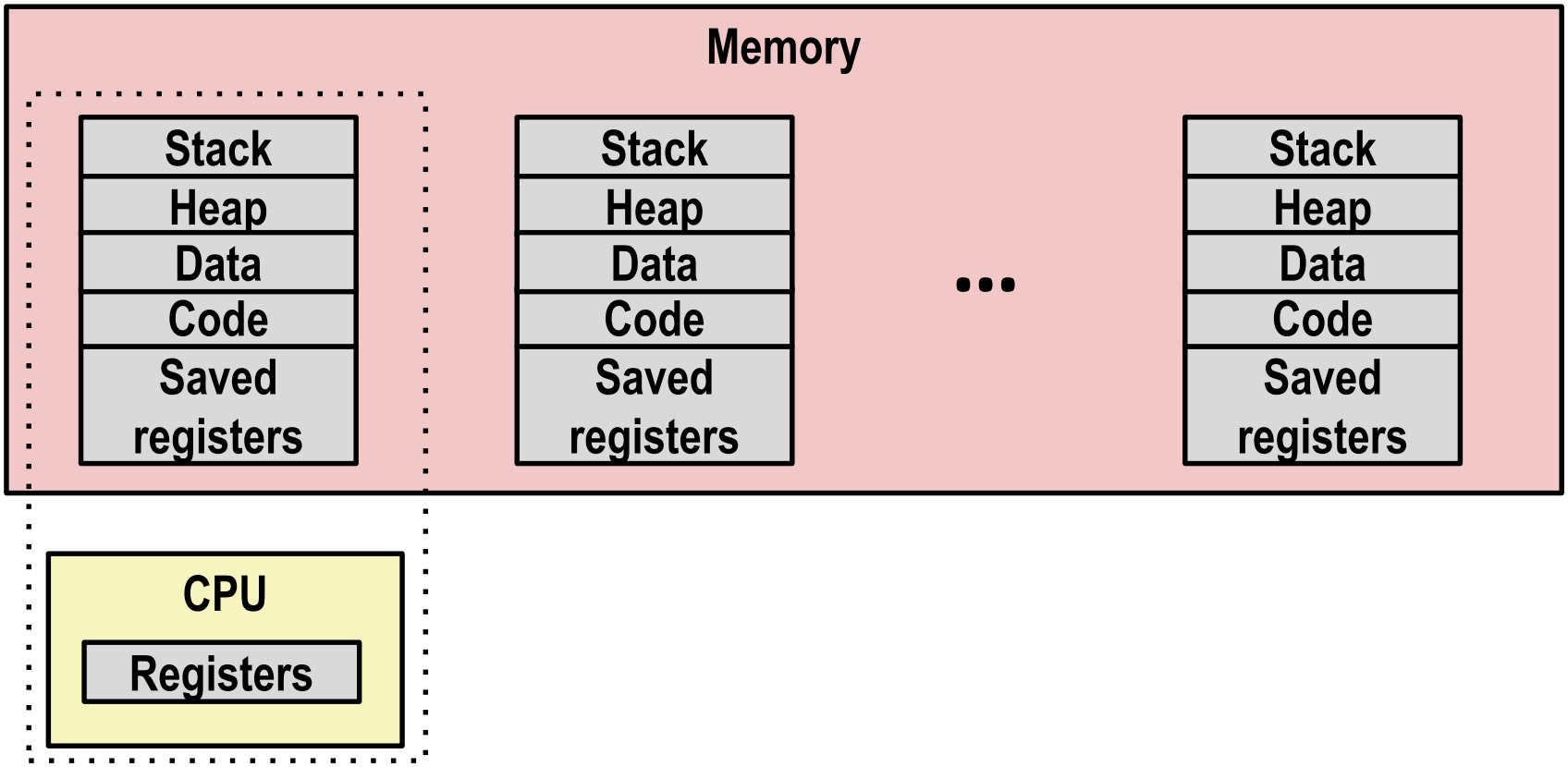
- 计算机同时运行许多进程
  - 单/多用户的应用程序
    - Web 浏览器、email客户端、编辑器 …
  - 后台任务(Background tasks)
    - 监测网络和 I/O 设备

多重处理的例子



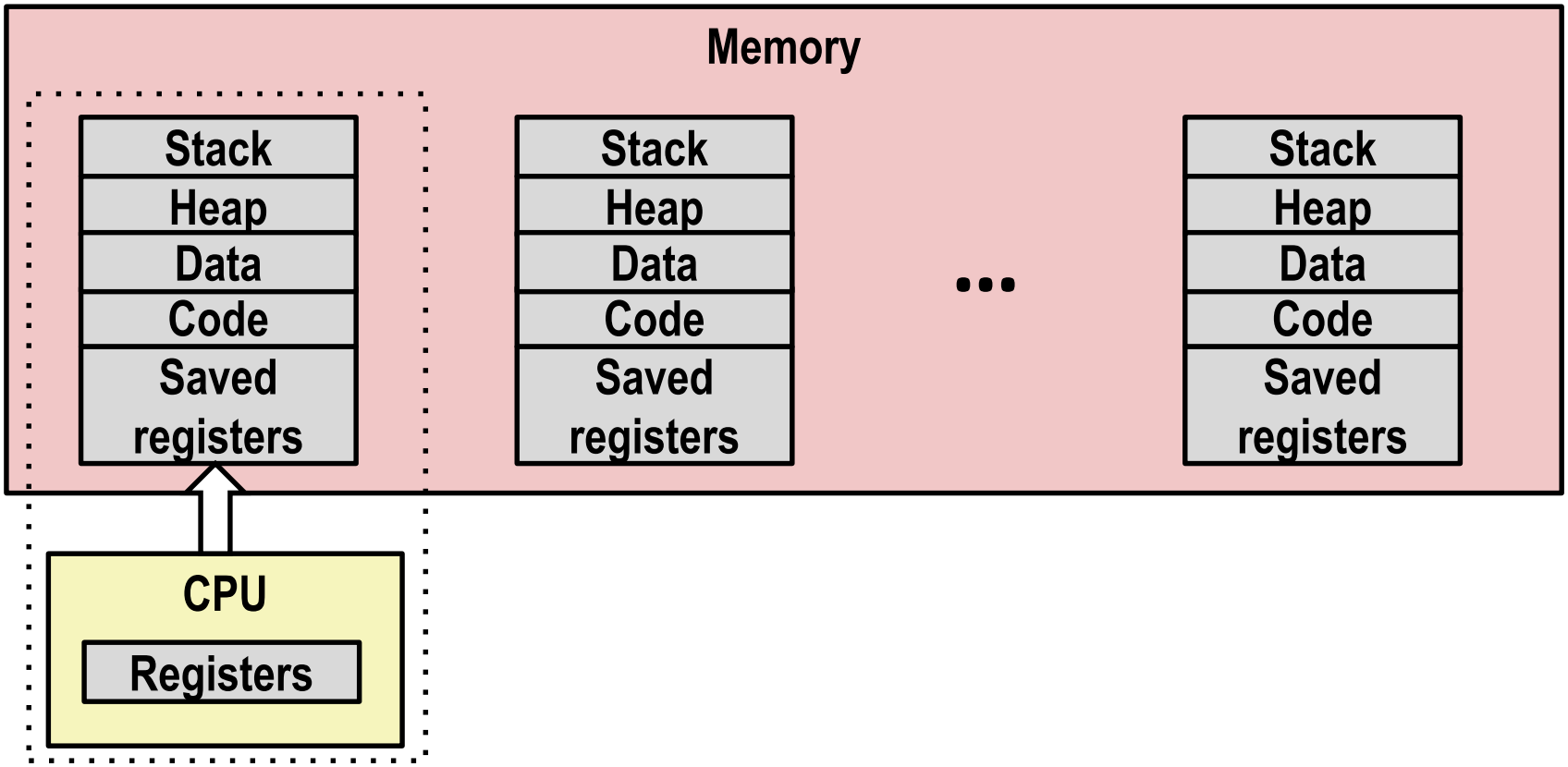
- 运行“top”
  - 有185个进程，
  - 以进程ID (PID)

多重处理的真相



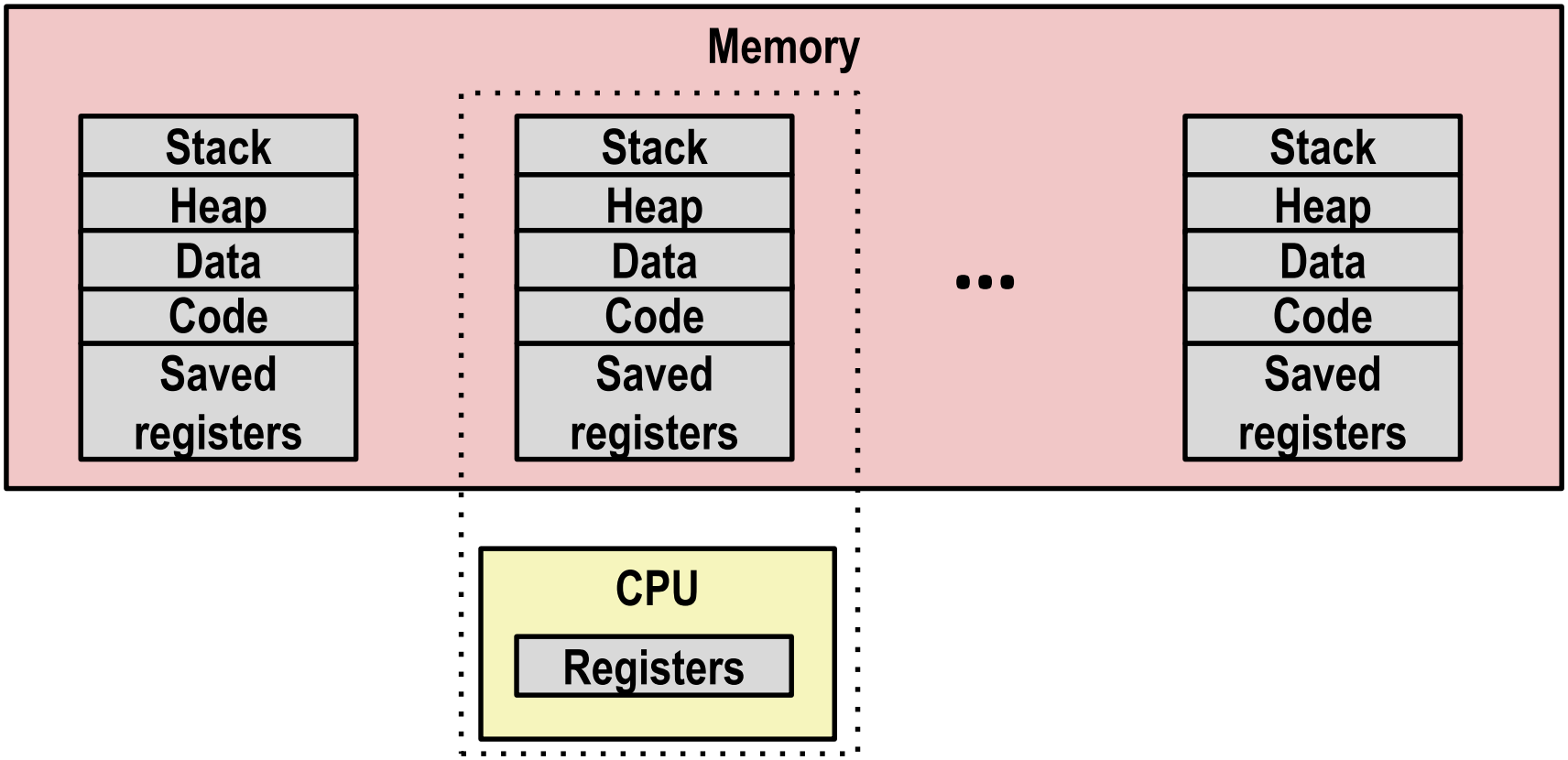
- 单处理器在并发地执行多个进程
  - 进程交错执行(multitasking)
  - 地址空间由虚拟内存系统管理 (later in course)
  - 未执行进程的寄存器值保存在内存中

多重处理的真相



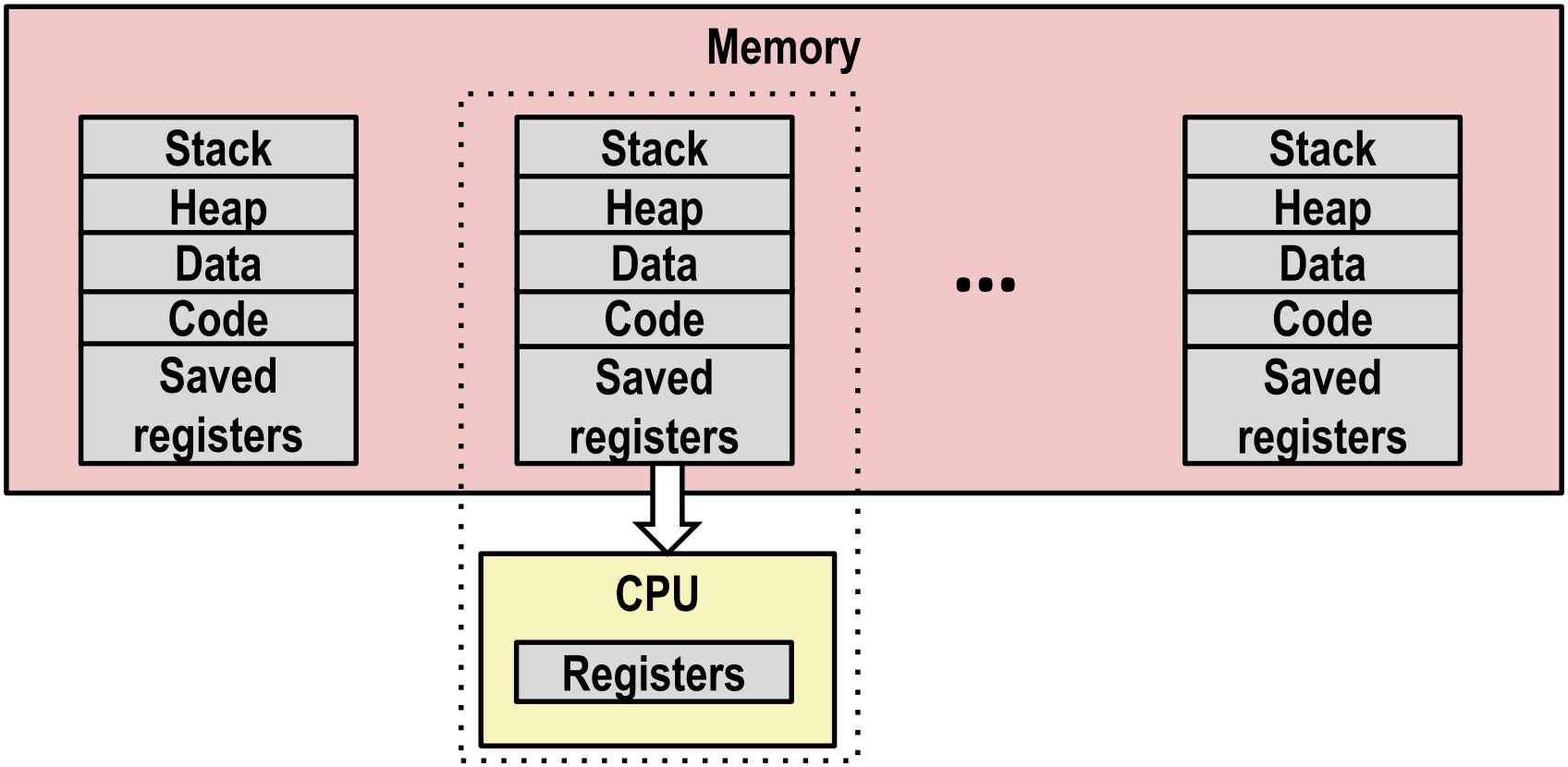
- 寄存器当前值保存到内存

多重处理的真相



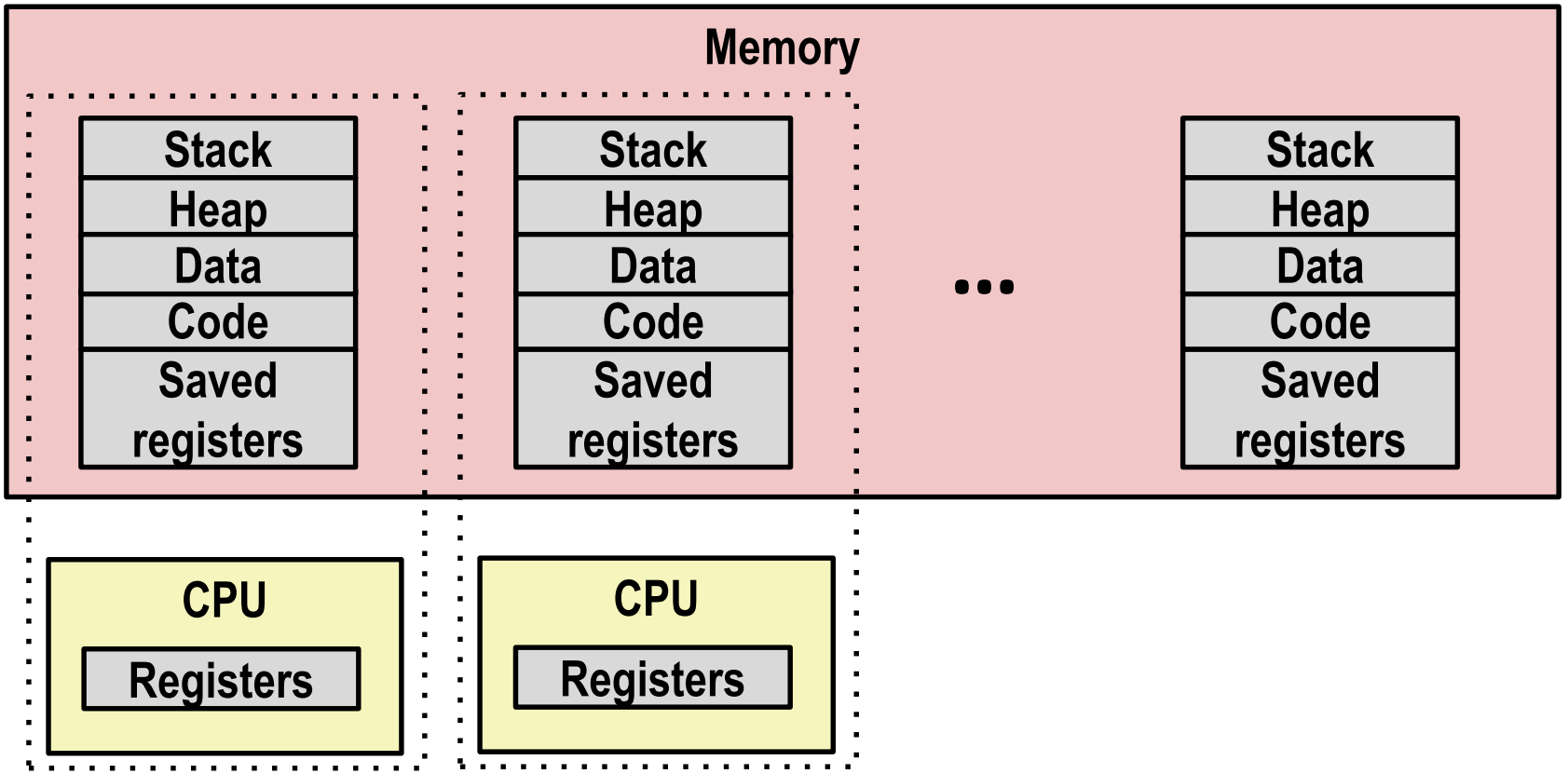
- 调度下一个进程执行

多重处理的真相



- Load saved registers and switch address space (context switch)

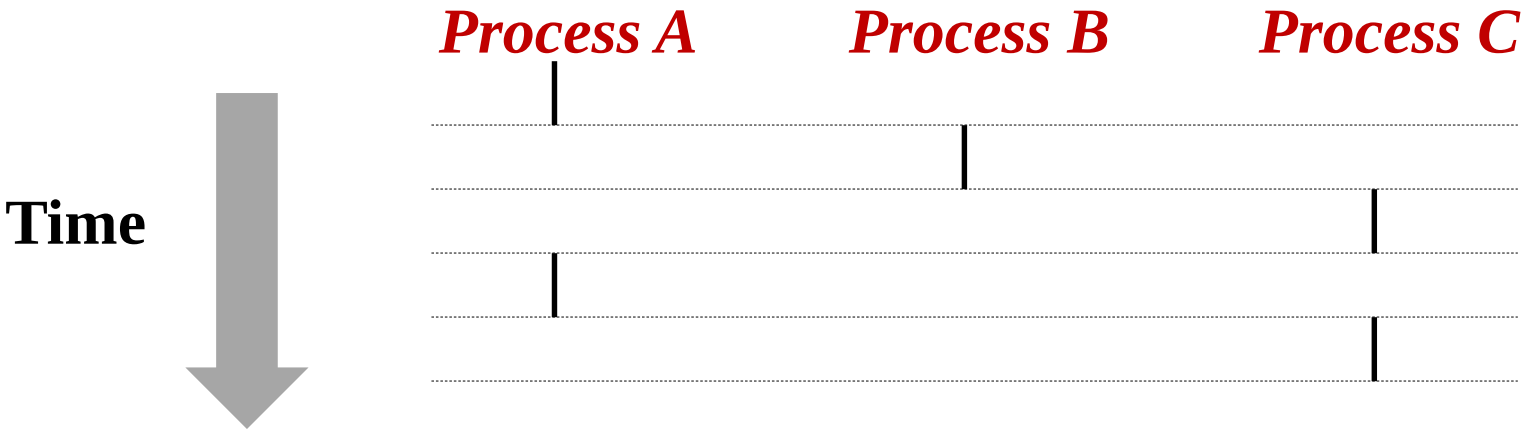
多重处理的真相



- 多核处理器
  - 单个芯片有多个CPU
  - 共享主存、有的还共享cache
  - 每个核可以执行独立的进程 kernel负责处理器的内核调度

并发进程(Concurrent Processes)

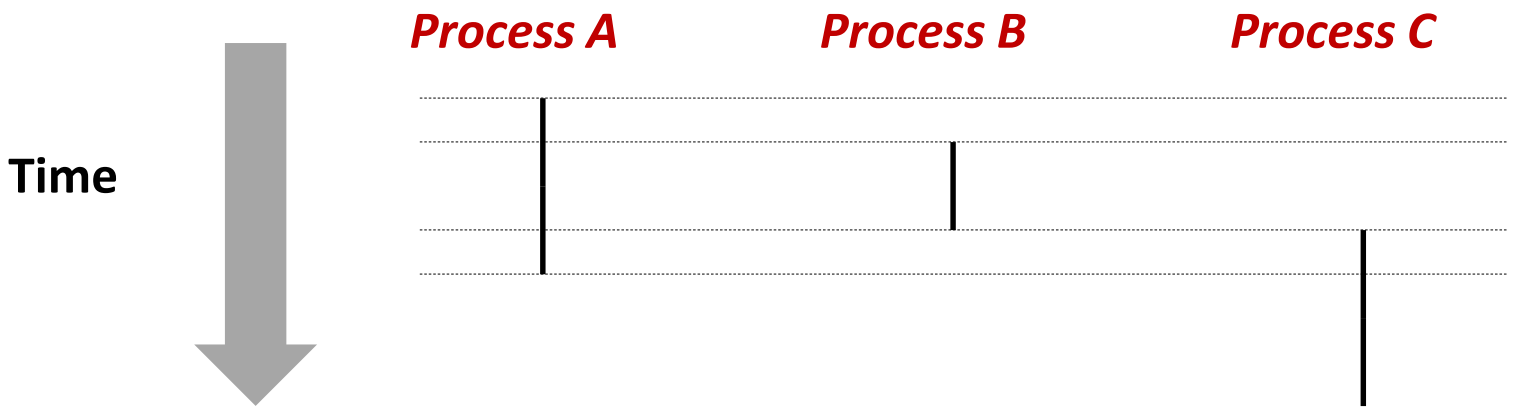
- 每个进程是个逻辑控制流
- 如果两个逻辑流在时间上有重叠，则称这两个进程是并发的(并发进程)
- 否则他们是顺序的



示例（单核CPU）：A & B, A & C是并发关系
B & C是顺序关系

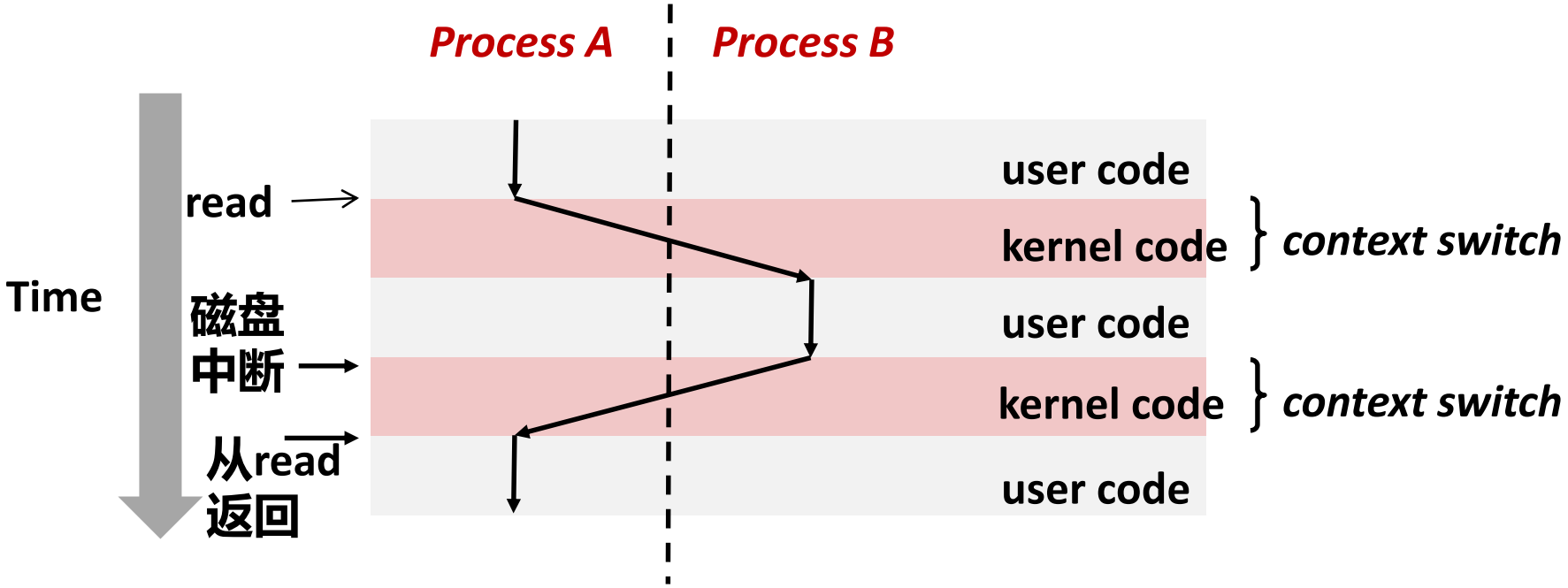
用户角度看并发进程

- 并发进程的控制流物理上是不相交的
- 然而，我们可以认为并发进程是并行运行的



上下文切换 (Context Switching)

- 进程由常驻内存的操作系统代码块(称为内核)管理
  - ★内核不是一个单独的进程，而是作为现有进程的一部分运行
- 控制流通过*上下文切换*从一个进程传递到另一个进程



主要内容

- 异常控制流(Exceptional Control Flow)
- 异常(Exceptions)
- 进程(Processes)
- **进程控制(Processes Control)**

系统调用错误的处理

- 当Linux系统级函数遇到错误时，通常返回-1并设置全局整数变量 **errno** 来标示出错原因.
- 硬性规定:
  - 必须检查每个系统级函数的返回状态
  - 只有少数是返回空的函数
- Example:

```
    if ((pid = fork()) < 0) {
        fprintf(stderr, "fork error: %s\n",
strerror(errno));
        exit(0);
    }
```

报错函数

- 通过定义下面的错误报告函数，能够在某种程度上简化代码:

```
void unix_error(char *msg) /* Unix-style error */
{
    fprintf(stderr, "%s: %s\n", msg, strerror(errno));
    exit(0);
}
```

对fork的调用：从4行缩减到2行

```
if ((pid = fork()) < 0)
    unix_error("fork error");
```

错误处理包装函数(Error-handling Wrappers)

- 通过使用错误处理包装函数可以更进一步简化代码:

```
pid_t Fork(void)
{
    pid_t pid;

    if ((pid = fork()) < 0)
        unix_error("Fork error");
    return pid;
}
```

对fork的调用缩减到1行

```
pid = Fork();
```

获取进程ID（Obtaining Process IDs）

- pid_t getpid(void)
  - 返回当前进程的PID
- pid_t getppid(void)
  - 返回父进程的PID

创建和终止进程

从程序员的角度，我们可以认为进程总是处于下面三种状态之一

- 运行Running
  - Process is either executing, or waiting to be executed and will eventually be *scheduled* (i.e., chosen to execute) by the kernel

    进程要么在CPU上执行，要么在等待被执行且最终会被操作系统内核调度
- 停止Stopped
  - 进程的执行被挂起且不会被调度，直到收到新的信号
- 终止Terminated
  - 进程永远地停止了

终止进程

- 进程会因为三种原因终止:
  - 收到一个信号，该信号的默认行为是终止进程
  - 从主程序返回
  - 调用**exit**函数

- **void exit(int status)**
  - 以**status**退出状态来终止进程
  - 常规的：正常返回状态为0，错误为非零
  - 另一种设置退出状态的方法是从主程序中返回一个整数值
- **exit** 函数不返回

创建进程

- 父进程通过调用**fork**函数创建一个新的运行的子进程
- **int fork(void)**
  - 子进程返回0，父进程返回子进程的PID
  - 新创建的子进程几乎但不完全与父进程相同:
    - 子进程得到与父进程虚拟地址空间相同的(但是独立的)一份副本
    - 子进程获得与父进程任何打开文件描述符相同的副本
    - 子进程有不同于父进程的PID
- **fork**函数：被调用一次，却返回两次

fork Example

fork.c

```
int main()
{
    pid_t pid;
    int x = 1;

    pid = Fork();
    if (pid == 0) {  /* Child */
        printf("child : x=%d\n", ++x);
            exit(0);
    }

    /* Parent */
    printf("parent: x=%d\n", --x);
    exit(0);
}
```

```
linux> ./fork
parent: x=0
child : x=2
```

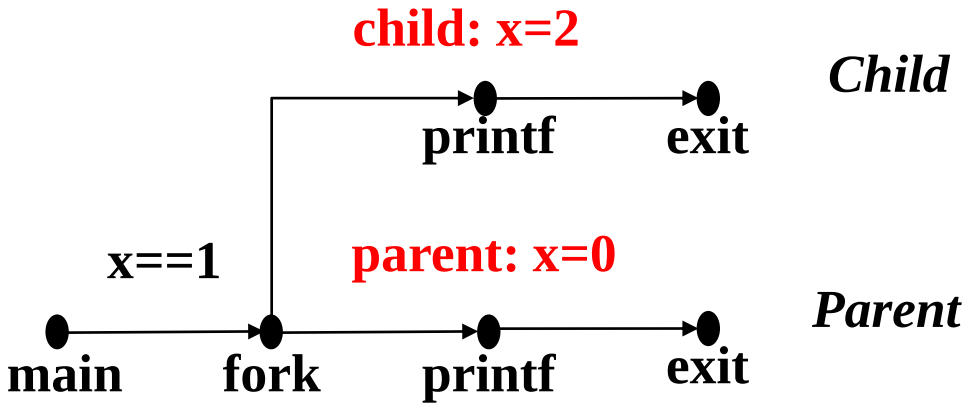
- **调用一次，返回两次**
- **并发执行**
  - 不能预测父进程与子进程的执行顺序
- **相同但是独立的地址空间**
  - **fork**返回时（第6行），**x**在父进程和子进程中都为1
  - 后面，父进程和子进程对x所做的任何改变都是独立的
- **共享文件**
  - **stdout**文件在父、子进程是相同的

用进程图(Process Graph)刻画`fork`

- 进程图是捕获并发程序中语句偏序的有用工具:
  - 每个顶点对应一条语句的执行
  - 有向边a -> b 表示语句 a 发生在语句 b 之前
  - 边上可以标记信息如变量的当前值
  - `printf` 语句的顶点可以标记上printf的输出
  - 每张图从一个没有入边的顶点开始
- 图的任何拓扑排序对应于程序中语句的一个可行的全序排列.
  - 所有顶点的总排序，这些顶点的每条边都是从左到右的

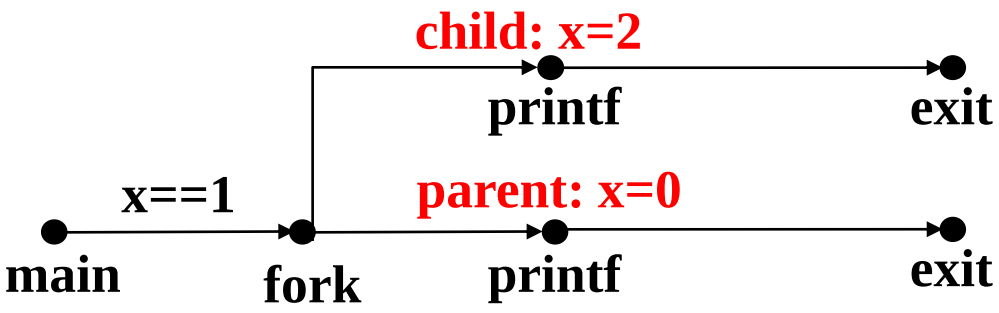
进程图

```
int main()                                    fork.c
{
    pid_t pid;
    int x = 1;

    pid = Fork();
    if (pid == 0) {  /* Child */
        printf("child : x=%d\n", ++x);
            exit(0);
    }

    /* Parent */
    printf("parent: x=%d\n", --x);
    exit(0);
}
```

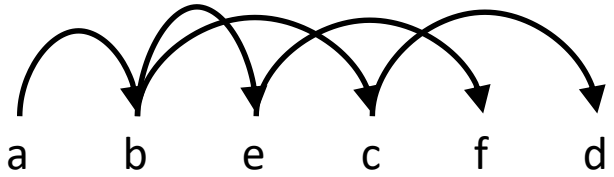


解释进程图

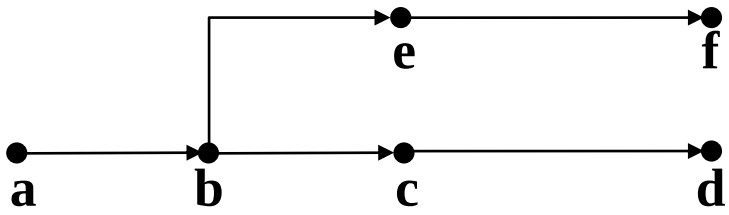
- **Original graph:**



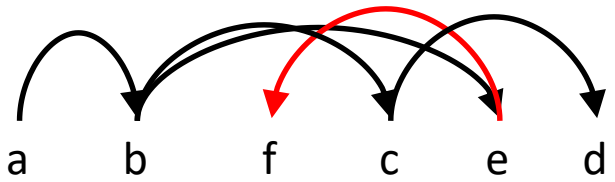
可行的全序排列



- **Relabled graph:**



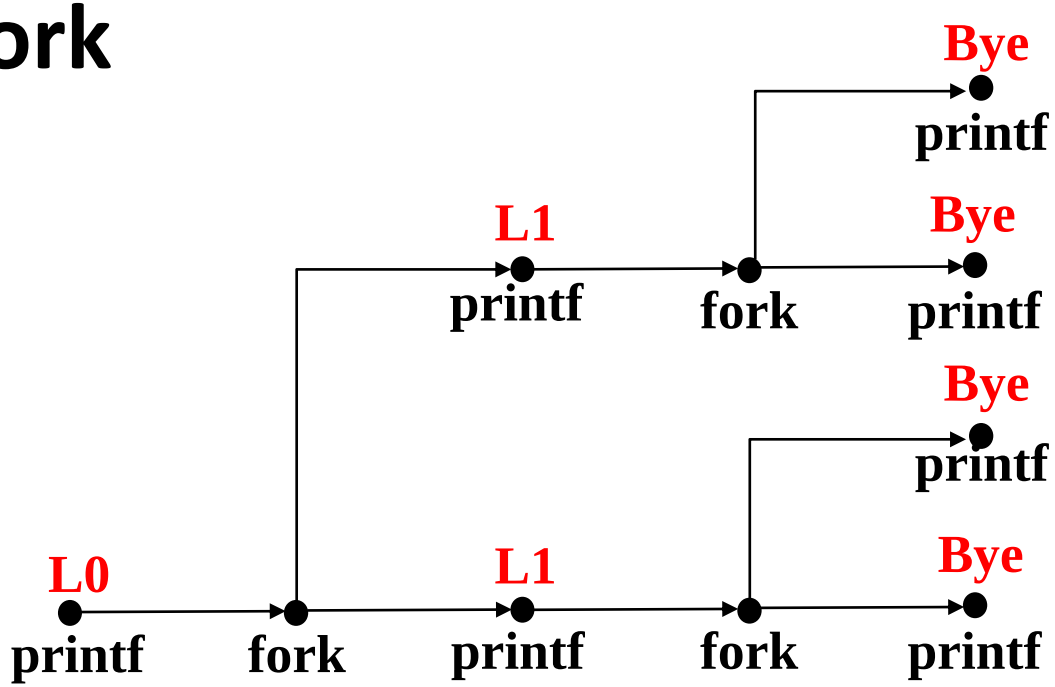
不可行的全序排列



两个连续的fork

forks.c

```
void fork2()
{
    printf("L0\n");
    fork();
    printf("L1\n");
    fork();
    printf("Bye\n");
}
```



可能的输出:

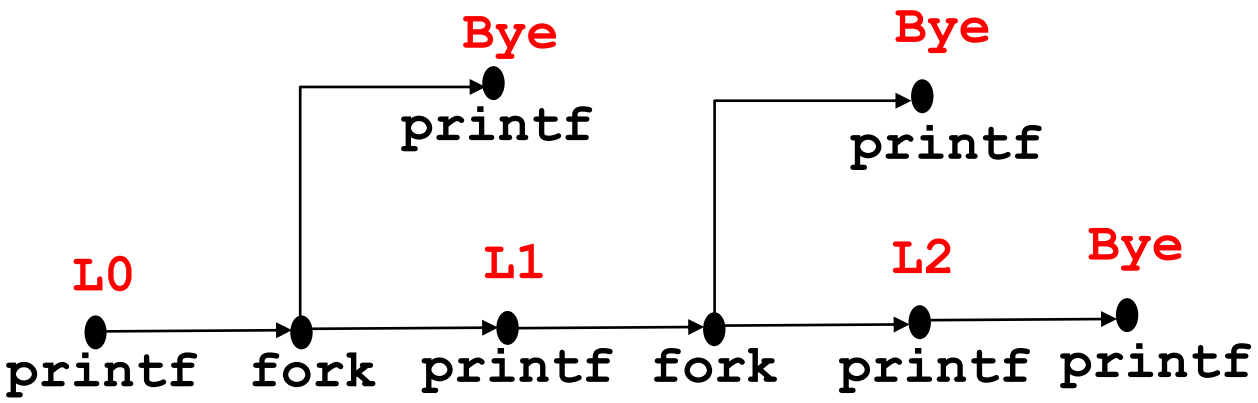
L0
L1
Bye
Bye
L1
Bye
Bye

不可能的输出:

L0
Bye
L1
Bye
L1
Bye
Bye

父进程中的嵌套fork调用

forks.c




```
void fork4()
{
    printf("L0\n");
    if (fork() != 0) {
        printf("L1\n");
        if (fork() != 0) {
            printf("L2\n");
        }
    }
    printf("Bye\n");
}
```

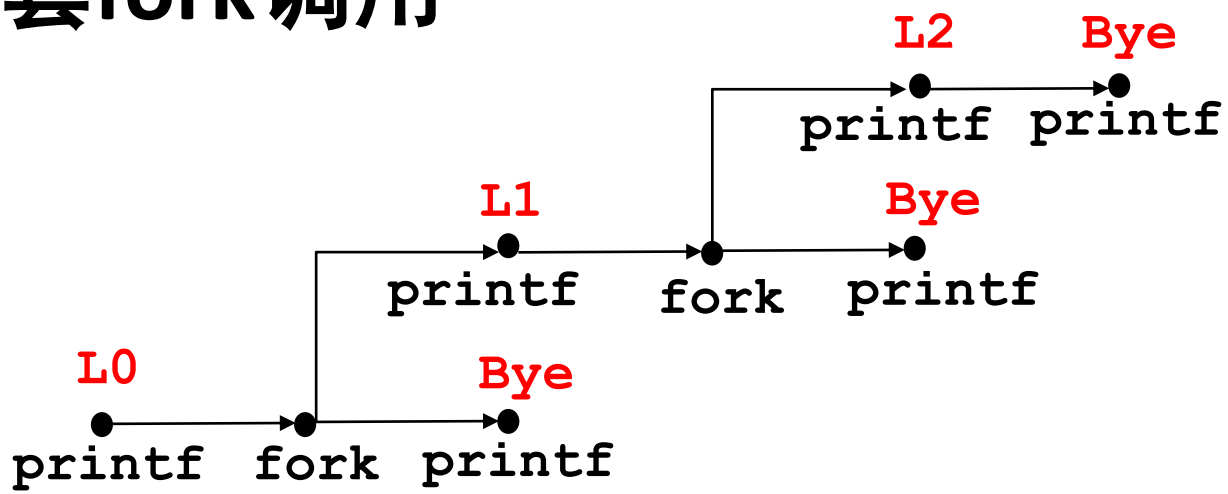
可能的输出:

L0
L1
Bye
Bye
L2
Bye

不可能的输出:

L0
Bye
L1
Bye
Bye
L2

子进程中的嵌套fork调用



forks.c

```
void fork5()
{
    printf("L0\n");
    if (fork() == 0) {
        printf("L1\n");
        if (fork() == 0) {
            printf("L2\n");
        }
    }
    printf("Bye\n");
}
```

可能的输出:

L0
Bye
L1
L2
Bye
Bye

不可能的输出:

L0
Bye
L1
Bye
Bye
L2

回收子进程(Reaping Child Processes)

- 想法
  - 当进程终止时，它仍然消耗系统资源
    - Examples: Exit status, various OS tables(占用内存)
  - 称为 “僵尸zombie”进程
    - 活着的尸体，半生半死
- 回收 (Reaping)
  - 父进程执行回收(using wait or waitpid)
  - 父进程收到子进程的退出状态
  - 内核删掉僵死子进程

回收子进程(Reaping Child Processes)

- 父进程不回收子进程的后果：
  - 如果父进程没有回收它的僵死子进程就终止了，内核安排init进程去回收它们(init进程PID为1，系统启动时创建，不会终止，是所有进程的祖先)
  - 长时间运行的进程应当主动回收它们的僵死子进程
    - e.g., shells and servers

僵死进程

```
void fork7() {
    if (fork() == 0) {          /* Child */
        printf("Terminating Child, PID =
%d\n", getpid());
        exit(0);
    } else {
        printf("Running Parent, PID =
%d\n", getpid());
        while (1)               ; /* Infinite
loop */
    }
}
```

forks.c

```
linux> ./forks7 &
[1] 6639
Running Parent, PID = 6639
Terminating Child, PID = 6640
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
 6585 ttyp9    00:00:00 tcsh
 6639 ttyp9    00:00:03 forks
 6640 ttyp9    00:00:00 forks <defunct>
 6641 ttyp9    00:00:00 ps
linux> kill 6639
[1]    Terminated
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
 6585 ttyp9    00:00:00 tcsh
 6642 ttyp9    00:00:00 ps
```

- ps命令现实的子进程标记为“defunct”即，僵死进程
- 杀死父进程，从而让init回收子进程

非终止子进程

```
void fork8(){
    if (fork() == 0) {          /* Child */
        printf("Running Child, PID = %d\n",
               getpid());
        while (1)               ; /* Infinite loop */
    } else {          printf("Terminating Parent, PID
= %d\n",
                          getpid());
                          exit(0);
    }
}
```

forks.c

```
linux> ./forks 8
Terminating Parent, PID = 6675
Running Child, PID = 6676
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
 6585 ttyp9    00:00:00 tcsh
 6676 ttyp9    00:00:06 forks
 6677 ttyp9    00:00:00 ps
linux> kill 6676
linux> ps
  PID TTY          TIME CMD
 6585 ttyp9    00:00:00 tcsh
 6678 ttyp9    00:00:00 ps
```

- 父进程终止，但子进程仍处于活动状态
- 必须明确地杀死子进程，否则将无限持续地运行

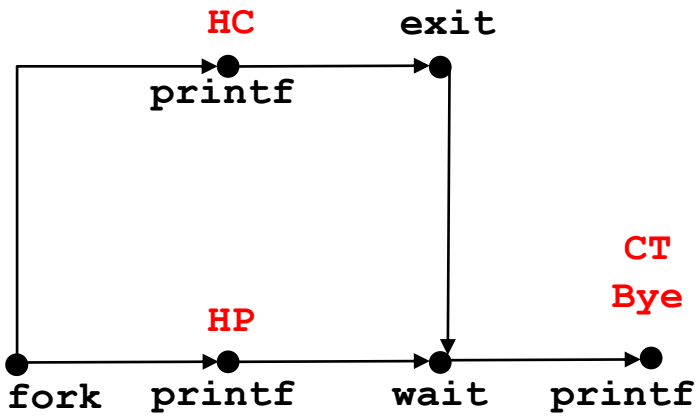
与子进程同步：wait

- 父进程通过wait函数回收子进程

- **int wait(int *child_status)**
  - 挂起当前进程的执行直到它的一个子进程终止
  - 返回已终止子进程的 **pid**
  - 如 **child_status != NULL**, **则在该指针指向的整型量中写入关于终止原因和退出状态的信息**):
    - 用wait.h头文件中定义的宏来检查
      - WIFEXITED, WEXITSTATUS, WIFSIGNALED, WTERMSIG, WIFSTOPPED, WSTOPSIG, WIFCONTINUED

与子进程同步：wait示例1

```
void fork9() {
    int child_status;

    if (fork() == 0) {
        printf("HC: hello from child\n");
            exit(0);
    } else {
        printf("HP: hello from parent\n");
        wait(&child_status);
        printf("CT: child has terminated\n");
    }
    printf("Bye\n");
}
```



forks.c

可能的输出:

HC
HP
CT
Bye

不可能的输出:

HP
CT
Bye
HC

与子进程同步：wait示例2

- 子进程完成结束的顺序是任意的（没有固定的顺序）
- 可用宏函数WIFEXITED和WEXITSTATUS 获取进程的退出状态信息

```
void fork10() {                                          //forks.c
    pid_t pid[N];
    int i, child_status;
    for (i = 0; i < N; i++)
        if ((pid[i] = fork()) == 0) {
            exit(100+i); /* Child */
        }
    for (i = 0; i < N; i++) { /* Parent */
        pid_t wpid = wait(&child_status);
        if (WIFEXITED(child_status))
            printf("Child %d terminated with exit status %d\n",
                   wpid, WEXITSTATUS(child_status));
        else
            printf("Child %d terminate abnormally\n", wpid);
}}
```

waitpid:等待特定进程

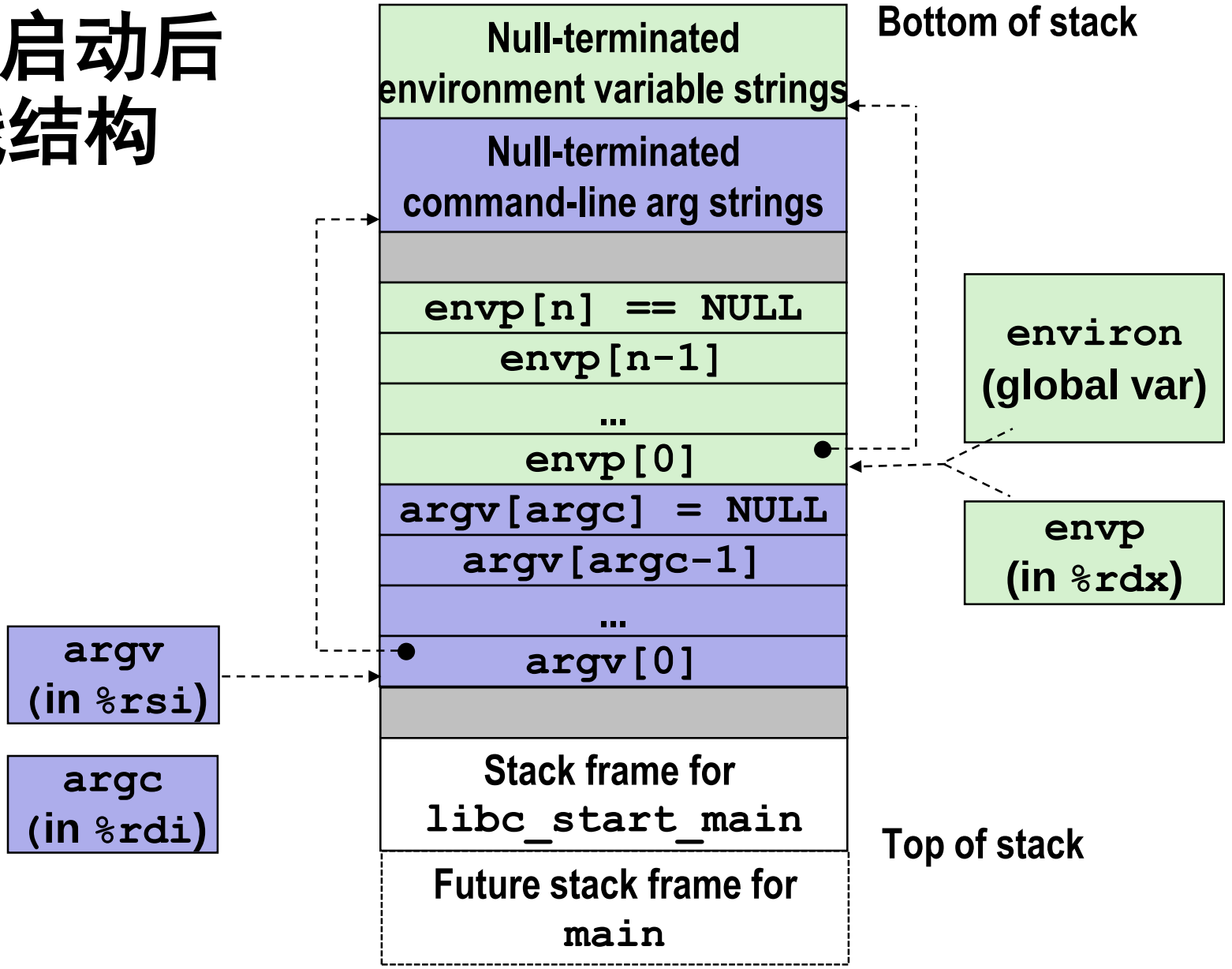
- pid_t waitpid(pid_t pid, int &status, int options)
  - 挂起当前进程直到指定进程终止才返回，有多种选项

```
void fork11() {                                          //forks.c
    pid_t pid[N];
    int i;
    int child_status;
    for (i = 0; i < N; i++)
        if ((pid[i] = fork()) == 0)
            exit(100+i); /* Child */
    for (i = N-1; i >= 0; i--) {
        pid_t wpid = waitpid(pid[i], &child_status, 0);
        if (WIFEXITED(child_status))
            printf("Child %d terminated with exit status %d\n",
                wpid, WEXITSTATUS(child_status));
        else
            printf("Child %d terminate abnormally\n", wpid);
} }
```

execve：加载并运行程序

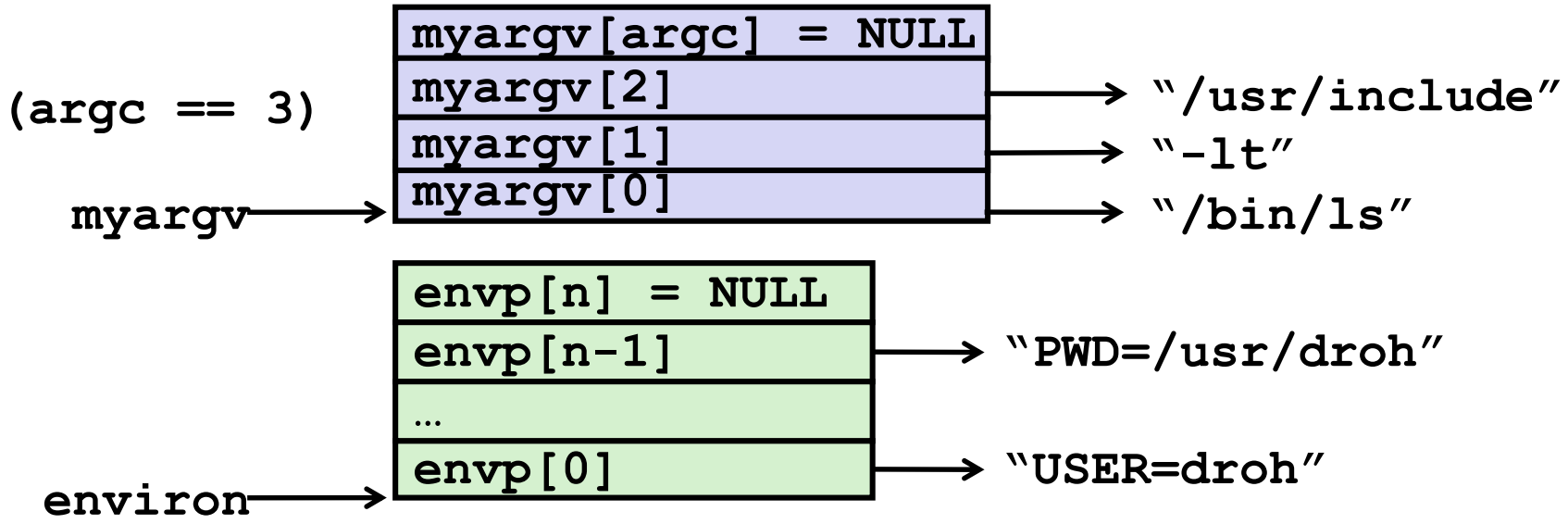
- **int execve**(char *filename, char *argv[], char *envp[])
- 在当前进程中载入并运行程序:
  - **filename:**可执行文件
    - 目标文件或脚本(用#!指明解释器,如 #!/bin/bash)
  - **argv:参数列表,惯例：argv[0]==filename**
  - **envp：**环境变量列表
    - "name=value" strings (e.g., USER=droh)
    - getenv, putenv, printenv
- 覆盖当前进程的代码、数据、栈
  - 保留：有相同的PID，继承已打开的文件描述符和信号上下文
- Called once and never returns(调用一次并从不返回)
  - …除非有错误，例如：指定的文件不存在

新程序启动后的栈结构


Null-terminated environment variable strings
Bottom of stack
Null-terminated command-line arg strings
envp[n] == NULL
envp[n-1]
...
envp[0]
environ (global var)
envp (in %rdx)
argv[argc] = NULL
argv[argc-1]
...
argv[0]
argv (in %rsi)
argc (in %rdi)
Stack frame for libc_start_main
Top of stack
Future stack frame for main

execve 示例

- 在子进程中用当前的环境执行 “/bin/ls –lt /usr/include”




```
if ((pid = Fork()) == 0) {    /* Child runs program */
    if (execve(myargv[0], myargv, environ) < 0) {
        printf("%s: Command not found.\n", myargv[0]);
        exit(1);
    }
}
```

总结

- **异常Exceptions**
  - 需要非常规控制流的事件
  - 外部产生——中断
  - 内部产生——陷阱和故障)
- **进程Processes**
  - 任何给定的时间，系统中都有多个活动进程
  - 但是，在单个内核上，一个时刻只能有一个进程执行
  - 每个进程**似乎完全**拥有处理器和私有内存空间（的控制）

总结(cont.)

- **创建进程**
  - `fork`: 1次调用、2次返回
- **进程退出**
  - `exit`:1次调用、0次返回
- **Reaping and waiting for processes**
  - Call `wait` or `waitpid`
- **加载和运行程序**
  - `execve` (或exec函数的其他变体)
  - 一次调用，0次返回（如没有错误）