Memory model

Модель памяти

- Описывает взаимодействия потоков через разделяемую память
- Ограничивает код, который может генерировать компилятор

Зачем модель памяти?

- Абстрактная машина C и C++ до 11-го стандарта — однопоточная
- В нулевых большинство машин стали многоядерными, и библиотеки позволили использовать многопоточность в рамках одной программы
- Проблема?

Зачем модель памяти?

- Проблема!
- Код исполняется не так, как он написан в программе!
- Компиляторы и процессоры стараются, чтобы наши программы работали быстро
  - Компилятор переупорядочивает инструкции и заменяет работу с памятью на работу с регистрами
  - Процессор исполняет инструкции спекулятивно и работает с памятью максимально лениво

Пример

Во что превратится такой код?

```
int f(int* x, int* y, int *z) {
    return (*x + 1) + (*y + 1) + (*z + 1);
}
```

Пример

Во что превратится такой код?

```
int f(int* x, int* y, int *z) {
    return (*x + 1) + (*y + 1) + (*z + 1);
}
```

`clang++ -O3 a.cpp && objdump -M intel -d a.out`

```
mov    eax,DWORD PTR [rdi]
mov    ecx,DWORD PTR [rdx]
add    eax,DWORD PTR [rsi]
lea    eax,[rcx+rax*1]
add    eax,0x3
```

Зачем модель памяти?

- Код исполняется не так, как он написан в программе!
- Компиляторы и процессоры стараются, чтобы наши программы работали быстро

Это важно?

Нет, **пока наша программа однопоточная!**

Для нескольких потоков до 11-го стандарта никакой корректности не гарантировалось.

Data race

- **ячейка памяти** (memory location): объект скалярного типа или максимальная последовательность смежных битовых полей
- **конфликтующие действия** (conflicting actions): два (или более) доступа к одной ячейке памяти, как минимум одно из которых — запись
- **data race**: наличие конфликтующих действий, не связанных между собой отношением *happens-before* (про него будет дальше)

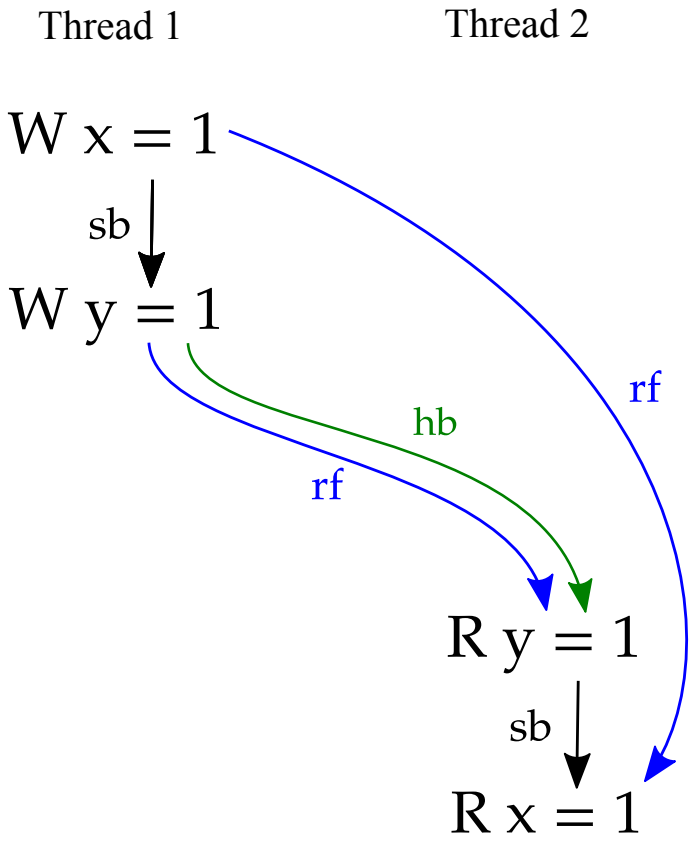
Data race

data race == undefined behaviour

Автор картинки: dbeast32

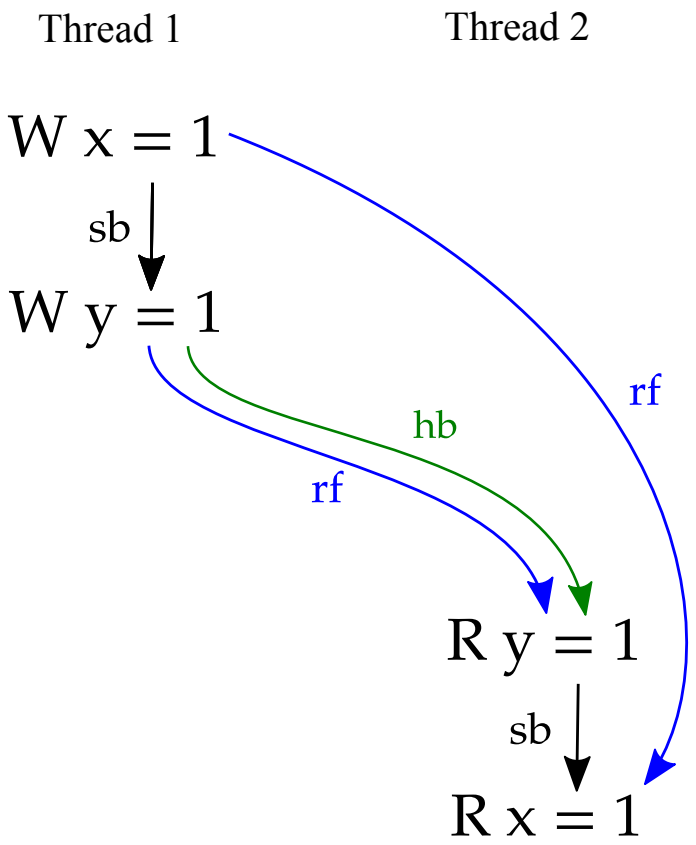
Новая семантика программ

- Исполнение программы можно представлять как орграф
  - Вершины — это действия с памятью (плюс ещё кое-что)
  - Рёбра представлют различные **отношения** между действиями с памятью



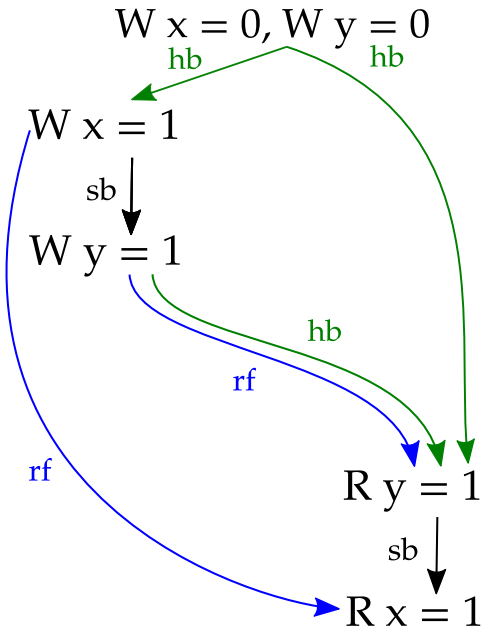
Новая семантика программ

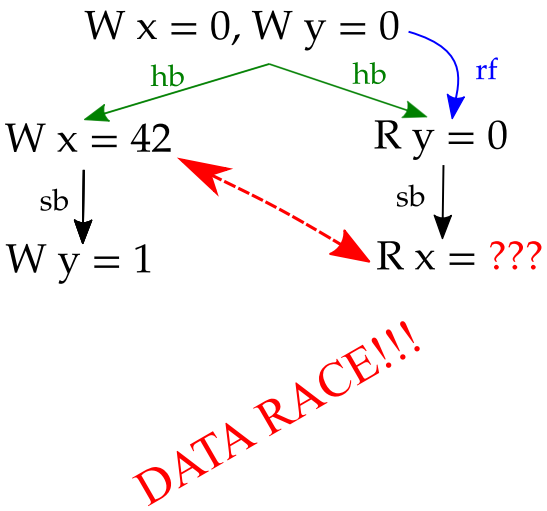
- Исполнение программы можно представлять как орграф
  - Вершины — это действия с памятью (плюс ещё кое-что)
  - Рёбра представлют различные **отношения** между действиями с памятью
- Стандарт накладывает ограничения на то, как могут быть устроены эти отношения



Новая семантика

- Все возможные графы образуют множество потенциальных исполнений
- Если хотя бы в одном исполнении data race, поведение всей программы не определено (UB)
- Иначе может реализоваться любое исполнение.





Атомарные объекты

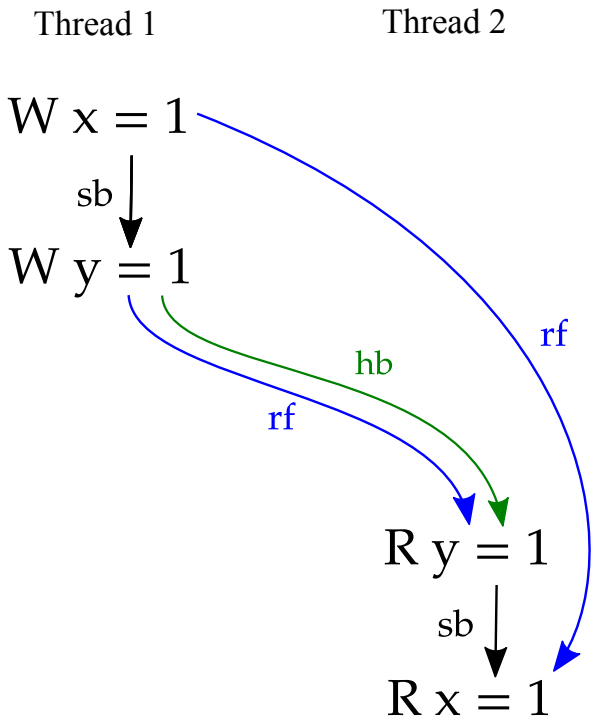
- Стандарт вводит новый тип объектов — атомарные (`std::atomic<T>`)
- Для таких объектов не бывает data race
- Плюс действия с такими объектами могут задавать дополнительные ограничения на отношения

Атомарные объекты. Memory order

- С каждым действием с атомарной переменной связан некоторый ярлычок: **memory order** — что-то вроде "силы" операции.
- В коде это члены енума `std::memory_order`. Основные:
  - `std::memory_order_seq_cst`
  - `std::memory_order_release` / `std::memory_order_acquire`
  - `std::memory_order_relaxed`

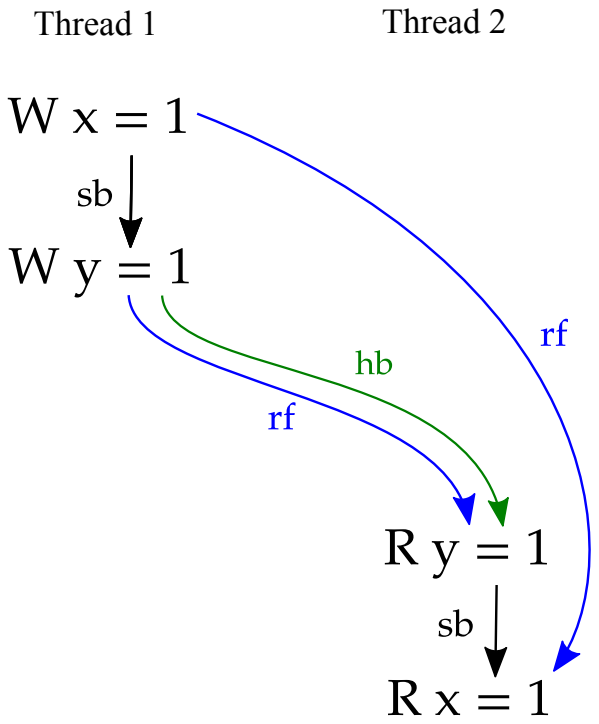
Отношение *sequenced-before* (a.k.a. *program order*)

Sequenced-before — отношение полного порядка (total order) между всеми действиями, исполняемыми одним потоком.



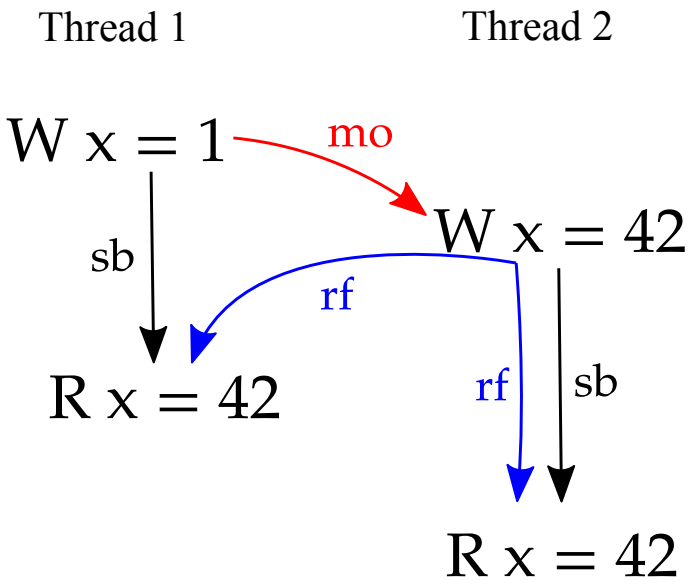
Отношение *reads-from*

Отношение *reads-from* связывает каждую операцию чтения с той операцией записи, чьё значение вернёт данная операция чтения.



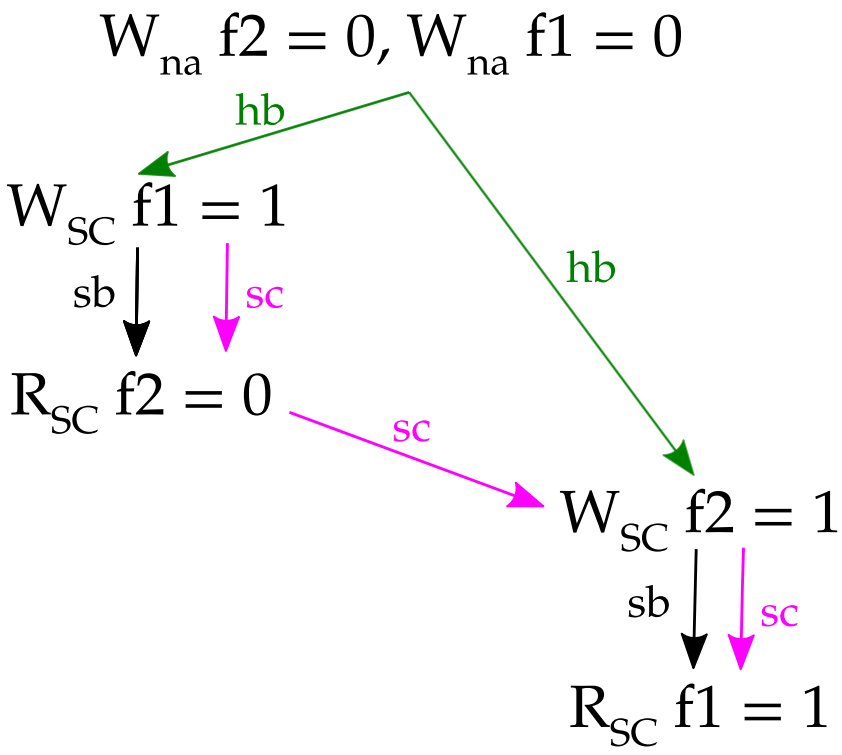
Отношение *modification-order*

Отношение *modification-order* для каждой атомарной переменной является отношением полного порядка для всех операций записи в неё.



Отношение *sc*

Отношение *sc* является отношением полного порядка между всеми *seq_cst*-действиями с любыми переменными.

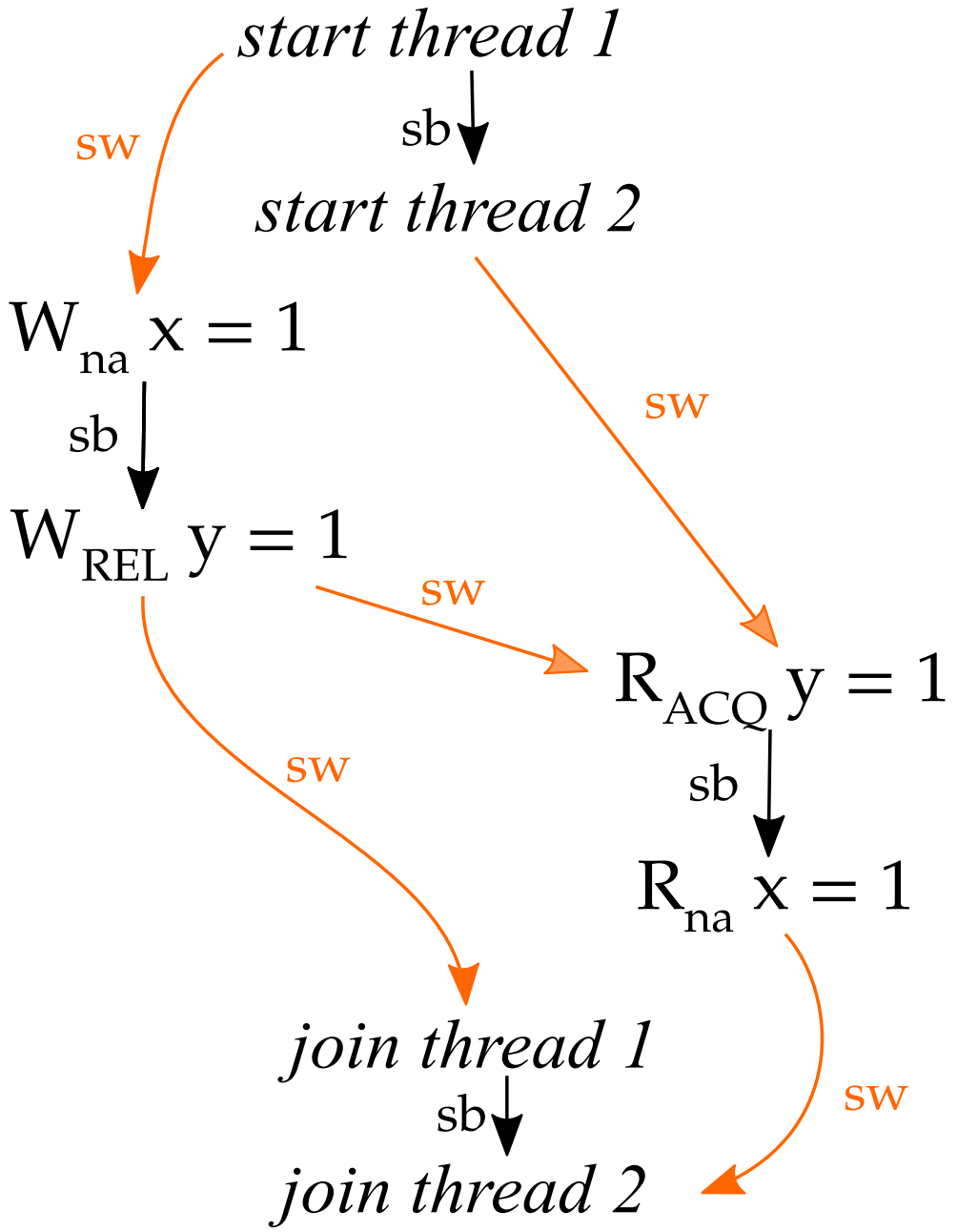


Отношение *synchronizes-with*

Отношение связывает действия, **синхронизирующиеся** друг с другом:

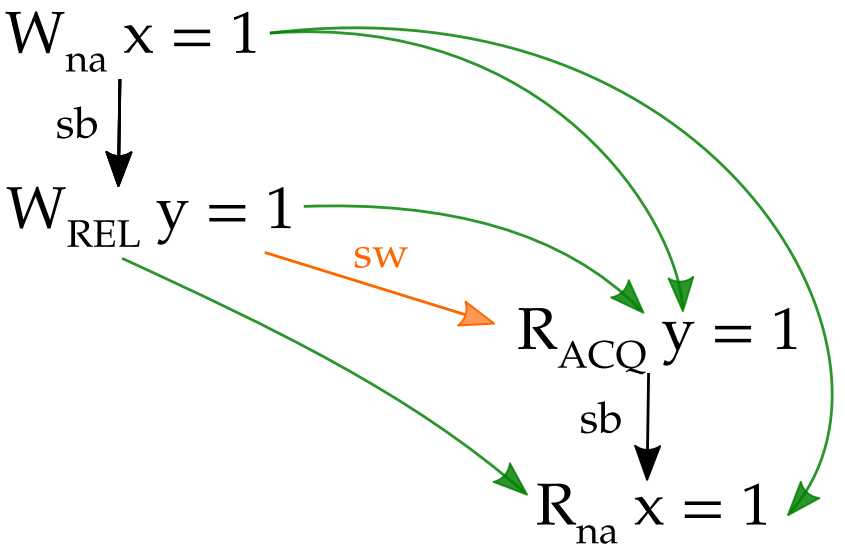
- Создание треда и первая операция в нём
- Последняя операция в треде и его join
- Отпускание мьютекса и соответствующий ему захват
- *release*-запись и соответствующее ей *acquire*-чтение (`seq_cst`-действия также относятся сюда)

Отношение *synchronizes-with*



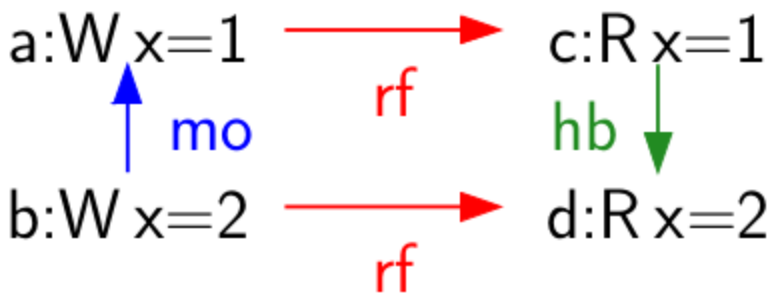
Отношение *happens-before*

Отношение *happens-before* — это транзитивно замкнутое объединение *synchronizes-with* и *sequenced-before*.

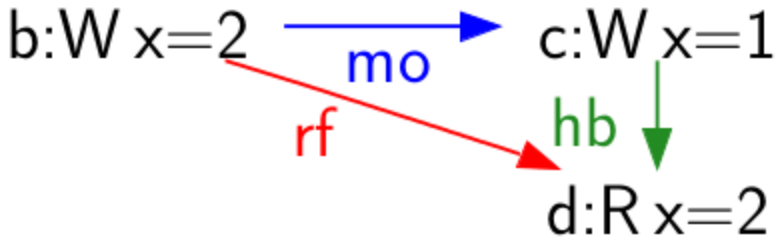


Пример ограничения: coherence

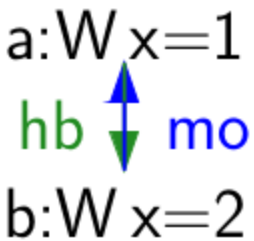
Запрещены следующие фрагменты в потенциальных исполнениях:



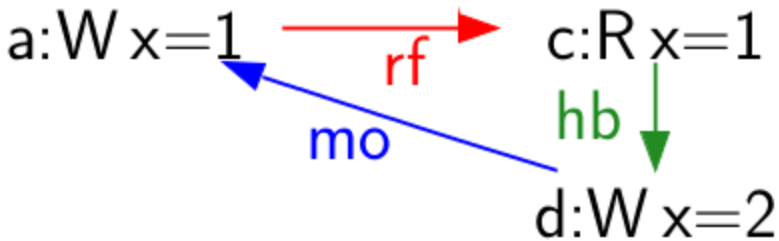
CoRR



CoWR



CoWW



CoRW

Пример ограничения: *sc*-порядок

- *sc*-порядок должен быть согласован с *happens-before* и *modification-order*
- `seq_cst`-чтение обязано прочитать значение из предыдущей (в порядке *sc*) записи

Ещё про `std::atomic<T>`

```
static constexpr bool is_always_lock_free = ...;
bool is_lock_free() const noexcept;

T load(memory_order = memory_order_seq_cst) const noexcept;
operator T() const noexcept;
void store(T, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;

T exchange(T, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;
bool compare_exchange_weak(T&, T, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;
bool compare_exchange_strong(T&, T, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;
```

Операция Compare-And-Swap (CAS)

```
bool compare_exchange_strong(T& expected, T desired) {
    if (*this == expected) {
        *this = desired;
        return true;
    } else {
        expected = *this;
        return false;
    }
}
```

Ещё про `std::atomic<T>`

Для целочисленных типов, типов с плавающей точкой и указателей у `atomic<T>` есть методы `fetch_add` и `fetch_sub`.

```
T fetch_add(TDiff, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;
T fetch_sub(TDiff, memory_order = memory_order_seq_cst) noexcept;
```

Также бывают операторы `++`, `--`, `+=`, `-=`, они эквивалентны соответствующему вызову `fetch_...`.

Relaxed memory order

- Не создаёт *happens-before*-рёбер
- Гарантирует атомарность лишь для действий с данной переменной
- Нельзя использовать для синхронизации
- Для чего можно?

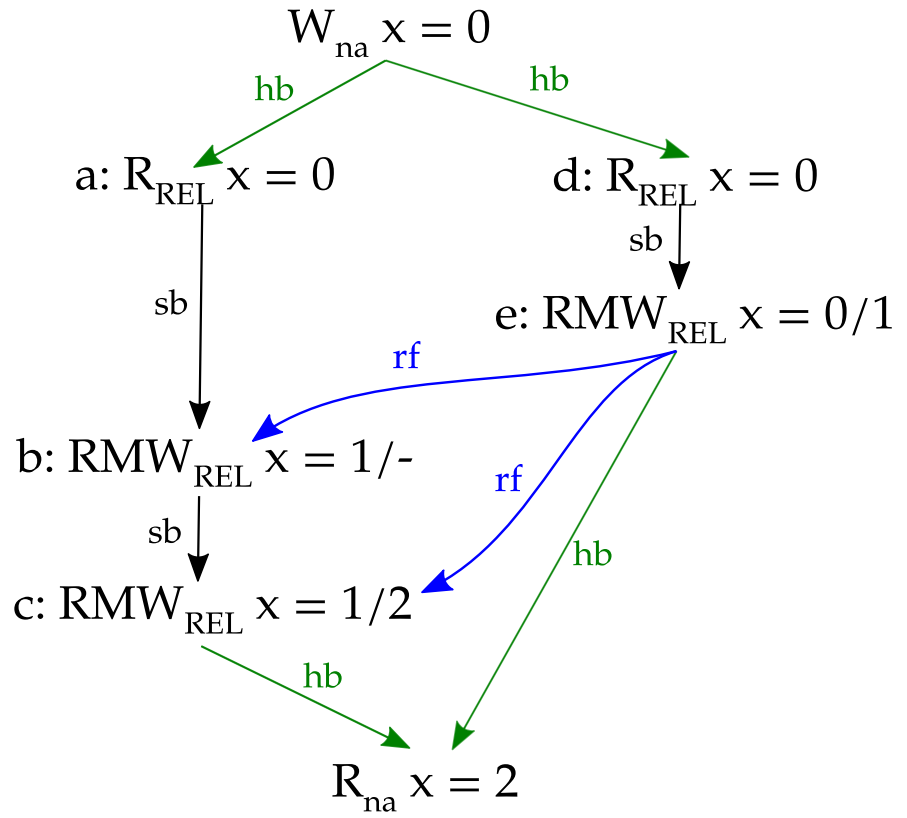
Relaxed memory order. Счётчик

Иногда годится счётчик без немедленной синхронизации (профайлинг, бенчмаркинг).

- Можно (и нужно) использовать `fetch_add(1, memory_order_relaxed)`
- В качестве упражения сделаем через `compare_exchange`

```
auto old = c.load(memory_order_relaxed);
do {
    auto success = c.compare_exchange_weak(
        old,     // old is updated here in case of failure
        old + 1,
        memory_order_relaxed);
} while (!success);
```

```
auto old = c.load(memory_order_relaxed);
do {
    auto success = c.compare_exchange_weak(
        old,     // old is updated here in case of failure
        old + 1,
        memory_order_relaxed);
} while (!success);
```



Как нельзя использовать relaxed

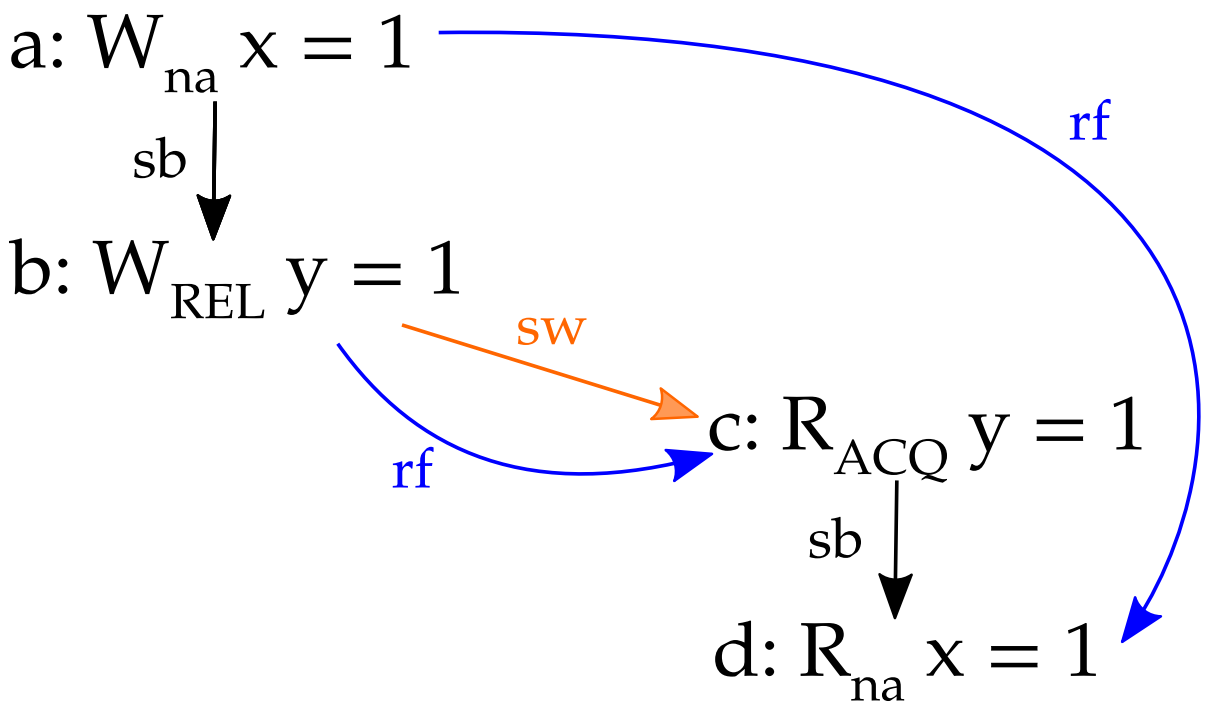
```
atomic<bool> locked;

void lock() {
    while(locked.exchange(true, memory_order_relaxed)) {}
}

void unlock() {
    locked.store(false, memory_order_relaxed);
}
```

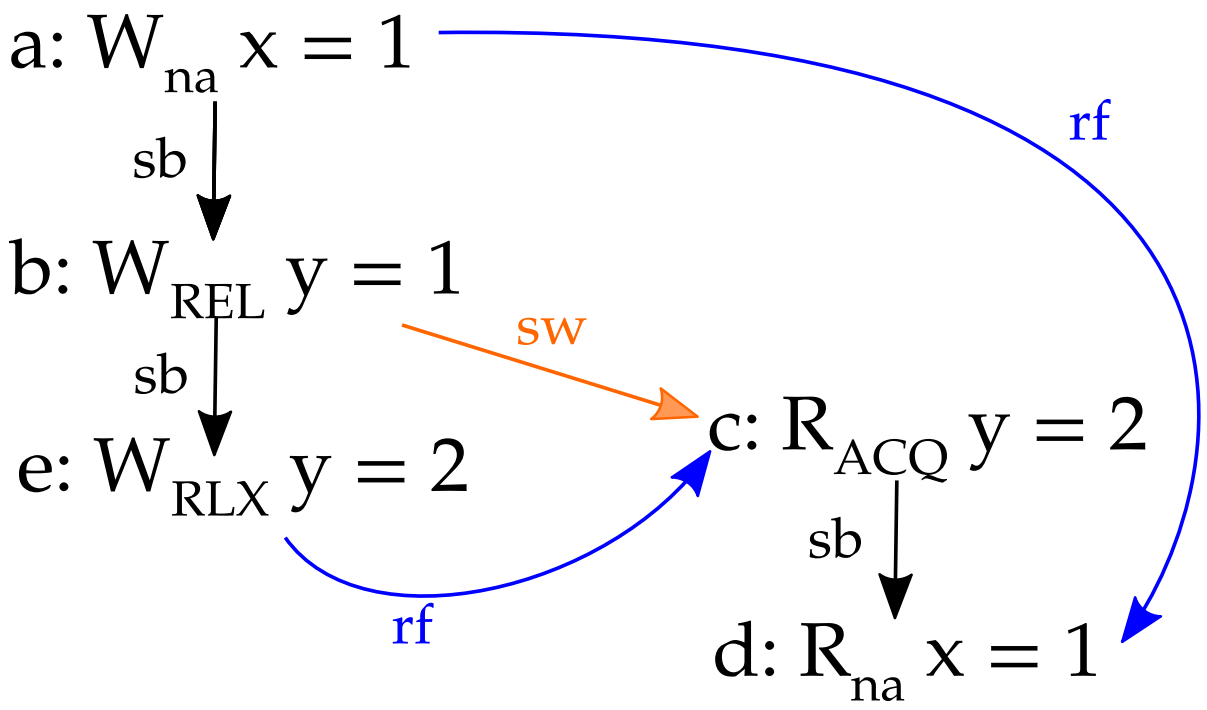
Release-acquire sematics

- Проводим *happens-before*-ребро из *release*-записи в *acquire*-чтение
- Можно использовать для синхронизации доступа к другим (даже неатомарным) переменным



Release-acquire sematics

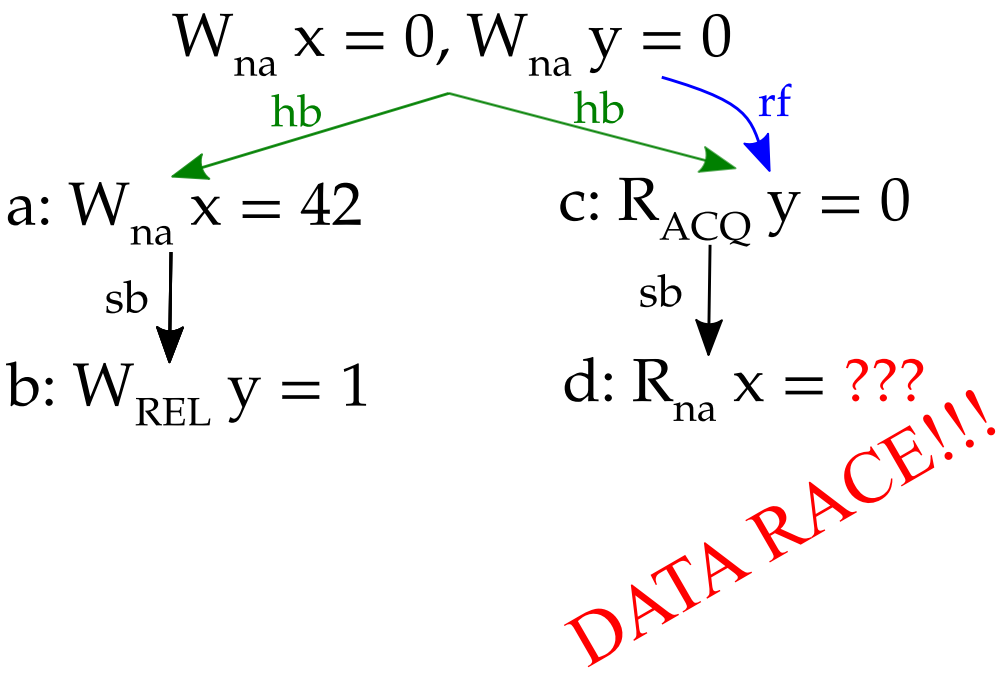
- Проводим *happens-before*-ребро из *release*-записи в *acquire*-чтение
- При этом чтение не обязано вернуть значение из соответствующей *release*-записи!



Release-acquire sematics

Важно: синхронизируются конкретные доступы к памяти в исполнении, а не строчки в коде!

```
/* Thread 1 */                                | /* Thread 2 */
x = 42;                                       | y.load(memory_order_acquire);
y.store(true, memory_order_release);          | auto my_x = x;
```



Spinlock

```
atomic<bool> locked;

void lock() {
    while(locked.exchange(true, memory_order_acq_rel)) {}
}

void unlock() {
    locked.store(false, memory_order_release);
}
```

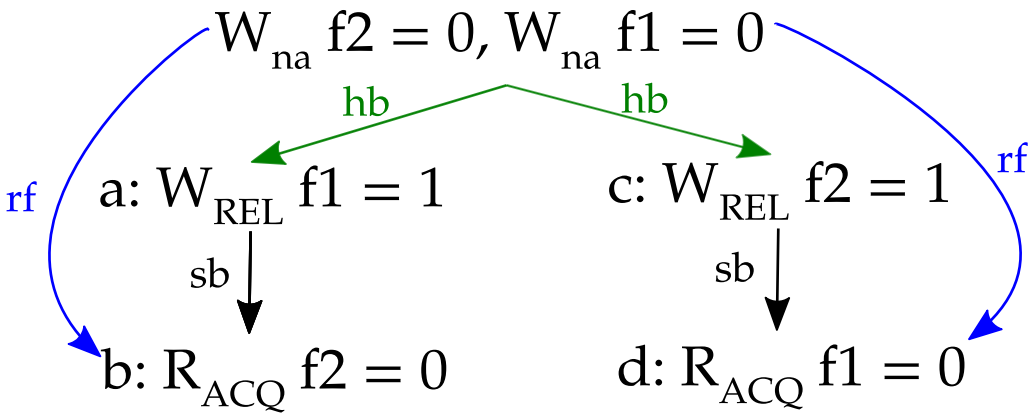
Проблемы release-acquire

- Release-acquire семантика предоставляет довольно сильные гарантии, достаточные для большинства алгоритмов.
- Нужно ли что-то сильнее?

Проблемы release-acquire. Dekker's algorithm

```
atomic<bool> f1, f2;
```

```
/* Thread 1 */                                  | /* Thread 2 */
f1.store(true, memory_order_release);           | f2.store(true, memory_order_release);
if (!f2.load(memory_order_acquire)) {           | if (!f1.load(memory_order_acquire)) {
    /* Critical section */                      |     /* Critical section */
} else { /* Process contention */ }             | } else { /* Process contention */ }
```

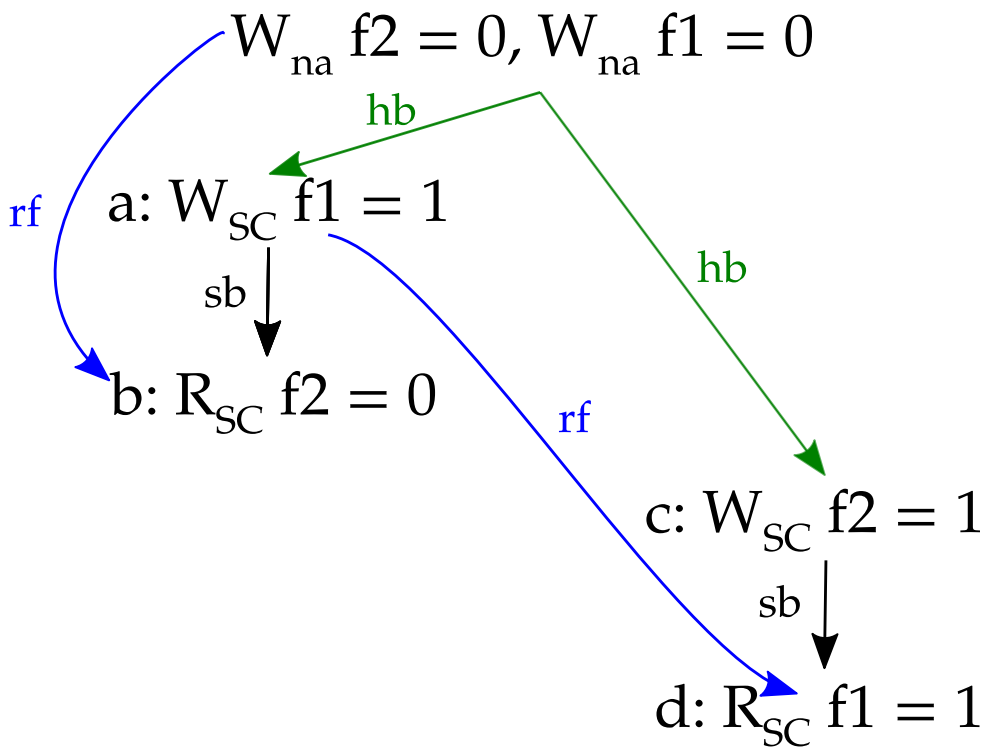


Dekker's algorithm & sequential consistency

```
atomic<bool> f1, f2;
```

```
/* Thread 1 */
f1.store(true, memory_order_seq_cst);
if (!f2.load(memory_order_seq_cst)) {
    /* Critical section */
} else { /* Process contention */ }

/* Thread 2 */
f2.store(true, memory_order_seq_cst);
if (!f1.load(memory_order_seq_cst)) {
    /* Critical section */
} else { /* Process contention */ }
```



Полезные ссылки

1. Наглядная презентация с Meeting C++ 2014
2. Простое (но неглубокое) введение в формальную модель памяти
3. Mathematizing C++ Concurrency (суровая статья про формализацию)
4. x86-TSO: A Rigorous and Usable Programmer’s Model for x86 Multiprocessors (модель памяти x86)
5. Подборка материалов про толкование модели памяти C++