

Память

Локальность данных

- **Temporal locality:** если процесс прочитал какую-то память, то скорее всего, скоро он прочитает её ещё раз
- **Spatial locality:** если процесс прочитал какую-то память, то, скорее всего, скоро он прочитает память следующую за ней

```
int s = 0;
for (size_t i = 0; i < n; i++) {
    s += arr[i];
}
```

Локальность данных

- Перемножение матриц «в лоб» – плохой способ
- Обращения к `b[k][j]` происходят не локально!
- Решение: расположить матрицу `b` по столбцам (column major layout)

```
for (size_t i = 0; i < n; i++) {  
    for (size_t j = 0; j < n; j++) {  
        for (size_t k = 0; k < n; k++) {  
            c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];  
        }  
    }  
}
```

Кэши процессора

- Мало данных, очень быстрый доступ
- Кэши иерархичны: L1, L2, L3
- Обычно из памяти зачитывается сразу *кэш-линия* (64 байта)
- LRU (least recently used) для вытеснения данных
- Вытеснение кэш-линий – сложная тема

Кэши процессора

- Регистры
- L1 кэш: per-core кэш, обычно разделён на кэш инструкций (L1i) и кэш данных (L1d), доступ: ~3 цикла (1 ns)
- L2 кэш: больше по размеру, может разделяться на несколько ядер, доступ: ~12 циклов (4 ns)
- L3 кэш: ещё больше по размеру, обычно один на процессор, доступ: ~40-80 (12-20 ns) циклов
- Доступ к DRAM: 50-100 циклов (16+ ns)

Виртуальная память

Сегментная адресация

- Физическая память делится на куски разного размера — сегменты
- За каждым процессом закрепляются несколько сегментов: сегмент с кодом, сегмент с данными, сегмент со стеком итд
- Обращения между сегментами контролируются ОС
- Выделение памяти в худшем случае требует переноса сегмента по другому адресу – что делать с уже существующими указателями? (например, для связанных списков)
- *Фрагментации памяти*

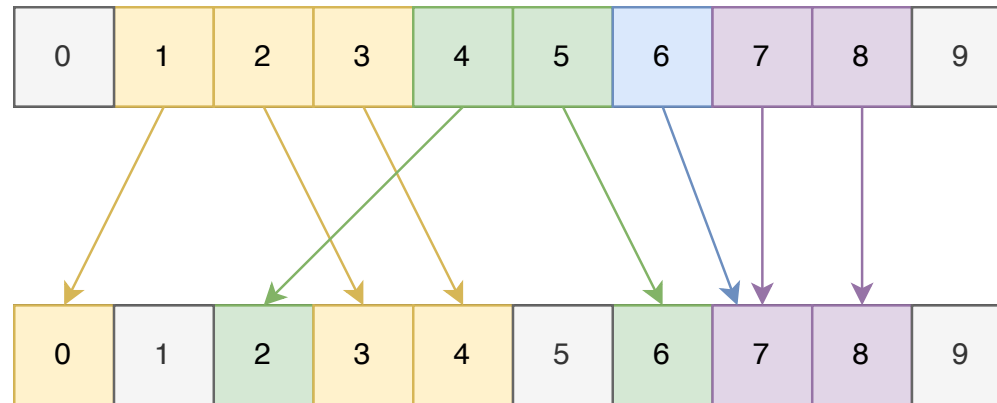


Виртуальная память и страничная адресация

- Вся физическая память делится на **фреймы** — куски равного размера (4096 байт на x86)
- Каждому процессу выделяется своё *отдельное адресное пространство* (от 0 до 2^{64} байт)
- Виртуальная память делится на **страницы** аналогично фреймам
- Каждой странице в адресном пространстве может соответствовать какой-то фрейм

Виртуальная память

- Последовательные куски в виртуальной памяти могут быть непоследовательными в физической
- Две страницы могут быть замаплены в один и тот же фрейм
- Фрейм может иметь несколько образов в разных адресных пространствах (разделяемая память)



Страничная адресация

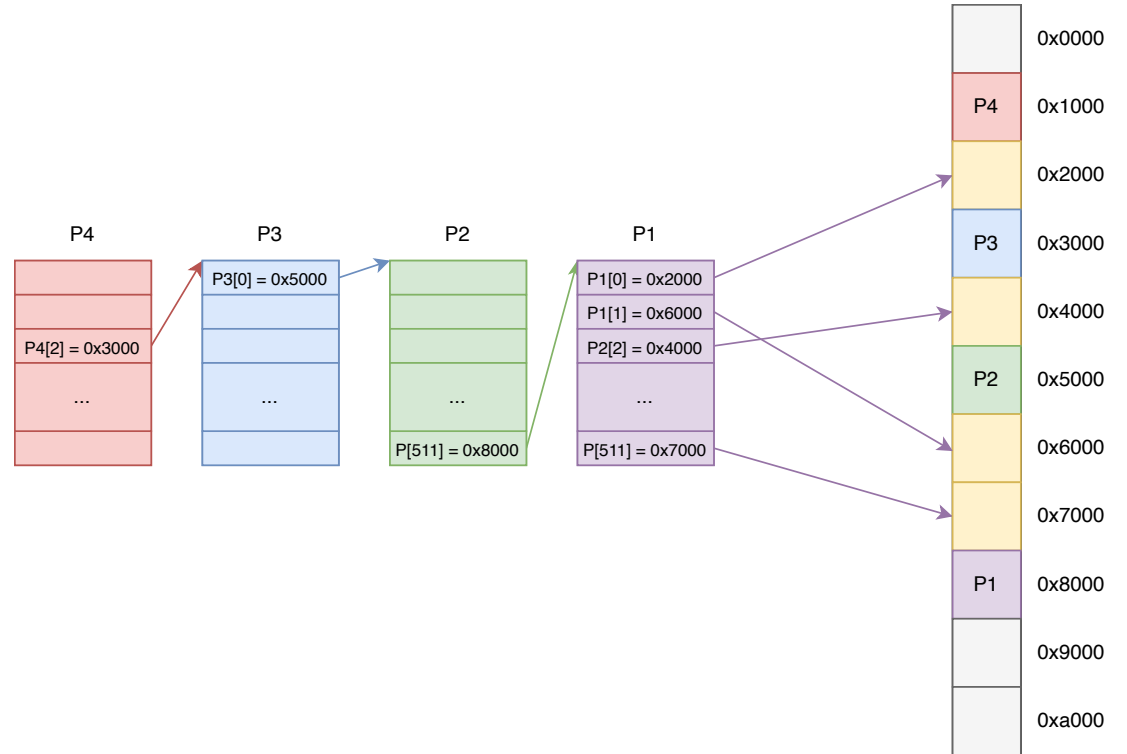
- Как хранить отображение страниц во фреймы?
- Всего существует $\frac{2^{64}}{2^{12}} = 2^{52}$ страниц памяти
- Если каждая страница описывается 8 байтами, то потребуется 2^{60} байт (эксабайт) памяти
- Нужен более экономный способ хранить это отображение!

Hierarchical page tables

- Идея: давайте сделаем многоуровневые таблицы: сначала поделим всё пространство на части, каждую из этих частей ещё на части итд
- Не храня лишние «дыры» мы будем экономить место

x86: 4-level page tables

- x86 использует четырёхуровневые таблицы: P4, P3, P2, P1
- Каждая таблица занимает ровно 4096 байт и содержит 512 PTE (page table entry) по 8 байт
- Каждая запись ссылается на адрес следующей таблицы, последняя таблица ссылается на адрес фрейма
- Адрес текущей P4 содержит `cr3`



PTE

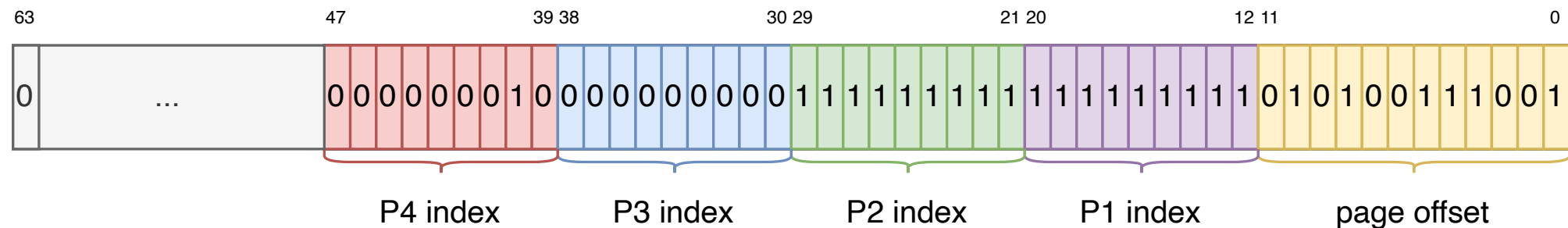
- Адрес следующей таблицы или фрейма всегда содержит 12 нулей на конце – они используются в качестве *флагов страниц*
- Они хранят **флаги страниц**:
 - $\text{PTE_PRESENT} = 1 \ll 0$: должен быть установлен, если PTE существует
 - $\text{PTE_WRITE} = 1 \ll 1$: если установлен, то страница доступна на запись
 - $\text{PTE_USER} = 1 \ll 2$: доступна ли страница из юзерспейса
 - $\text{PTE_NX} = 1 \ll 63$: если установлен, то инструкции на странице нельзя исполнять
- Флаги имеют иерархическую видимость: если в P2 $\text{PTE_WRITE} = 0$, а в P4 — 1 , то страница будет *недоступна* на запись

PTE

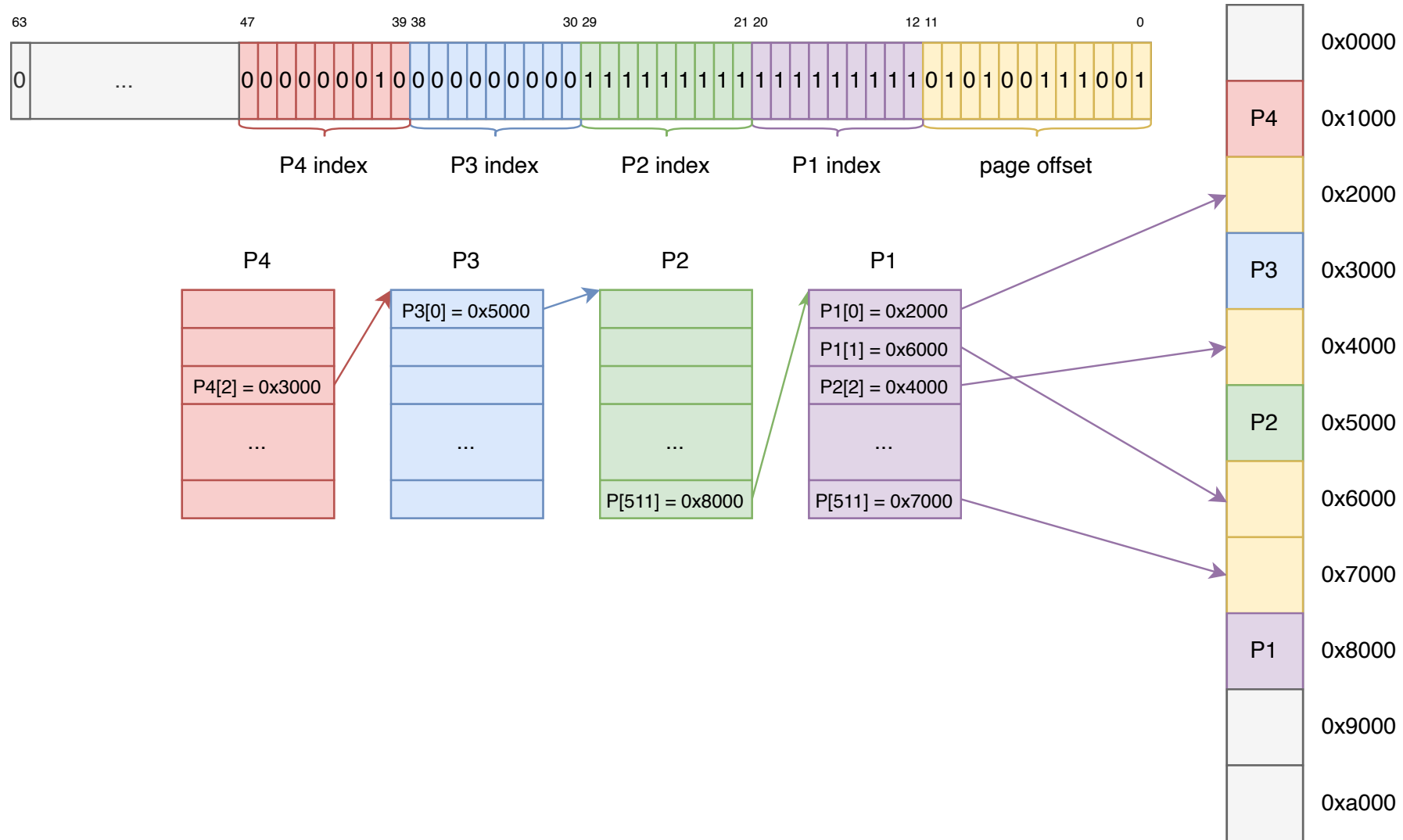
- Также существуют флаги, которые записывает *сам процессор*:
 - `PTE_ACCESSED = 1 << 5` : если PTE была использована при трансляции адреса
 - `PTE_DIRTY = 1 << 6` : если PTE была использована при трансляции адреса для записи
- ОС может обнулять самостоятельно эти флаги, чтобы отслеживать доступы

Виртуальные адреса

- Каждый адрес уникально задаёт последовательность PTE в разных таблицах + 12 бит смещения
- На индекс каждой PTE требуется 9 бит, \Rightarrow лишь $9 \times 4 + 12 = 48$ бит используется для адресации
- Все остальные биты должны копией 47 бита – канонический адрес
- Обращение к неканоническим адресам приводит к ошибке (обрабатываемой) в процессоре



Виртуальные адреса



Translation Lookaside Buffer

- TLB используется процессором для кэширования результатов трансляции виртуальных адресов
- TLB сбрасывается каждый раз, когда меняется адресное пространство

мmap и munmap

```
#include <sys/mman.h>

void* mmap(void* addr, size_t length, int prot, int flags, int fd, off_t offset);
int munmap(void* addr, size_t length);
int mprotect(void* addr, size_t len, int prot);
```

- Системные вызовы для выделения/освобождения/изменения защиты виртуальной памяти
- `mmap` выделяет область виртуальной памяти, начиная с адреса `addr` длиной `length` байт
- `prot` определяют *флаги защиты страницы*
- `flags` определяют *как будет страница замапплена*
 - Пока нас интересует `flags = MAP_ANONYMOUS` — анонимная память, т.е. виртуальная память, за которой будет скрываться оперативная память

`mmap: prot`

- `PROT_EXEC` — процессы могут выполнять код на этой странице
- `PROT_READ` — страница будет доступна на чтение
- `PROT_WRITE` — страница будет доступна на запись
- `PROT_NONE` — к странице никак нельзя будет обратиться

On-demand paging

- При `mmap` ОС не обязана выделять всю запрошенную память сразу
- Вместо Linux сохраняет у себя ещё одну структуру – `virtual memory area`, которая запоминает регион выделения
- В таблицах страниц нет выделенных адресов, поэтому процессор генерирует специальное исключение при первом обращении – *page fault*
- В терминологии Linux это называется *minor page fault*

Overcommit

- Т.к. память не выделяется сразу, процессы могут выделить памяти больше, чем RAM – такая ситуация называется *overcommit*'ом
- Linux позволяет регулировать поведение *overcommit*: полностью его выключать, ограничивать количество выделяемой памяти или давать полную свободу процессам
- `sysctl vm.overcommit_memory` / `sysctl vm.overcommit_ratio`
`vm.overcommit_kbytes`
- В Windows нет *overcommit*

Файл подкачки

- Файл подкачки (он же swap file) – специальный файл или раздел, располагающийся на диске
- Неиспользуемые или редко используемые страницы могут быть сброшены в этот файл, чтобы освободить память для других процессов
- Теперь некоторые доступы к памяти требуют чтения с диска!
- В условиях memory pressure это может приводить к странным последствиям

Отображение файлов

- Кроме выделения памяти POSIX позволяет отображать файлы в память
- Для этого в `mmap` надо указать `fd` и `offset`, `flags = MAP_FILE` или `flags = 0`
- По этому адресу памяти в текущем пространстве будет лежать (изменяемая) копия файла
- Любые изменения файла будут моментально отражены в памяти

Major page faults

- Для файловых маппингов тоже используется аналог on-demand paging: при первом обращении генерируется page fault, ядро перехватывает исключение, читает с диска файл, копирует его в память и возвращает управление в процесс
- Такой page fault называют мажорным (major page fault)

Page cache

- Механизм ядра для кэширования чтений с диска
- Page cache оперирует страницами
- Страницы с данными файла из всех процессов ссылаются на один и тот же фрейм, поэтому изменения файлов (в том числе через write) видны во всей ОС сразу
- Все записи/чтения проходят через page cache
- `write` не гарантирует, что данные были записаны на диск: изменённые страницы когда-то будут сброшены на диск (writeback)
- Страницы из page cache могут быть вытеснены, если понадобятся другим процессам

Синхронизация данных

- `fsync` гарантирует, что данные были записаны на диск
- `fdatasync` сбрасывает только данные на диск (нет гарантии о записи метаданных)
- `sync` записывает все изменения на диск

```
#include <unistd.h>

int fsync(int fd);
int fdatasync(int fd);

int sync();
```

`mmap`: `MAP_SHARED` vs `MAP_PRIVATE`

- Если указан `MAP_PRIVATE`, то маппинг – приватный: изменения в маппинге *не* видны другим процессам
- `MAP_FILE` | `MAP_PRIVATE` – запись в маппинг не будет изменять файл
- Если указан `MAP_SHARED`, то маппинг – *разделяемый*: изменения в маппинге видны другим процессам
- `MAP_SHARED` | `MAP_ANONYMOUS` страницы разделяются детьми процесса-родителя после `fork`

`mmap`: другие флаги

- `MAP_FIXED`: по-умолчанию ОС не даёт гарантий, что будет выделен именно запрашиваемый адрес при `MAP_FIXED` – гарантирует или выдаст ошибку
- `MAP_POPULATE`: выделить страницы под маппинг сразу

Виртуальная память

- Нулевой адрес нельзя замапить (NULL имеет особый смысл)
- Код и данные располагаются в одном адресном пространстве
- Разделения памяти условные (для ОС всё это – просто память)
- Фан-факт: ядро всегда располагается в верхних адресах (higher-half kernel)



Файлы в `procfs`

- `/proc/<pid>/maps` хранит текущие virtual memory areas
- `/proc/<pid>/status` содержит статус процесса, есть куча информации о памяти: пиковое потребление, сколько сей
- `/proc/<pid>/mem` представляет собой память процесса (её можно читать и писать)
- `/proc/<pid>/map_files` хранит список файлов, которые замапленны в процесс

Meltdown и Spectre

- [Meltdown и Spectre](#) — уязвимости **процессоров**, опубликованные в 2017 году
- Meltdown позволяет читать данные из ядра
- Основаны на баге *процессора* в спекулятивном исполнении инструкций
- Первоначальные уязвимости были опубликованы для Intel'овских процессоров
- Затем найдены аналогичные уязвимости для AMD и ARM

Как работает Meltdown?

```
char probes[256 * 64]; // 64 – размер кэш-линии
const char* ptr = ...; // любой адрес внутри ядра
char b = *ptr; // эта инструкция провоцирует page fault
char b2 = probes[b * 64]; // процессор спекулятивно читает эту ячейку

for (int i = 0; i < 256; i++) {
    start = hr_timer();
    char b = probes[i * 64];
    end = hr_timer();
    if (end - start <= CACHE_READ_TIME) {
        // pwned!
    }
}
```


Go raibh maith agat!