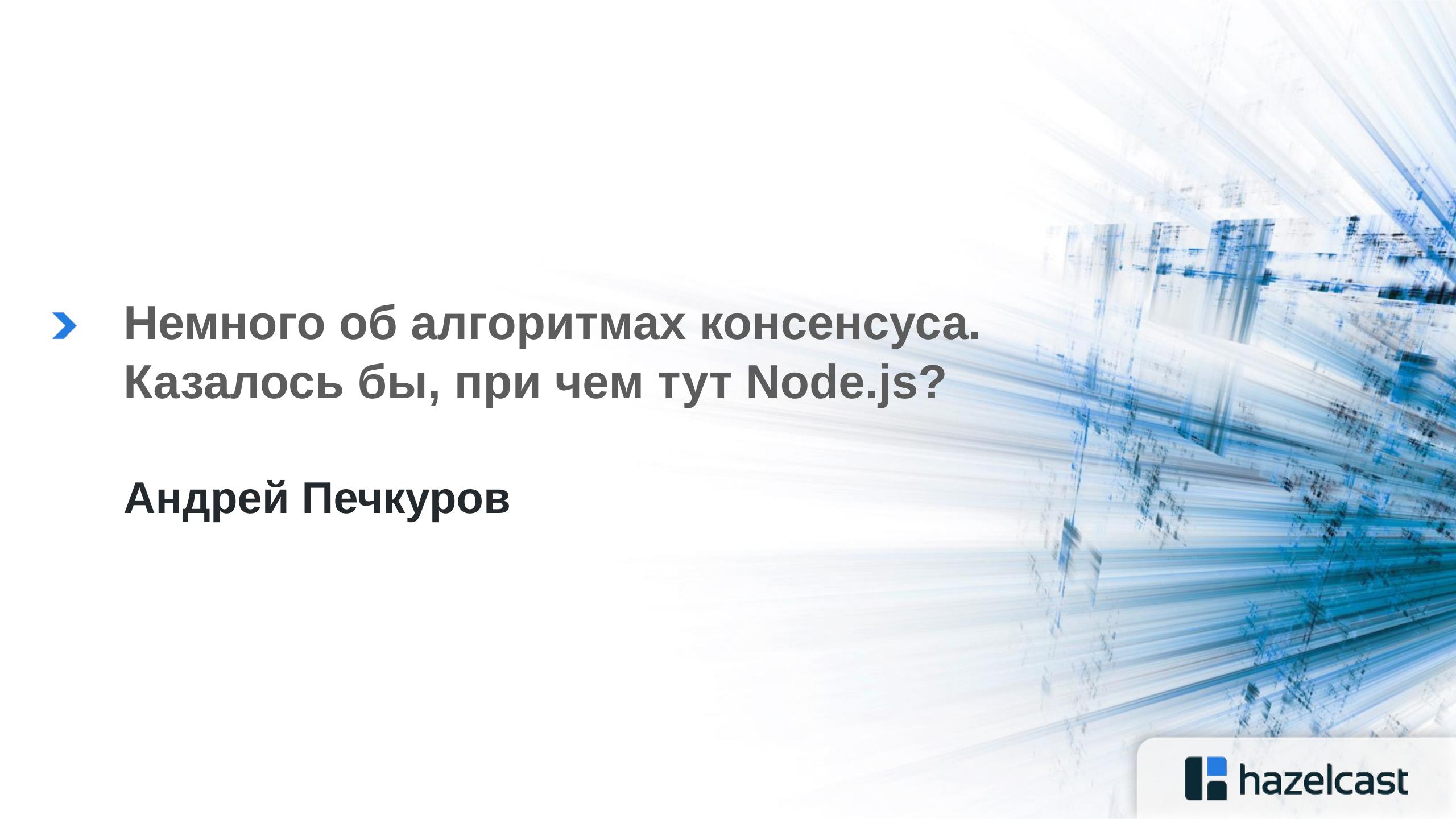


- 
- Немного об алгоритмах консенсуса.
Казалось бы, при чем тут Node.js?

Андрей Печкуров

Исходная задача



Service A



Service B

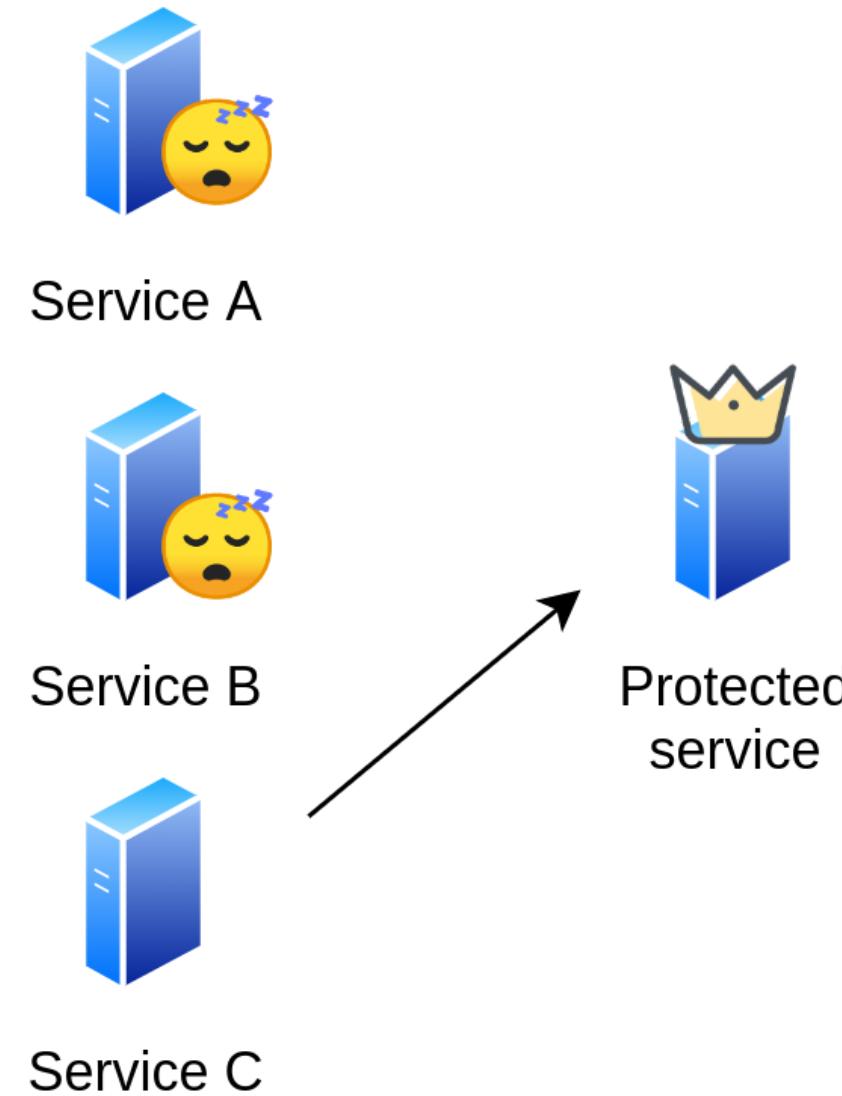


Service C

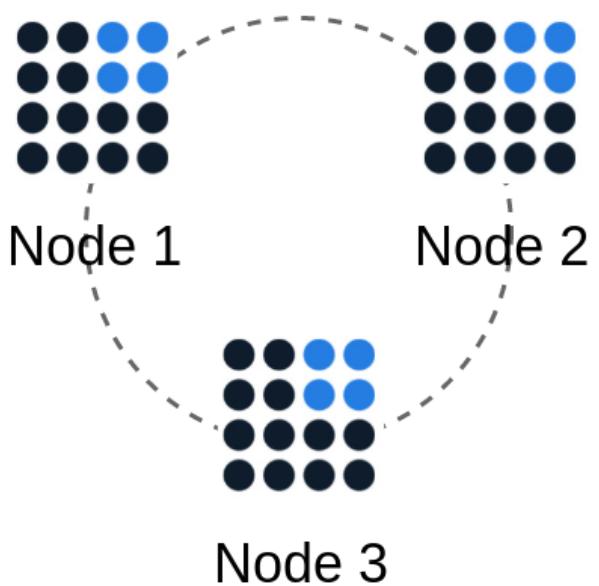


Protected
service

Исходная задача



Возможное решение



Service A



Service B

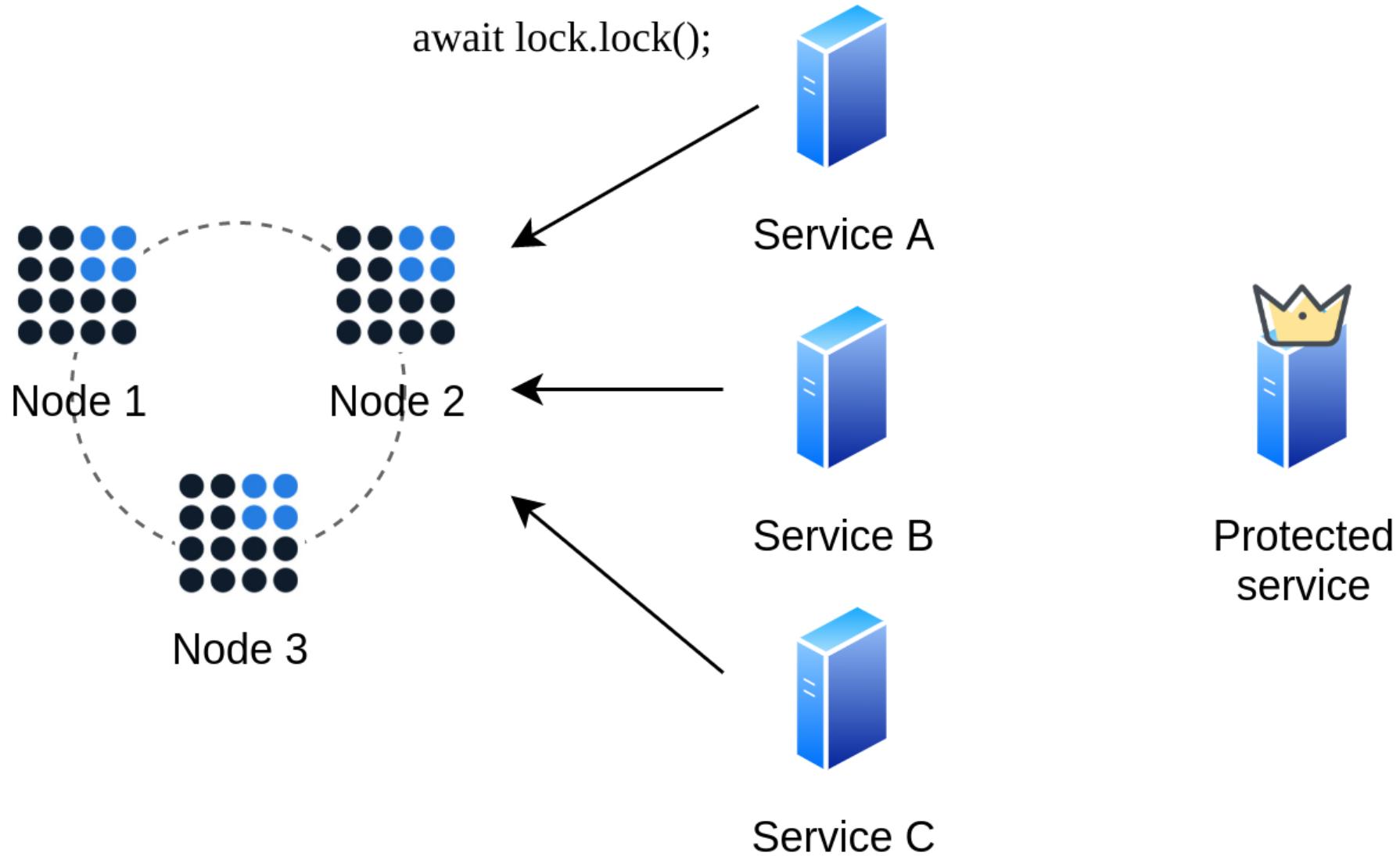


Service C

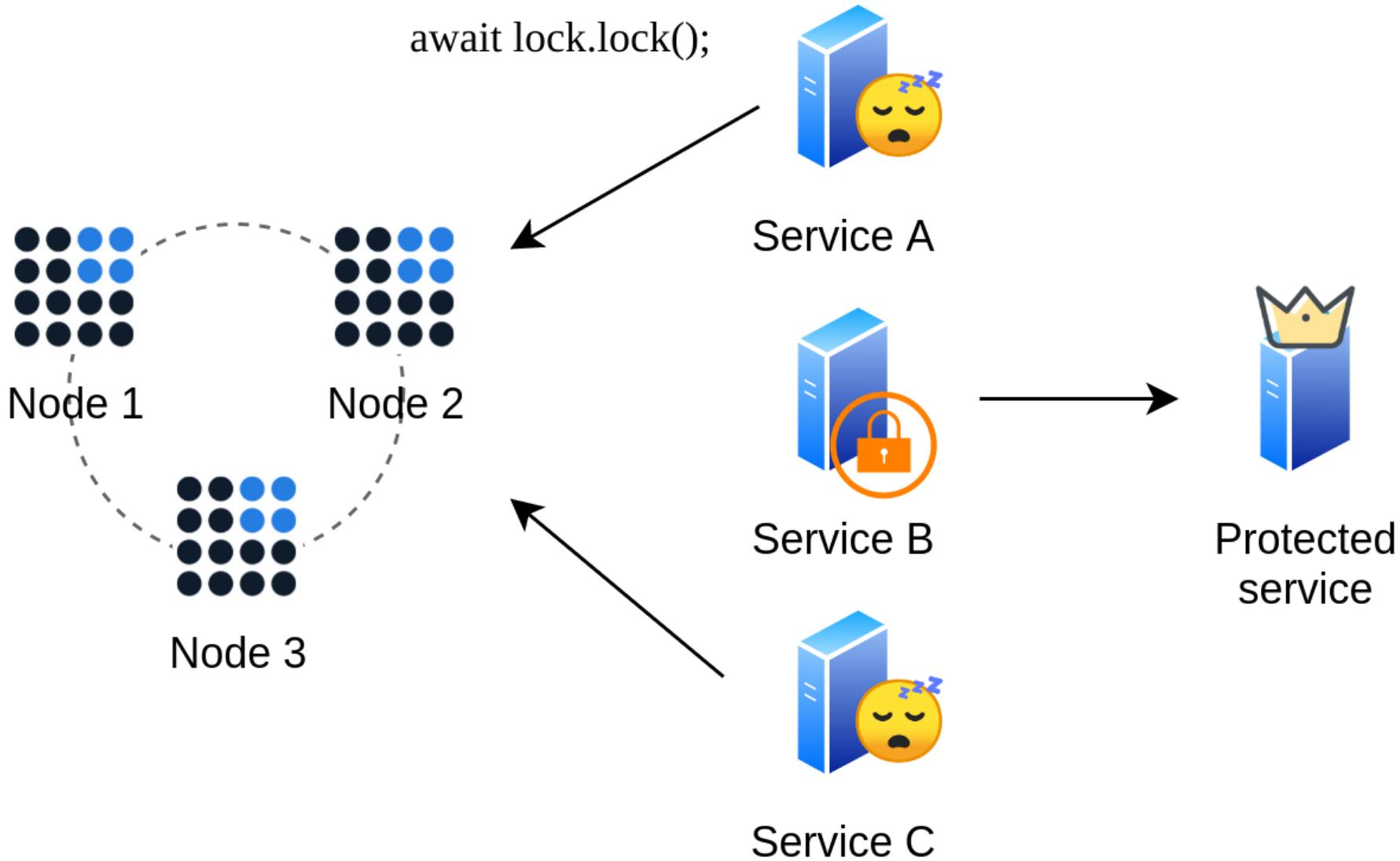


Protected
service

Возможное решение



Возможное решение





Hazelcast In-Memory Data Grid (IMDG)

- Большой набор распределенных структур данных
 - Показательный пример - `Map`, который часто используют как кэш



Hazelcast In-Memory Data Grid (IMDG)

- Большой набор распределенных структур данных
 - Показательный пример - `Map`, который часто используют как кэш
- Особенности:
 - Хорошо масштабируется вертикально и горизонтально
 - Часто используется в `high-load` и `low-latency` приложениях



Hazelcast In-Memory Data Grid (IMDG)

- Большой набор распределенных структур данных
 - Показательный пример - `Map`, который часто используют как кэш
- Особенности:
 - Хорошо масштабируется вертикально и горизонтально
 - Часто используется в high-load и low-latency приложениях
- Области применения:
 - Payment processing, fraud detection, IoT, in-memory stream processing и т.д.



Hazelcast IMDG Node.js client

- <https://github.com/hazelcast/hazelcast-nodejs-client>
- P.S. А вот доклад про историю оптимизаций:
<https://youtu.be/CSnmpbZsVD4>

Старая реализация распределенных lock'ов

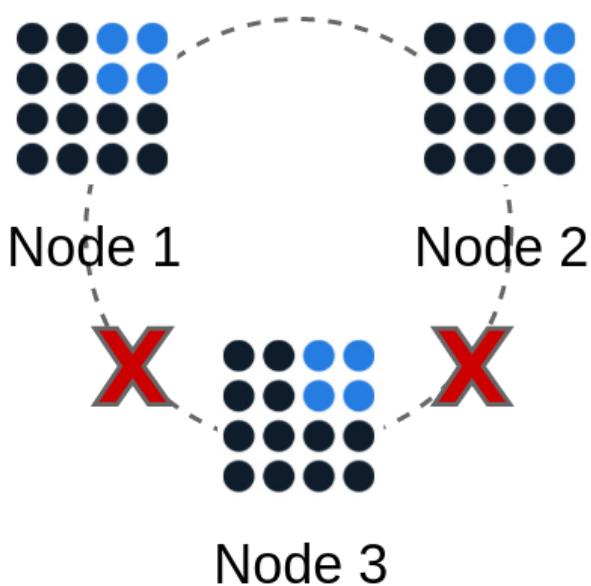
```
const lock = await client.getLock('my-lock');

await lock.lock();
try {
    // "защищенный" код
    // (доступен только владельцу)
} finally {
    await lock.unlock();
}
```

Хьюстон, у нас проблема

- В 2017м Kyle Kingsbury, автор Jepsen, проанализировал Hazelcast
- <https://jepsen.io/analyses/hazelcast-3-8-3>

Как это работает в условиях network partition



Service A



Service B

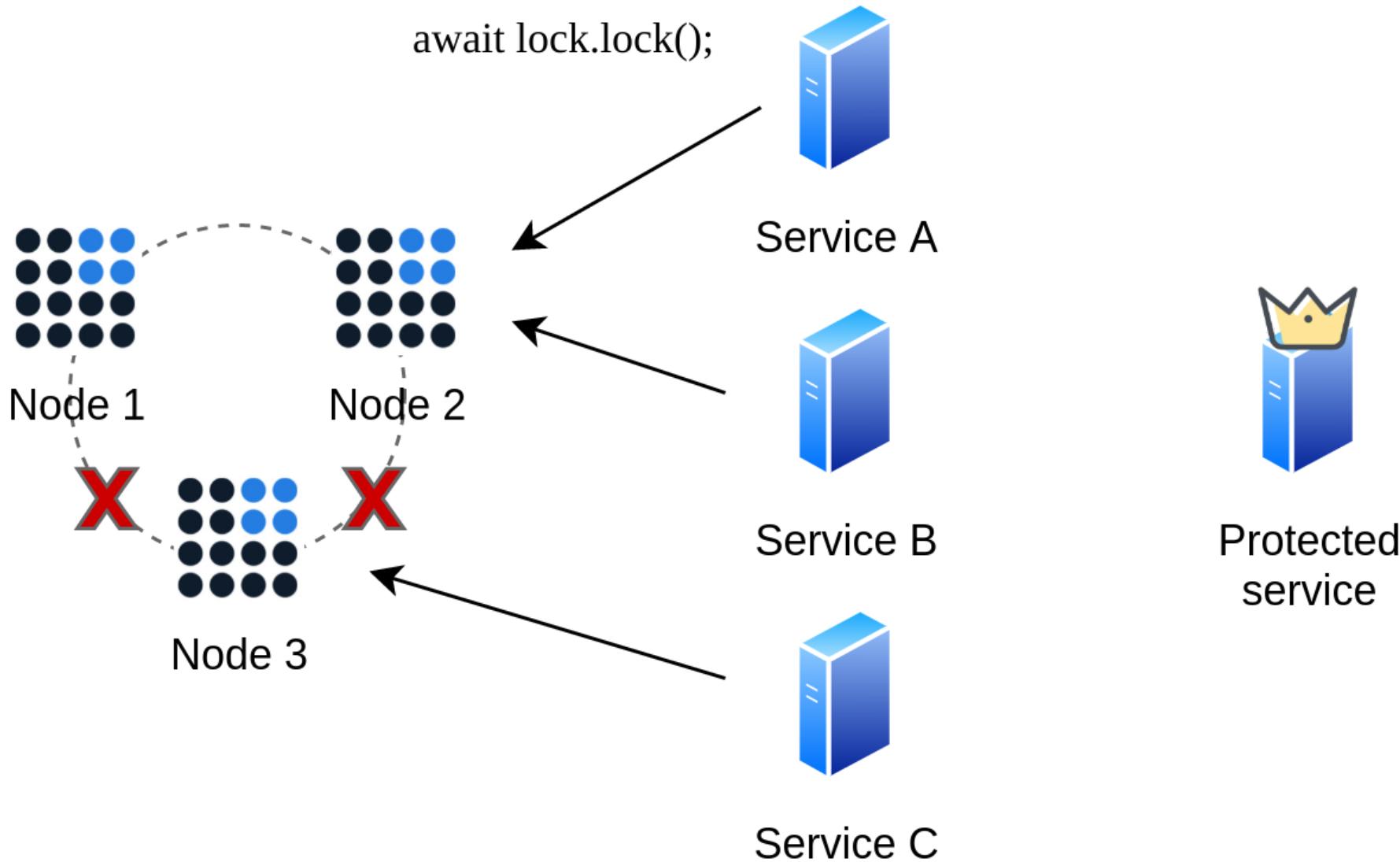


Service C

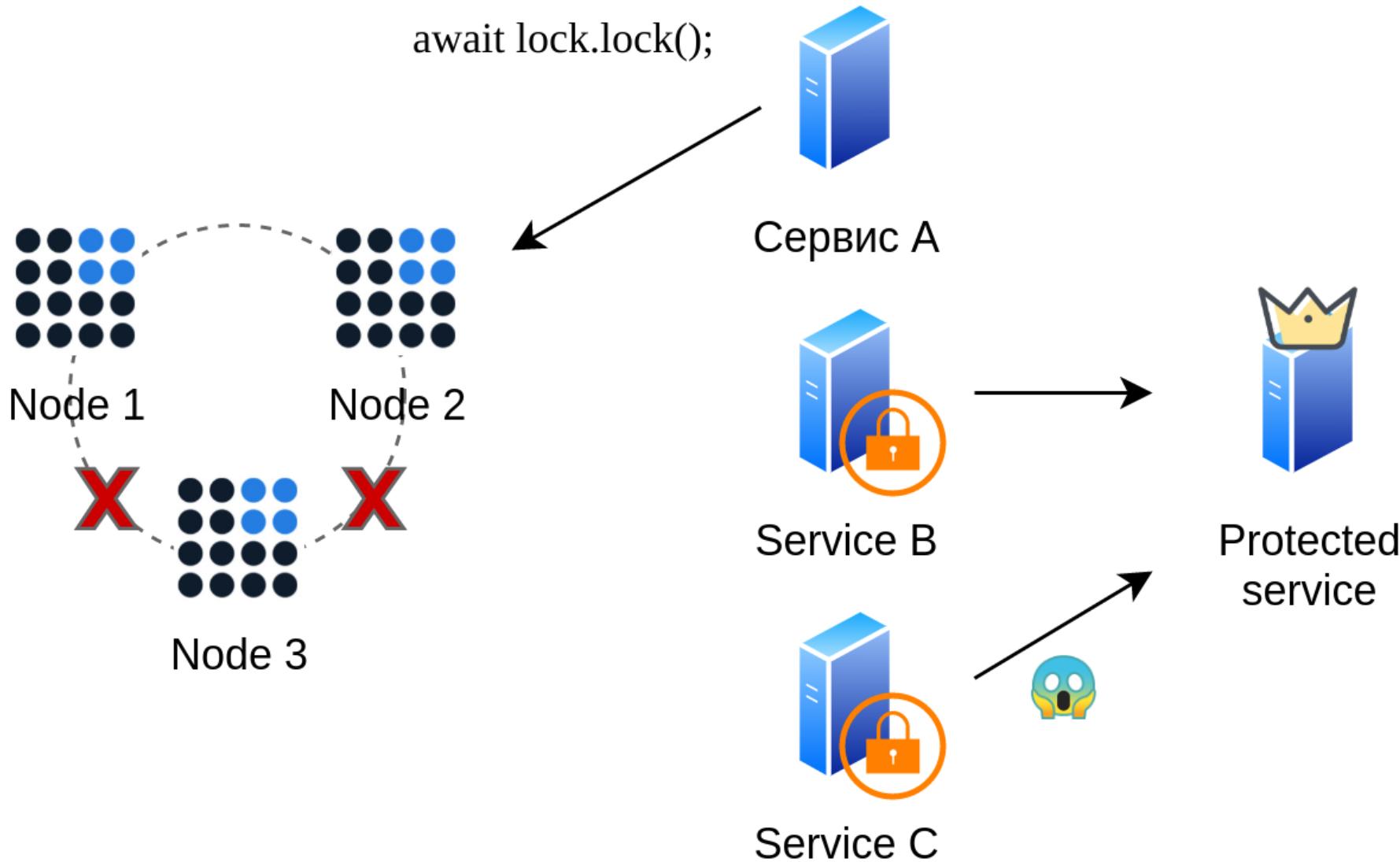


Protected
service

Как это работает в условиях network partition



Как это работает в условиях network partition



Наш ответ

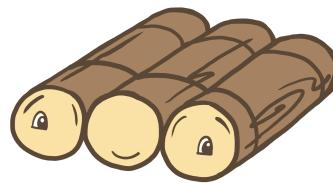
- С версии 3.12 у нас есть CP Subsystem (т.е. production-ready Raft с Jepsen тестами и lock'ами 😊)
- <https://docs.hazelcast.org/docs/4.0.3/manual/html-single/index.html#cp-subsystem>

Новая реализация распределенных lock'ов

```
// у ней внутри Raft
const lock = await client.getCPSubsystem().getLock('my-lock');

const fence = await lock.lock();
try {
    // "защищенный" код
    // (доступен только владельцу)
} finally {
    await lock.unlock(fence);
}
```

P.S. А еще у нас есть Semaphore, AtomicLong и AtomicReference.



Raft - алгоритм консенсуса, придуманный D.Ongaro и J.Ousterhout
(Stanford) в 2013.



Некоторые юзкейсы для подобных алгоритмов:

- Распределенные lock'и* (и не только)
- Хранилище пар ключ-значение
- Выбор лидера
- Ограничения на значения полей (например, уникальность)
- Атомарный коммит (распределенные транзакции)

О докладчике

- Пишу на Java (очень долго), Node.js (долго)
- Node.js core collaborator
- Интересы: веб, архитектура, распределенные системы, производительность
- Можно найти тут:
 - <https://twitter.com/AndreyPechkurov>
 - <https://github.com/puzpuzpuz>
 - <https://medium.com/@apechkurov>



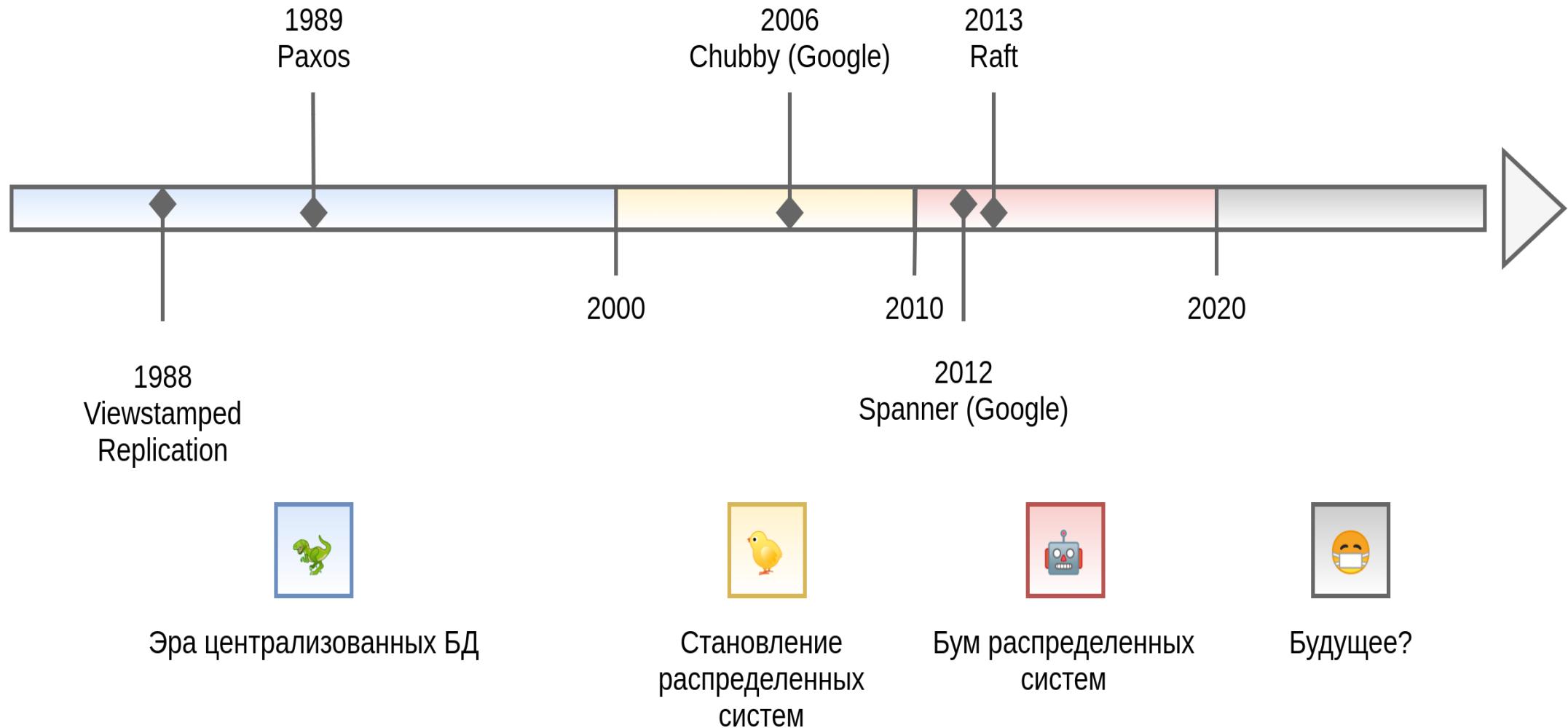
План на сегодня

- 💡 Начинаем пугаться распределенных систем
- 💡 Знакомимся с моделями согласованности
- 💡 CAP теорема и прочие классификации
- 💡 Что за зверь - алгоритм консенсуса?
- 🔧 CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных
- 🔧 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

➡ Начинаем пугаться распределенных систем

- 💡 Знакомимся с моделями согласованности
- 💡 CAP теорема и прочие классификации
- 💡 Что за зверь - алгоритм консенсуса?
- 🔧 CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных
- 🔧 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

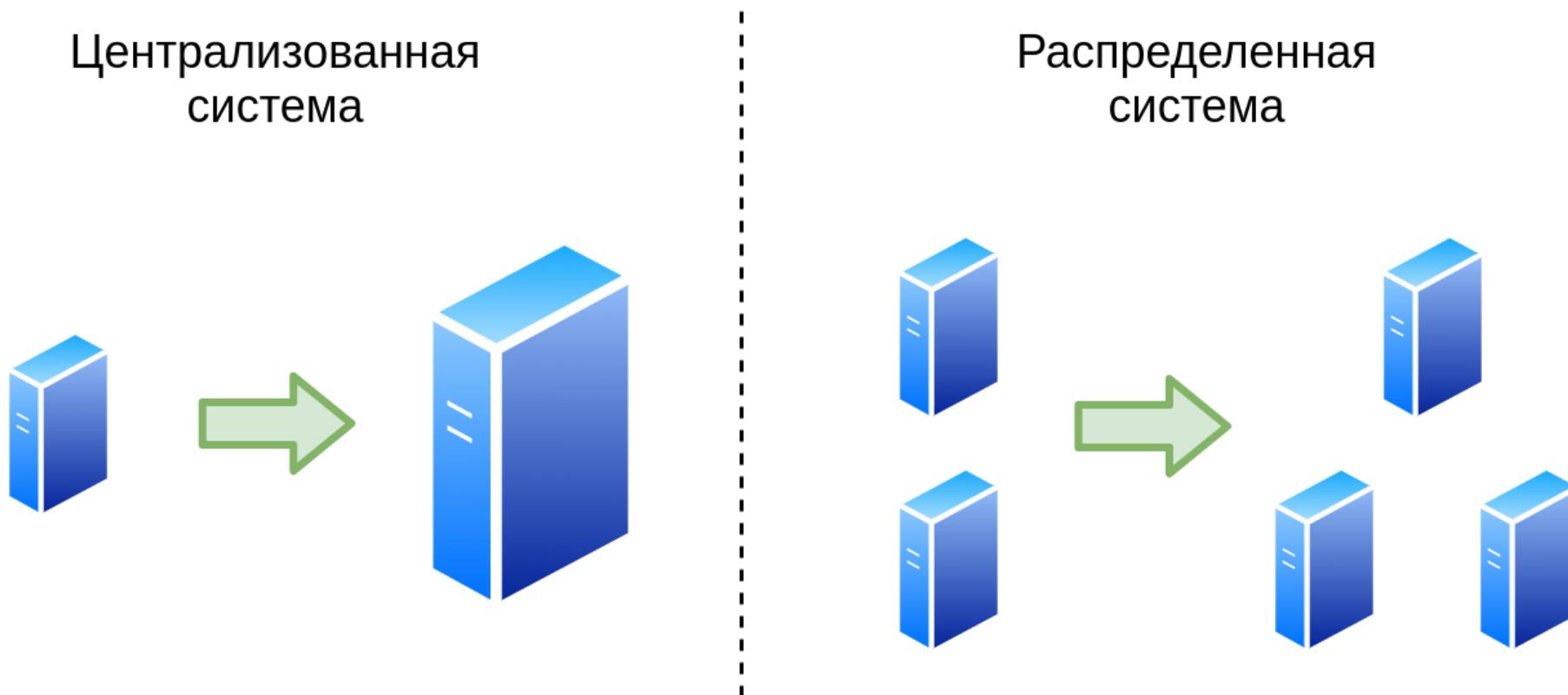
Упрощенная до ужаса история



Распределенная система

- Назовем распределенной систему, хранящую состояние (общее) на нескольких машинах, соединенных сетью
- Для определенности будем подразумевать хранилище пар ключ-значение

Отличия: масштабирование



Отличия: работа с данными

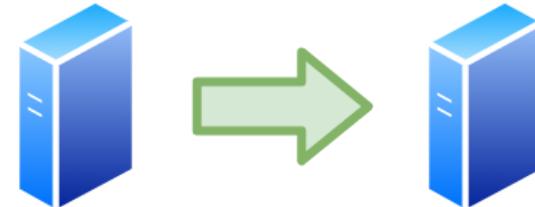
Централизованная
система

```
const data = await readData();
```



Распределенная
система

```
const data = await readData();
```



Отличия: вероятность отказа

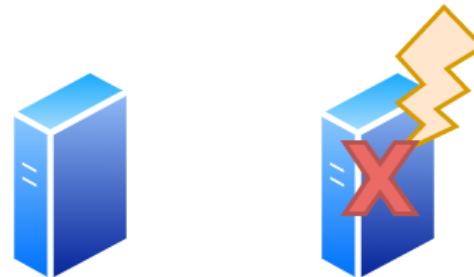
Централизованная
система



$P(S)$

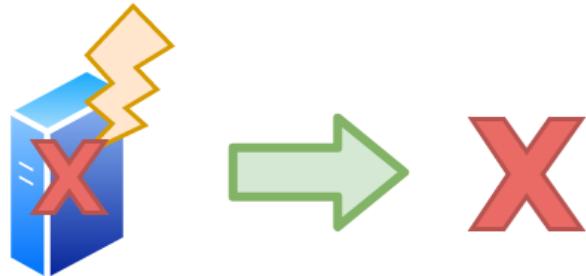
Распределенная
система

$$P(S1 + S2) = P(S1) + P(S2) - P(S1 \times S2)$$

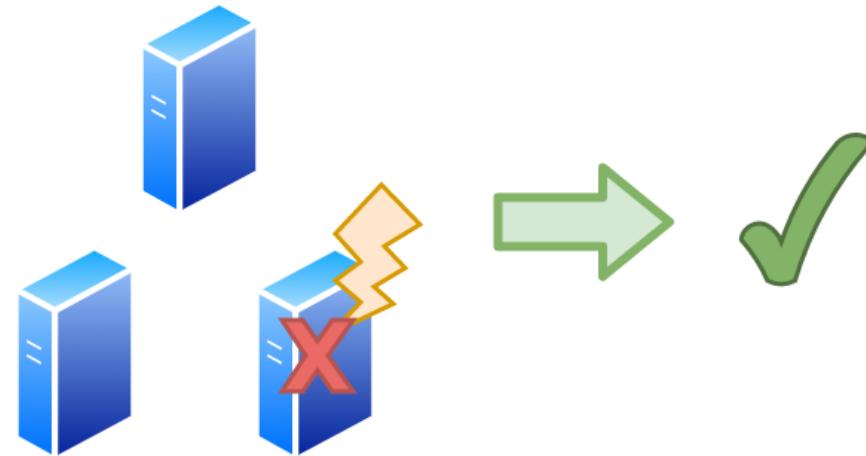


Отличия: критичность отказа

Централизованная
система



Распределенная
система



Fallacies of distributed computing

- Инженеры из Sun (R.I.P.) еще в 94м сформулировали такой список:
 - **The network is reliable**
 - **Latency is zero**
 - **Bandwidth is infinite**
 - The network is secure
 - Topology doesn't change
 - There is one administrator
 - Transport cost is zero
 - The network is homogeneous
- P.S. Добавим сюда "**Clocks are in sync**"

Сеть

- Мы работаем с асинхронными сетями

Сеть

- Мы работаем с асинхронными сетями
- Отправленный запрос может:
 - Быть потерян при отправке туда/обратно
 - Находиться в очереди ожидания отправки (если сеть под нагрузкой)
 - Быть получен, но машина-адресат дала сбой до или во время обработки

Сеть

- Мы работаем с асинхронными сетями
- Отправленный запрос может:
 - Быть потерян при отправке туда/обратно
 - Находиться в очереди ожидания отправки (если сеть под нагрузкой)
 - Быть получен, но машина-адресат дала сбой до или во время обработки
- Единственный способ подтверждения - получить ответ

Локальные

- Каждая машина работает с локальным временем (`Date.now()`)

Локальные

- Каждая машина работает с локальным временем (`Date.now()`)
- Локальные монотонные часы (`process.hrtime()`) помогают, но далеко не всегда

Локальные

- Каждая машина работает с локальным временем (`Date.now()`)
- Локальные монотонные часы (`process.hrtime()`) помогают, но далеко не всегда
- В действительности нам хотелось бы иметь глобальные часы

Глобальные

- Увы, глобальные (синхронизированные) часы невозможны без специального железа
- Байка: в Google Spanner часы в ЦОД синхронизированы в пределах 7 мс (атомные часы + GPS)
- Оффтопик: векторные "часы" частично решают проблему

Чего мы ждем от распределенной системы? 🤔

- Допустим, что мы ждем того же поведения, что и у централизованного хранилища
- А именно - с клиентской стороны поведение должно быть, как если бы это была централизованная система (пока остановимся на этой формулировке)

Фигня вопрос - сейчас придумаем алгоритм

1. Любой узел принимает клиентские запросы (прочитать/записать)

Фигня вопрос - сейчас придумаем алгоритм

1. Любой узел принимает клиентские запросы (прочитать/записать)
2. Затем - отправляет операцию на все остальные узлы

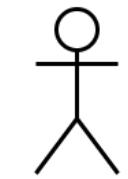
Фигня вопрос - сейчас придумаем алгоритм

1. Любой узел принимает клиентские запросы (прочитать/записать)
2. Затем - отправляет операцию на все остальные узлы
3. Ждет ответов от большинства (консенсус жеж 😊)

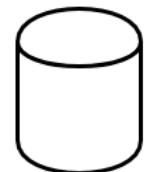
Фигня вопрос - сейчас придумаем алгоритм

1. Любой узел принимает клиентские запросы (прочитать/записать)
2. Затем - отправляет операцию на все остальные узлы
3. Ждет ответов от большинства (консенсус жеж 😊)
4. Дождавшись кворума, отправляет клиенту сообщение об успехе

Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

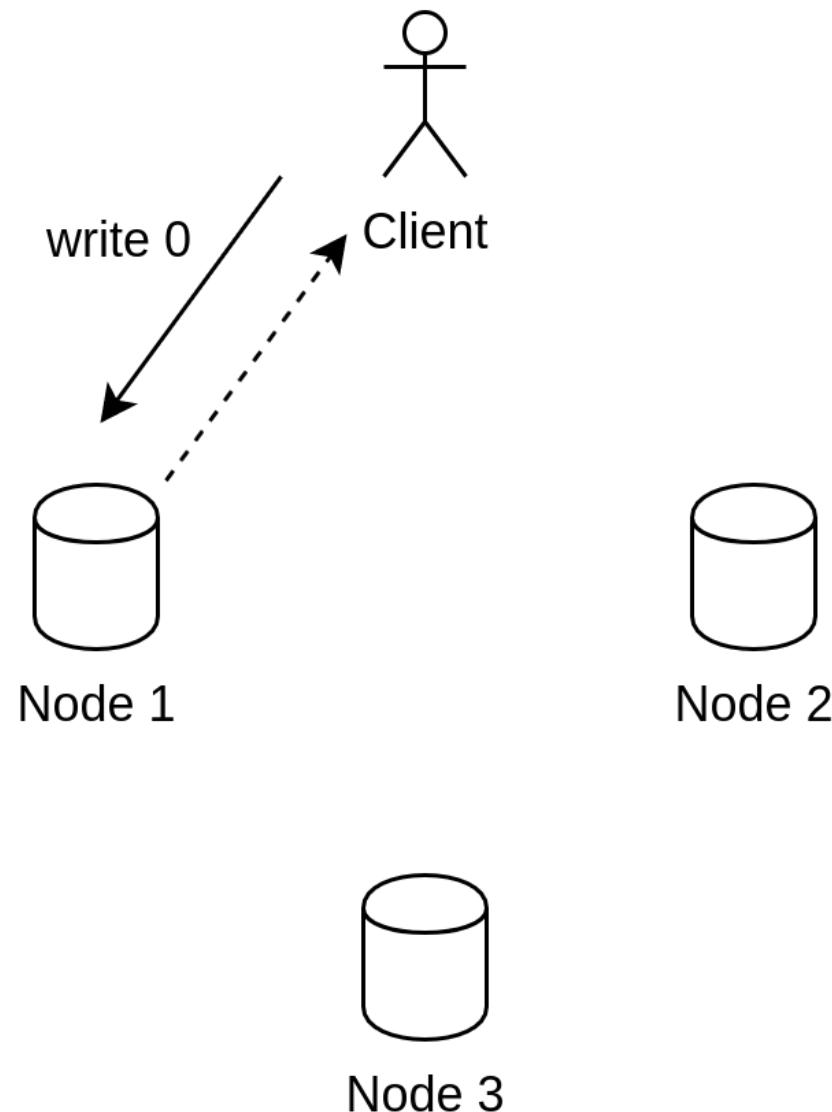


Node 2

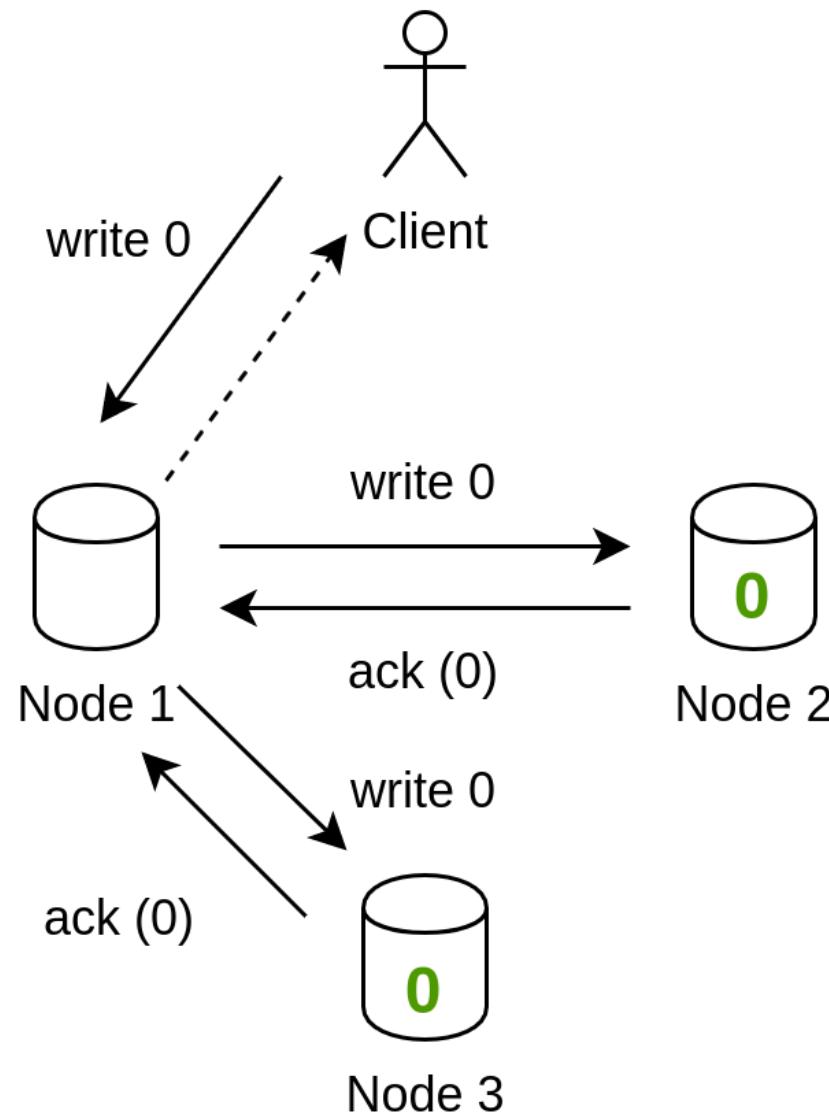


Node 3

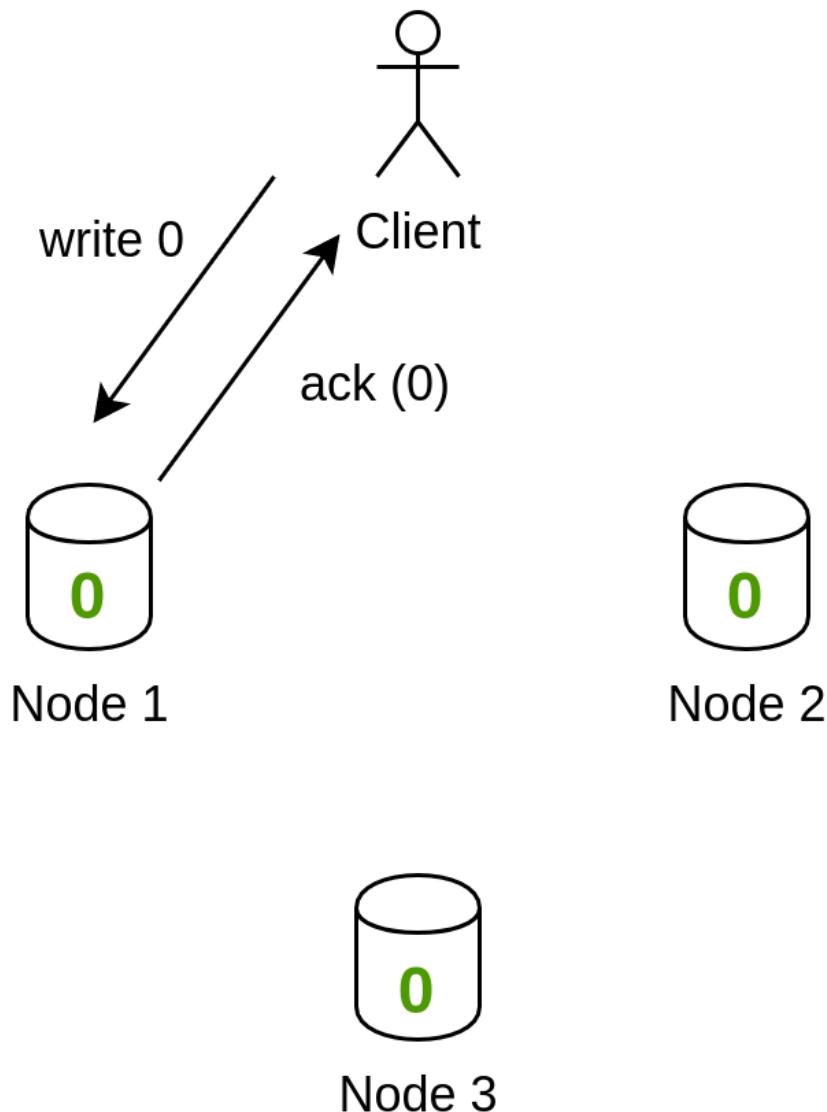
Что не так с нашим изобретением?



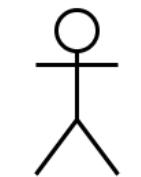
Что не так с нашим изобретением?



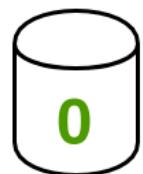
Что не так с нашим изобретением?



Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

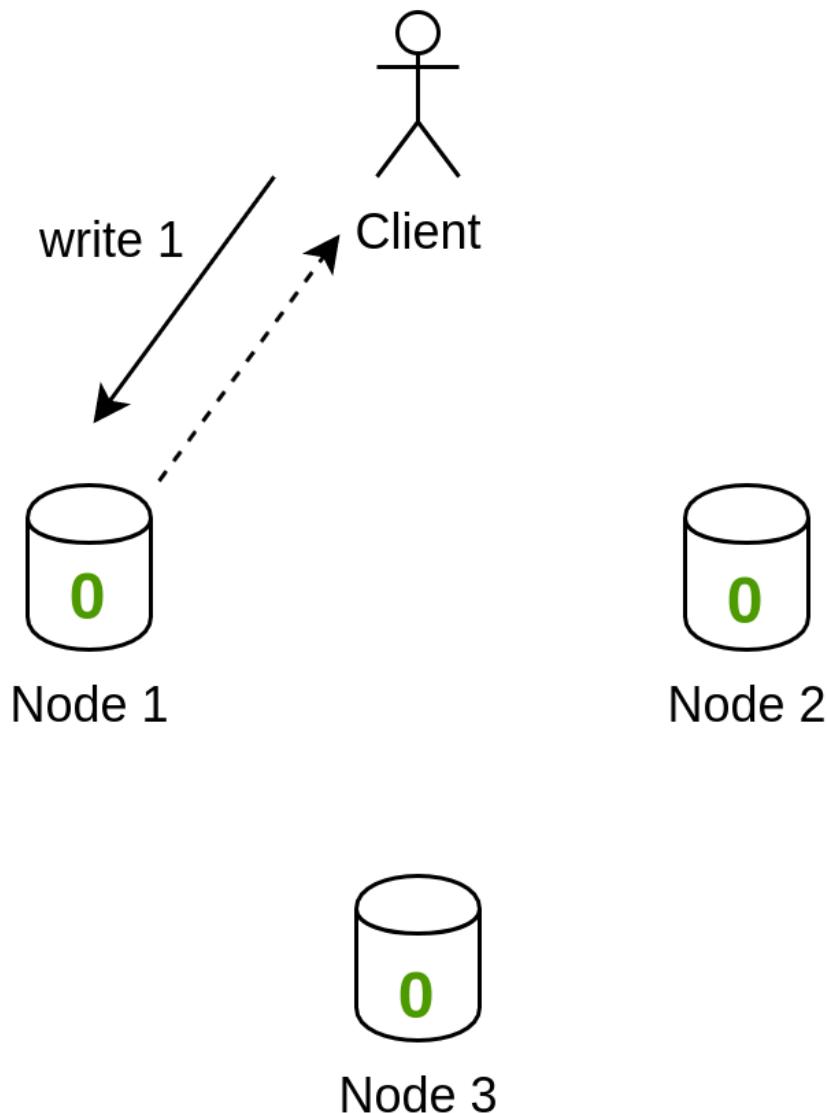


Node 2

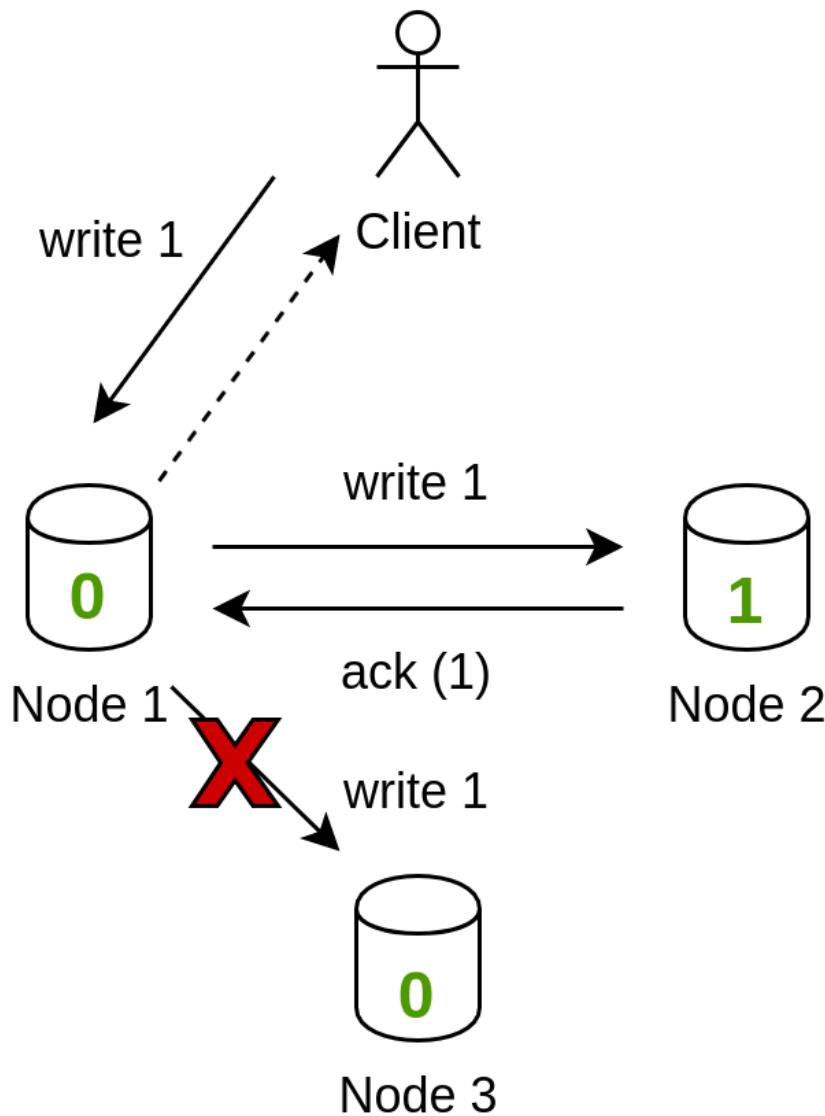


Node 3

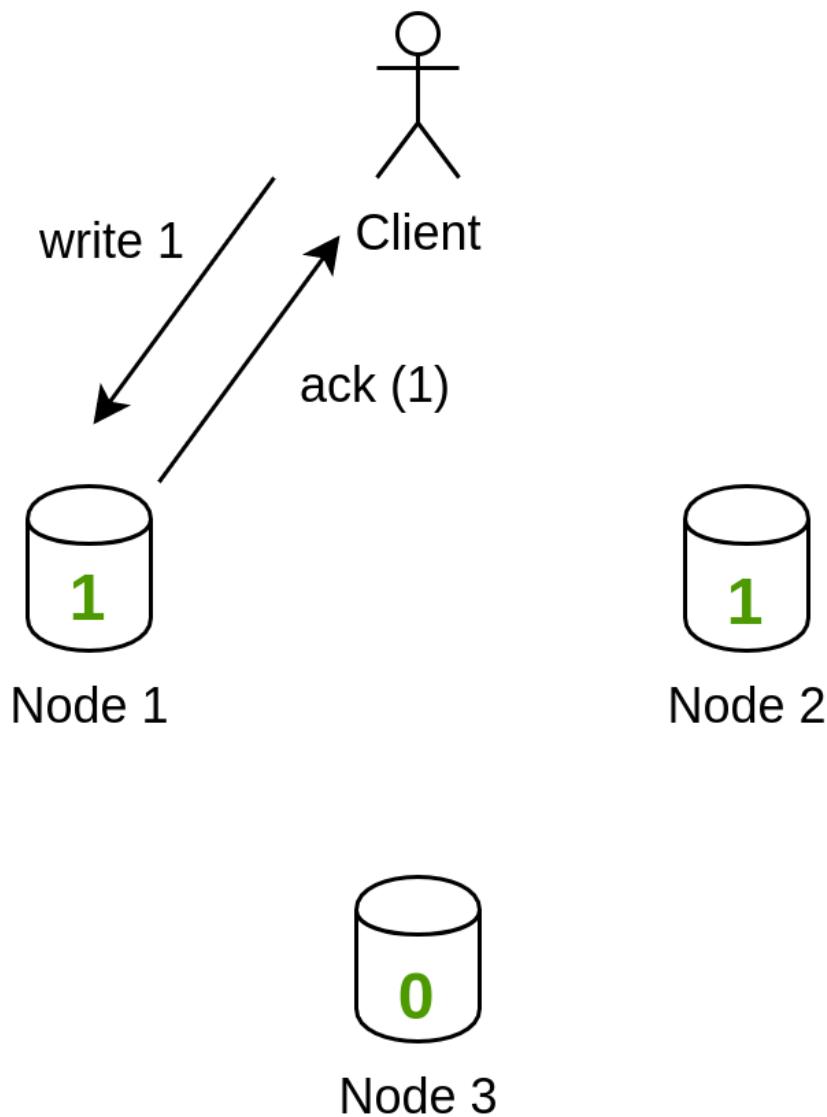
Что не так с нашим изобретением?



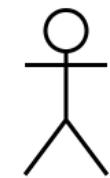
Что не так с нашим изобретением?



Что не так с нашим изобретением?



Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

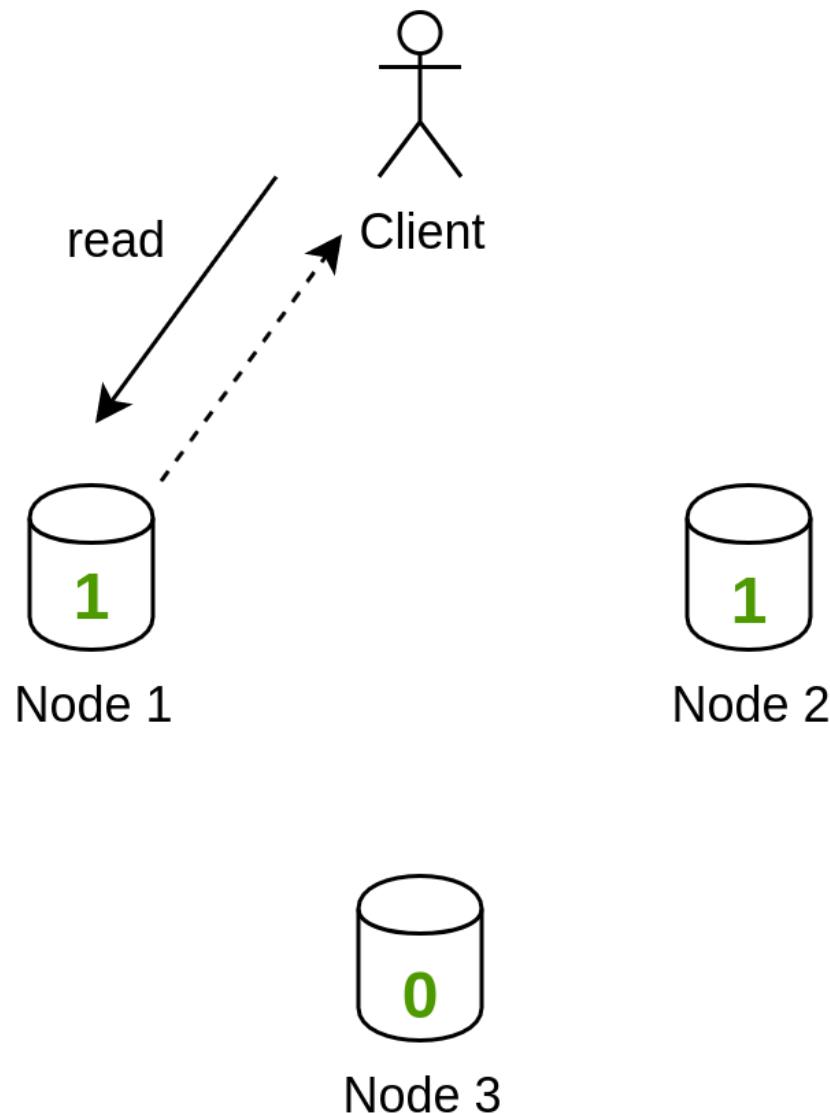


Node 2

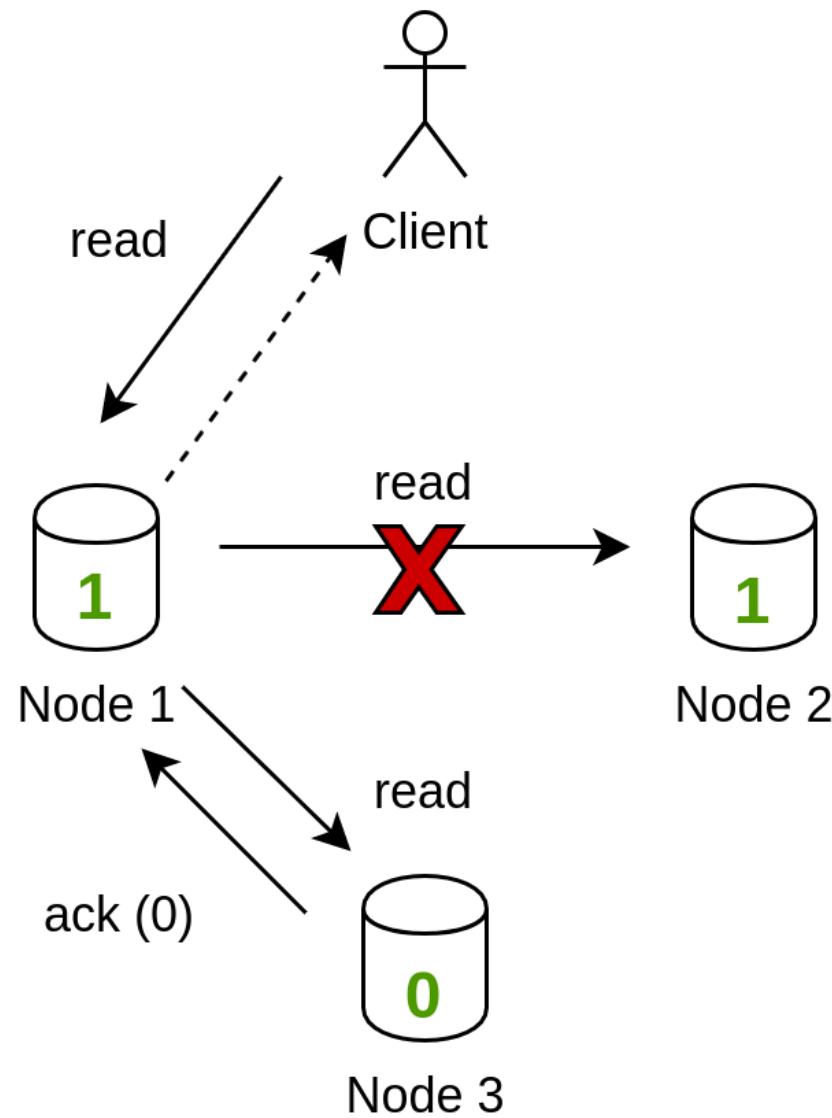


Node 3

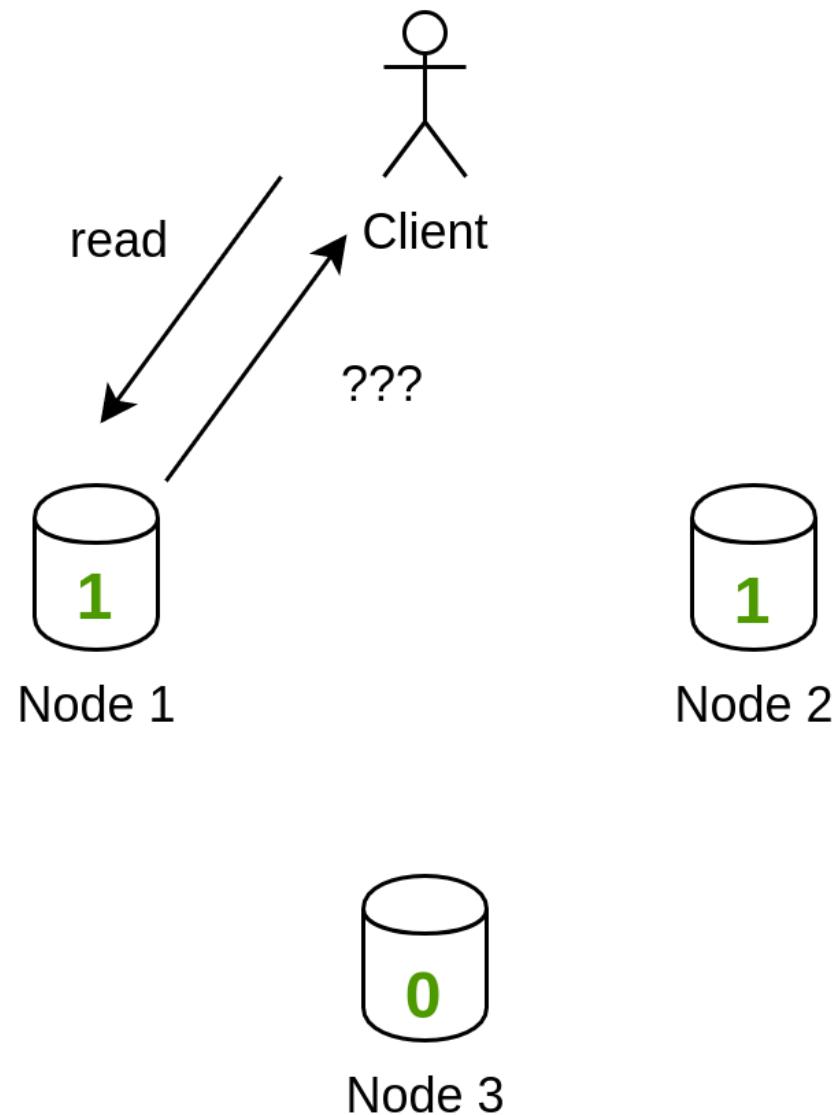
Что не так с нашим изобретением?



Что не так с нашим изобретением?



Что не так с нашим изобретением?



Начинаем пугаться распределенных систем - Промежуточные выводы 🤔

- Распределенные системы существенно отличаются от централизованных

Начинаем пугаться распределенных систем - Промежуточные выводы 🤔

- Распределенные системы существенно отличаются от централизованных
- Нам не удалось с ходу придумать хороший алгоритм для распределенного хранилища

✓ Начинаем пугаться распределенных систем

➡ Знакомимся с моделями согласованности

💡 CAP теорема и прочие классификации

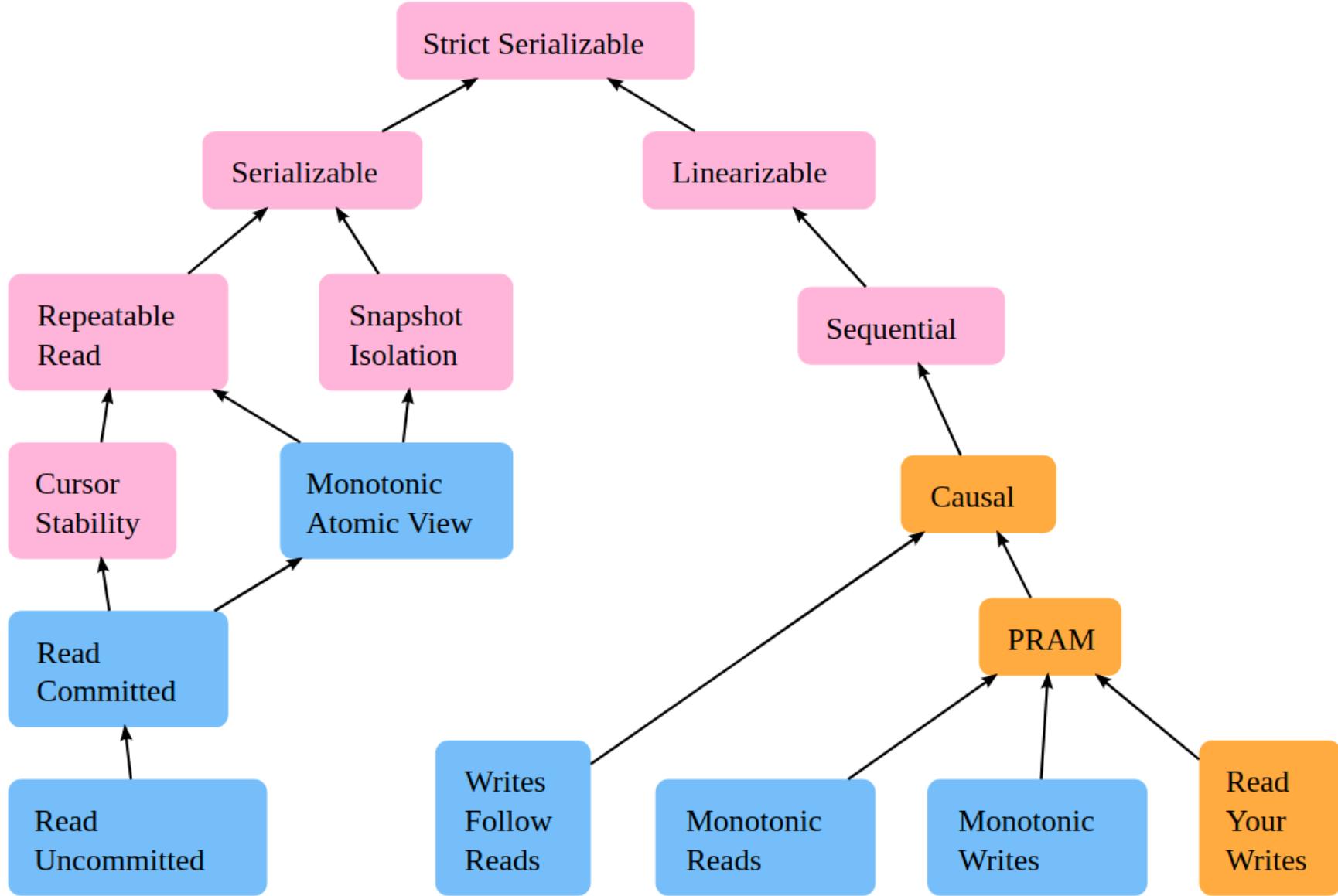
💡 Что за зверь - алгоритм консенсуса?

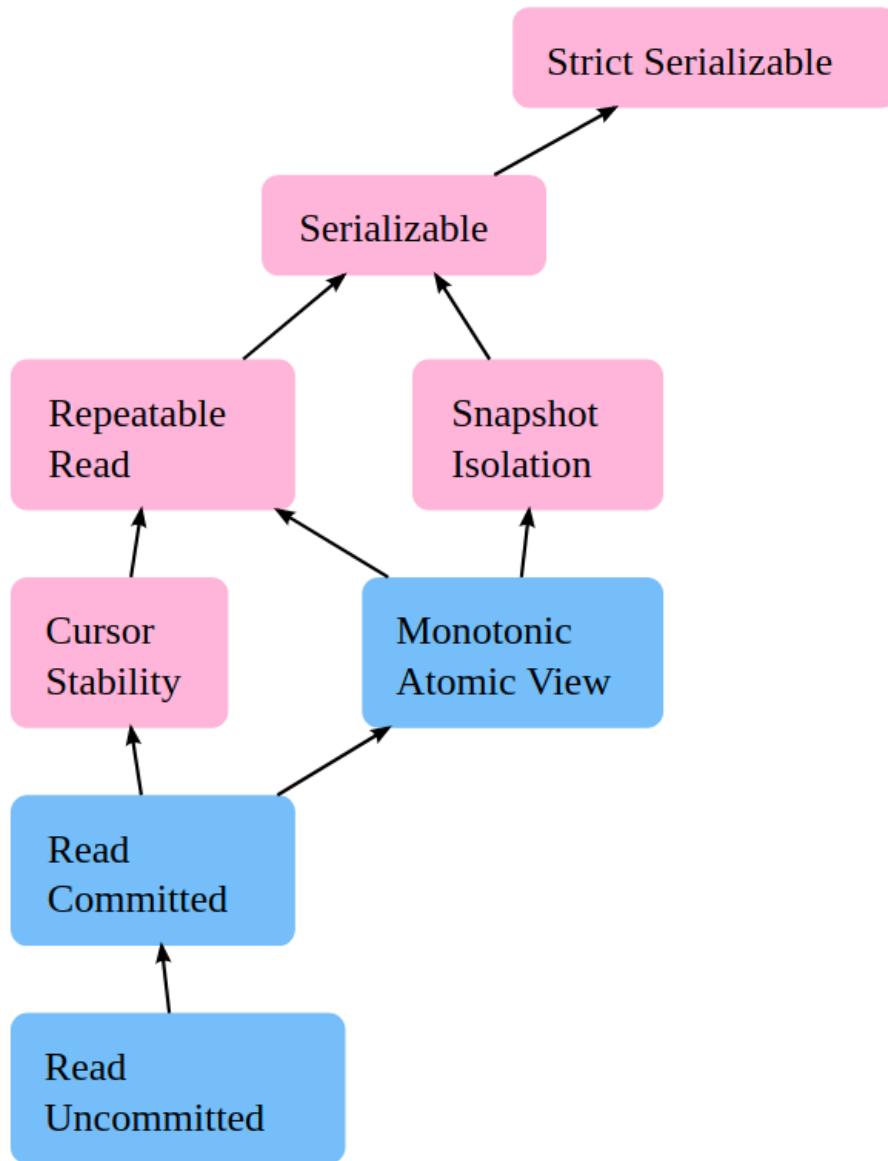
🔧 CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных

🔧 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

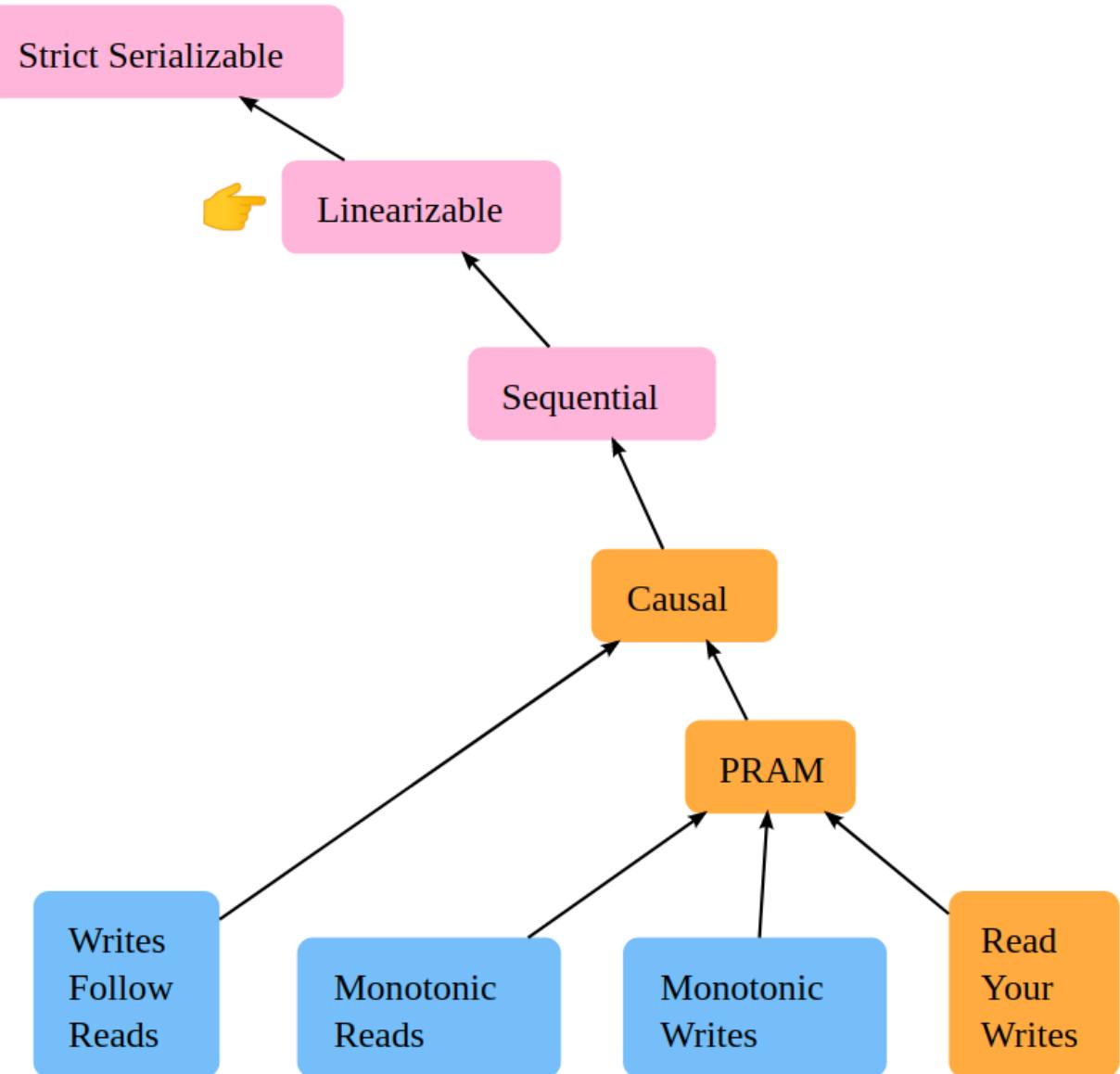
Неформальное определение

Модель согласованности (consistency model) - это гарантии, которые система (внезапно, не только распределенная) предоставляет относительно набора поддерживаемых операций





Source: <https://jepsen.io/consistency>



Linearizable consistency model

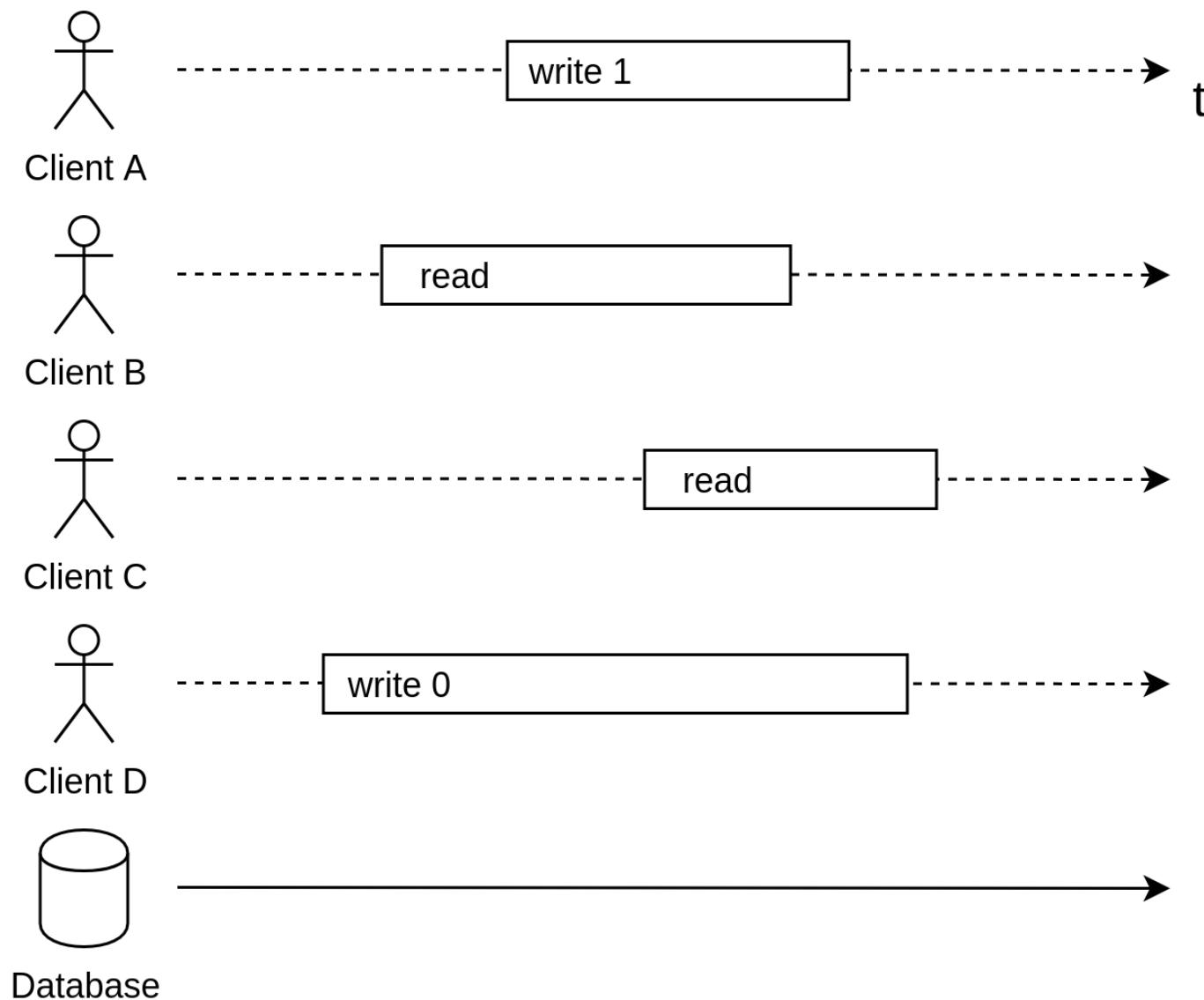
- Одна из наиболее строгих (сильных) моделей согласованности для **одного** объекта
- Именно ее мы и подразумевали (надеюсь) ранее:
"с клиентской стороны поведение должно быть, как если бы это была централизованная система"

Неформальное определение модели

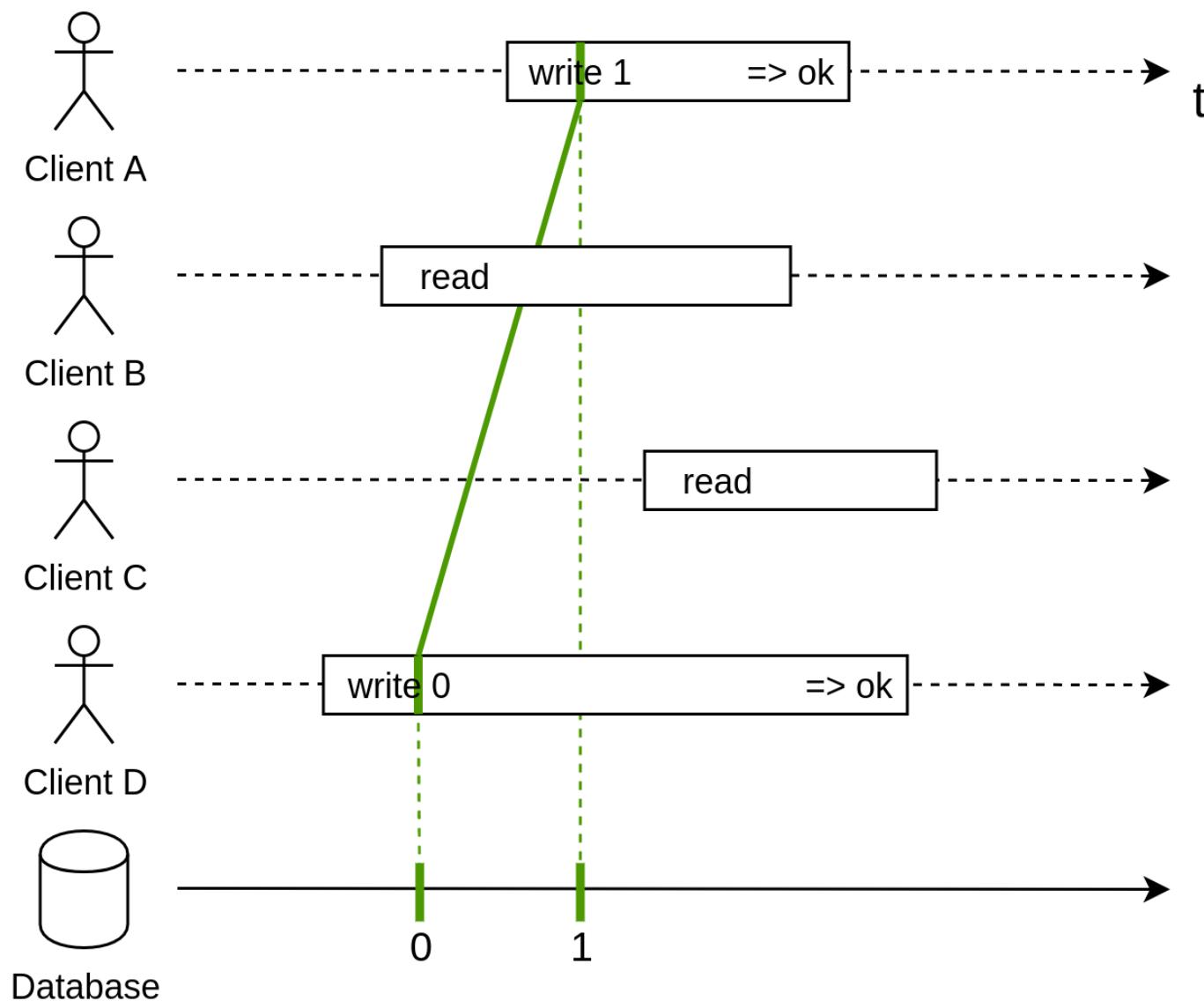
Система гарантирует, что каждая операция выполняется атомарно, в **некотором** (общем для всех клиентов) **порядке**, не противоречащим порядку выполнения операций в реальном времени.

Т.е. если операция A завершается до начала операции B, то B должна учитывать результат выполнения операции A.

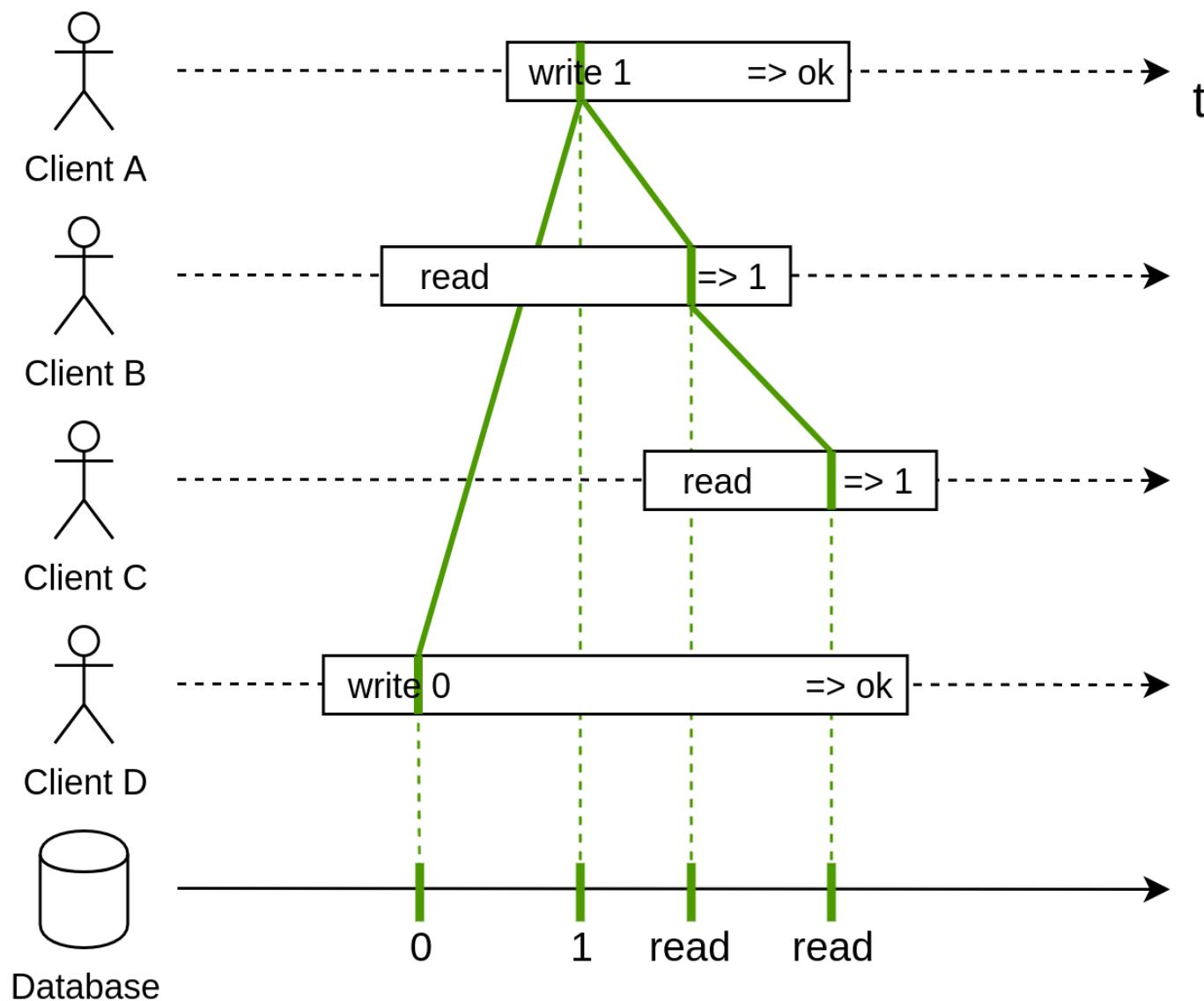
Допустимый порядок



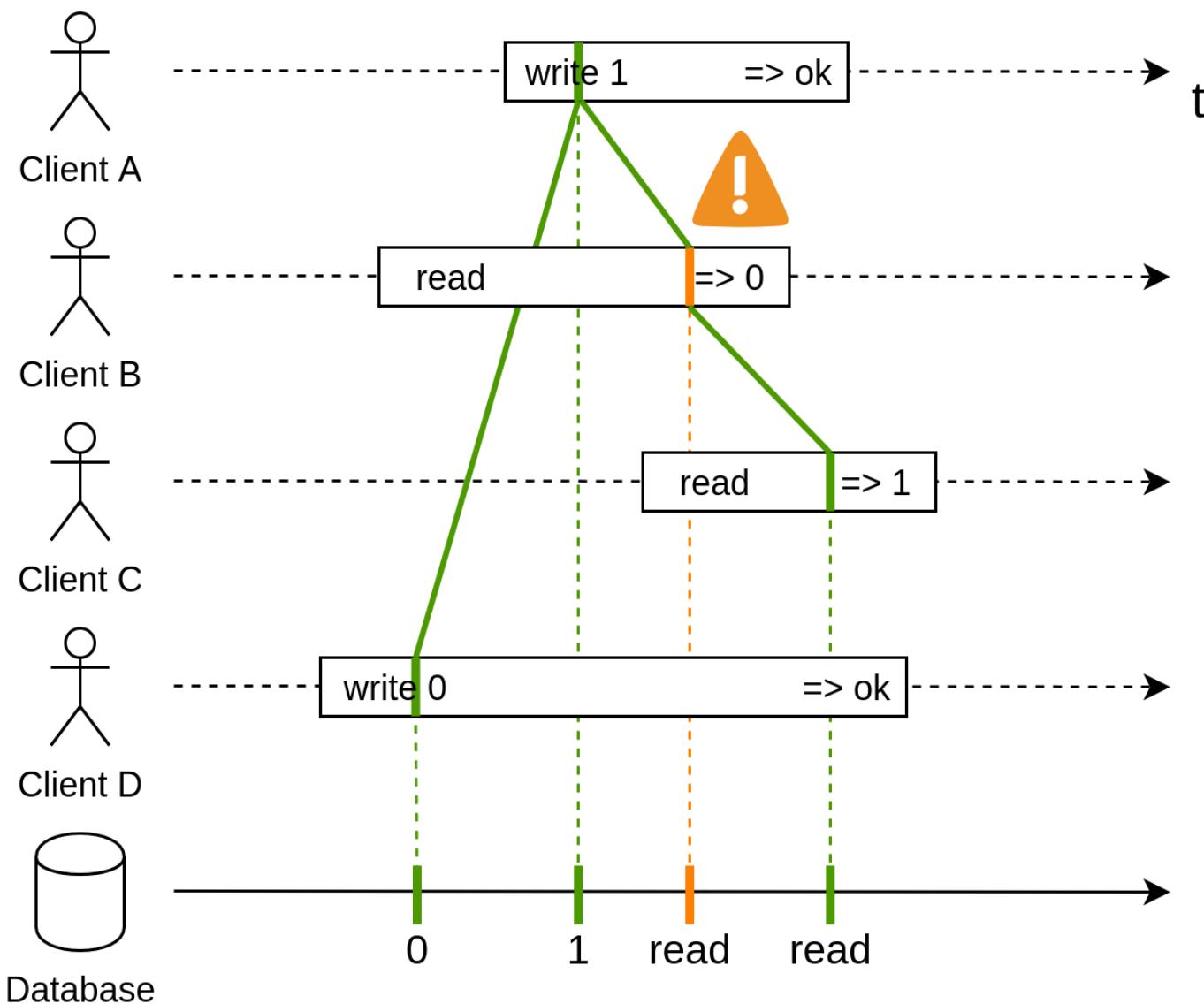
Допустимый порядок



Допустимый порядок



Недопустимый порядок



Знакомимся с моделями согласованности - Промежуточные выводы 🤔

- Моделей согласованности много

Знакомимся с моделями согласованности - Промежуточные выводы 🤔

- Моделей согласованности много
- Многие из них связаны понятием строгости

Знакомимся с моделями согласованности - Промежуточные выводы 🤔

- Моделей согласованности много
- Многие из них связаны понятием строгости
- Серебряной пули нет

- ✓ Начинаем пугаться распределенных систем
- ✓ Знакомимся с моделями согласованности

➡ CAP теорема и прочие классификации

- 💡 Что за зверь - алгоритм консенсуса?
- 🔧 CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных
- 🔧 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

CAP теорема

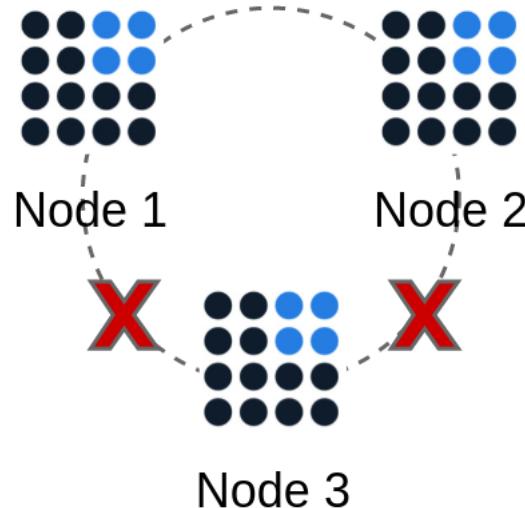
- Сформулирована Eric Brewer в 1998, как утверждение
- В 2002 появилось формальное доказательство

Аббревиатура CAP

- Consistency: подразумевается линеаризуемость
- Availability: каждый запрос, полученный узлом системы, должен приводить к ожидаемому ответу (не к ошибке)
- Partition tolerance: подразумевается коммуникация через асинхронную сеть

Partition tolerance

Network partition - сценарий, когда узлы продолжают функционировать, но некоторые из них не могут общаться между собой



Неформальное определение

В условиях network partition рассматриваемая система может быть:

- Доступна (AP)
- Согласована (CP)

P.S. CA опции в CAP теореме нет и в помине

Критика

- Однобокая классификация, которая почему-то стала популярной

Критика

- Однобокая классификация, которая почему-то стала популярной
- Например, РСУБД с одной read-only репликой не является ни СР, ни АР

Критика

- Однобокая классификация, которая почему-то стала популярной
- Например, РСУБД с одной read-only репликой не является ни СР, ни АР
- Теорема ничего не говорит о времени отклика системы, т.е. АР система может отвечать сколь угодно медленно

Критика

- Однобокая классификация, которая почему-то стала популярной
- Например, РСУБД с одной read-only репликой не является ни СР, ни АР
- Теорема ничего не говорит о времени отклика системы, т.е. АР система может отвечать сколь угодно медленно
- Наконец, network partition - далеко не единственный сценарий отказа

Альтернативы

- PACELC теорема - расширение CAP теоремы (Daniel J. Abadi, 2010)
- PAC = PA | PC (та же CAP теорема)
- ELC = EL | EC:
 - E: else
 - L: latency
 - C: consistency

САР теорема и прочие классификации - Промежуточные выводы 🤔

- Классификации позволяют рассуждать об общих чертах поведения

САР теорема и прочие классификации - Промежуточные выводы 🤔

- Классификации позволяют рассуждать об общих чертах поведения
- Системы из одного и того же класса могут существенно отличаться

✓ Начинаем пугаться распределенных систем

✓ Знакомимся с моделями согласованности

✓ CAP теорема и прочие классификации

➡ Что за зверь - алгоритм консенсуса?

🛠 CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных

🛠 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

Неформальное определение

- Алгоритм консенсуса - алгоритм, позволяющий узлам системы достигнуть консенсус, т.е. принять совместное решение **о том или ином действии**

Неформальное определение

- Алгоритм консенсуса - алгоритм, позволяющий узлам системы достигнуть консенсус, т.е. принять совместное решение **о том или ином** действии
- Под действием часто понимают **однократное** изменение регистра (Paxos)

Неформальное определение

- Алгоритм консенсуса - алгоритм, позволяющий узлам системы достигнуть консенсус, т.е. принять совместное решение **о том или ином** действии
- Под действием часто понимают **однократное** изменение регистра (Paxos)
- С точки зрения отказов рассматривают только non-Byzantine faults

P.S. А еще есть "скандальный" FLP result (1985)

Связь с linearizability

- На практике консенсус нужен на **последовательности** действий

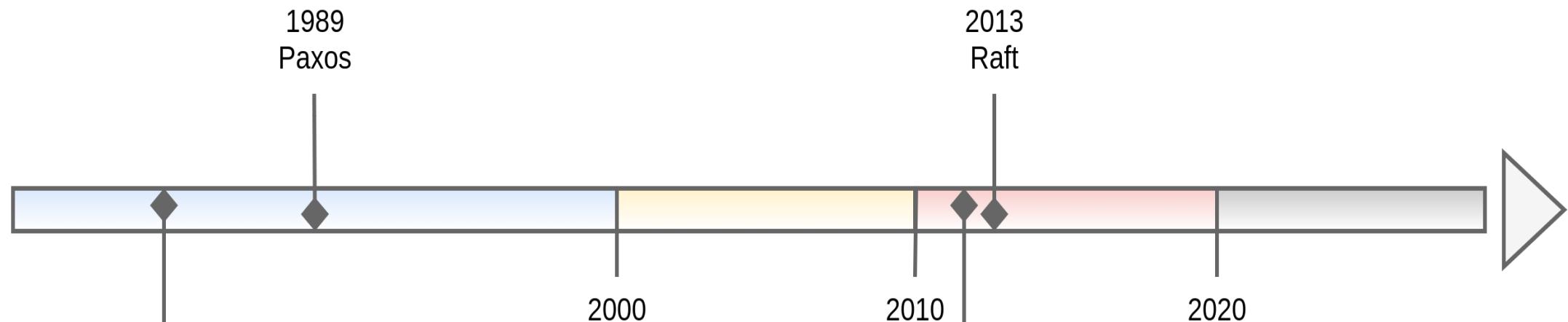
Связь с linearizability

- На практике консенсус нужен на **последовательности** действий
- Поэтому для реализаций встречается определение atomic broadcast (total order broadcast) - консенсус тут нужен для принятия решения о следующем действии
 - Можно показать, что linearizability и total order broadcast можно свести друг к другу

Связь с linearizability

- На практике консенсус нужен на **последовательности** действий
- Поэтому для реализаций встречается определение atomic broadcast (total order broadcast) - консенсус тут нужен для принятия решения о следующем действии
 - Можно показать, что linearizability и total order broadcast можно свести друг к другу
- А значит, мы говорим о CP системах, с точки зрения CAP теоремы

Краткий список алгоритмов консенсуса



Paxos и его подвиды: Chubby, Spanner

Raft: Consul, etcd, Hazelcast, RethinkDB, TiKV и т.д.

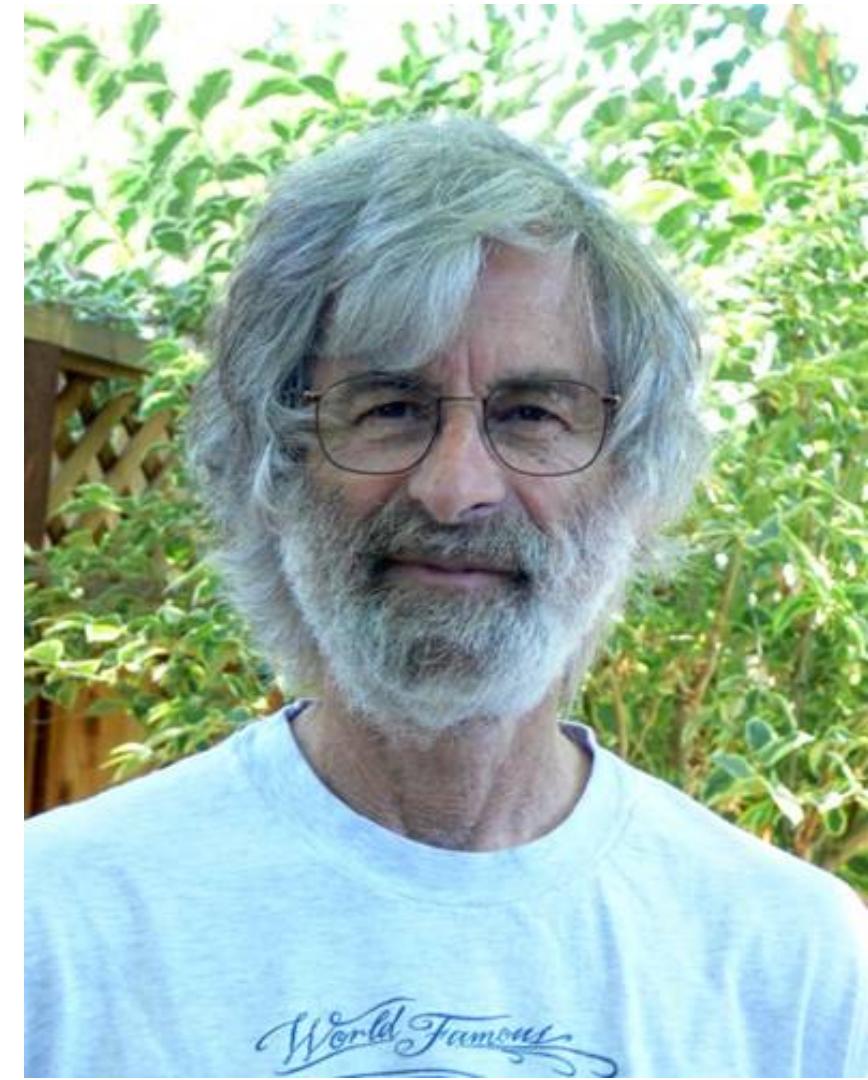
Zab: ZooKeeper

Верификация корректности: теория

- [TLA+](#) (L.Lamport)
- Язык для моделирования программ и систем, распределенных и не только

EXTENDS TLC

```
(* --algorithm hello_world
variable s \in {"Hello", "World!"};
begin
    A:
        print s;
end algorithm; *)
```



Верификация корректности: практика

- [Jepsen](#) (K.Kingsbury a.k.a. aphyr)

```
INFO jepsen.core - Analysis invalid! (ノ益々ノ) ノ
```

Краткий список жертв:

- MongoDB
- Cassandra
- PostgreSQL
- Hazelcast
- Redis



Темная сторона алгоритмов консенсуса (◦ ▼ III ▼)

- Производительность напрямую зависит от задержек сети

Темная сторона алгоритмов консенсуса (◦ ▼ III ▼)

- Производительность напрямую зависит от задержек сети
- Высокая сложность реализации и верификации

Темная сторона алгоритмов консенсуса (◦ ▼ III ▼)

- Производительность напрямую зависит от задержек сети
- Высокая сложность реализации и верификации
- Для работы кластера требуется строгое большинство узлов

Что за зверь - алгоритм консенсуса? - Промежуточные выводы 🤔

- Различных алгоритмов консенсуса много

Что за зверь - алгоритм консенсуса? - Промежуточные выводы 🤔

- Различных алгоритмов консенсуса много
- И алгоритм, и реализацию стоит верифицировать

Что за зверь - алгоритм консенсуса? - Промежуточные выводы 🤔

- Различных алгоритмов консенсуса много
- И алгоритм, и реализацию стоит верифицировать
- Не надо пытаться решить любую проблему через консенсус

- ✓ Начинаем пугаться распределенных систем
- ✓ Знакомимся с моделями согласованности
- ✓ CAP теорема и прочие классификации
- ✓ Что за зверь - алгоритм консенсуса?
- ➡ **CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных**
- 🛠 Pet-проект: CASPaxos на Node.js

CASPaxos

- CASPaxos (D.Rystsov, 2018) - p2p, replicated state

CASPaxos

- CASPaxos (D.Rystsov, 2018) - p2p, replicated state
- CAS - compare-and-set/compare-and-swap

CASPaxos

- CASPaxos (D.Rystsov, 2018) - p2p, replicated state
- CAS - compare-and-set/compare-and-swap
- Модифицирует Paxos (Synod), а не просто использует его как компонент для построения системы

Основы CASPахос

- Использует один регистр (объект)

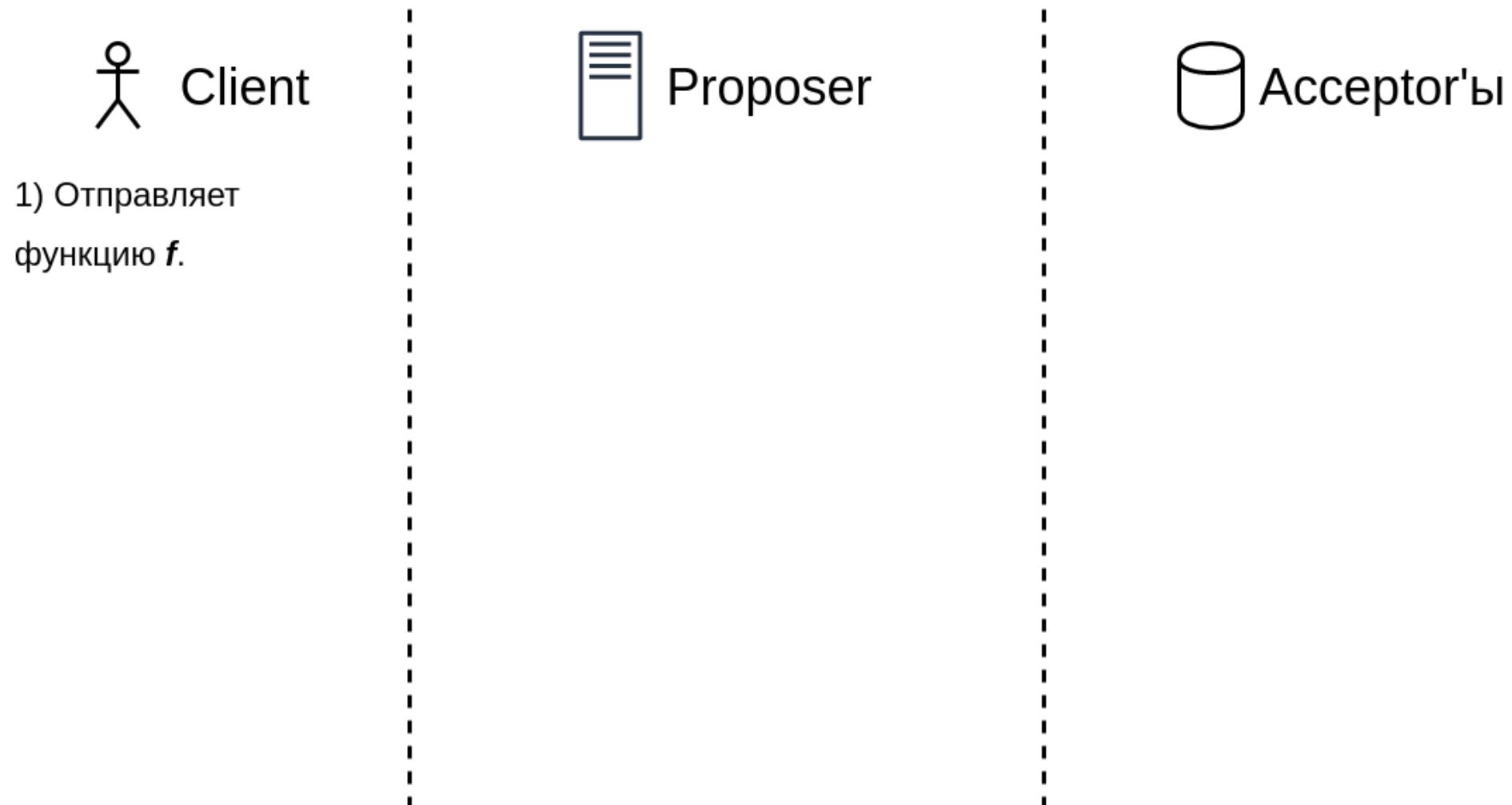
Основы CASPaxos

- Использует один регистр (объект)
- Вводит несколько ролей для процессов:
 - Clients: клиенты системы, отправляют запросы к Proposer
 - Proposers: принимают запросы клиентов, генерируют уникальные номера (proposal ID) и общаются с Acceptors
 - Acceptors: могут принимать предложения Proposers, хранят принятое состояние

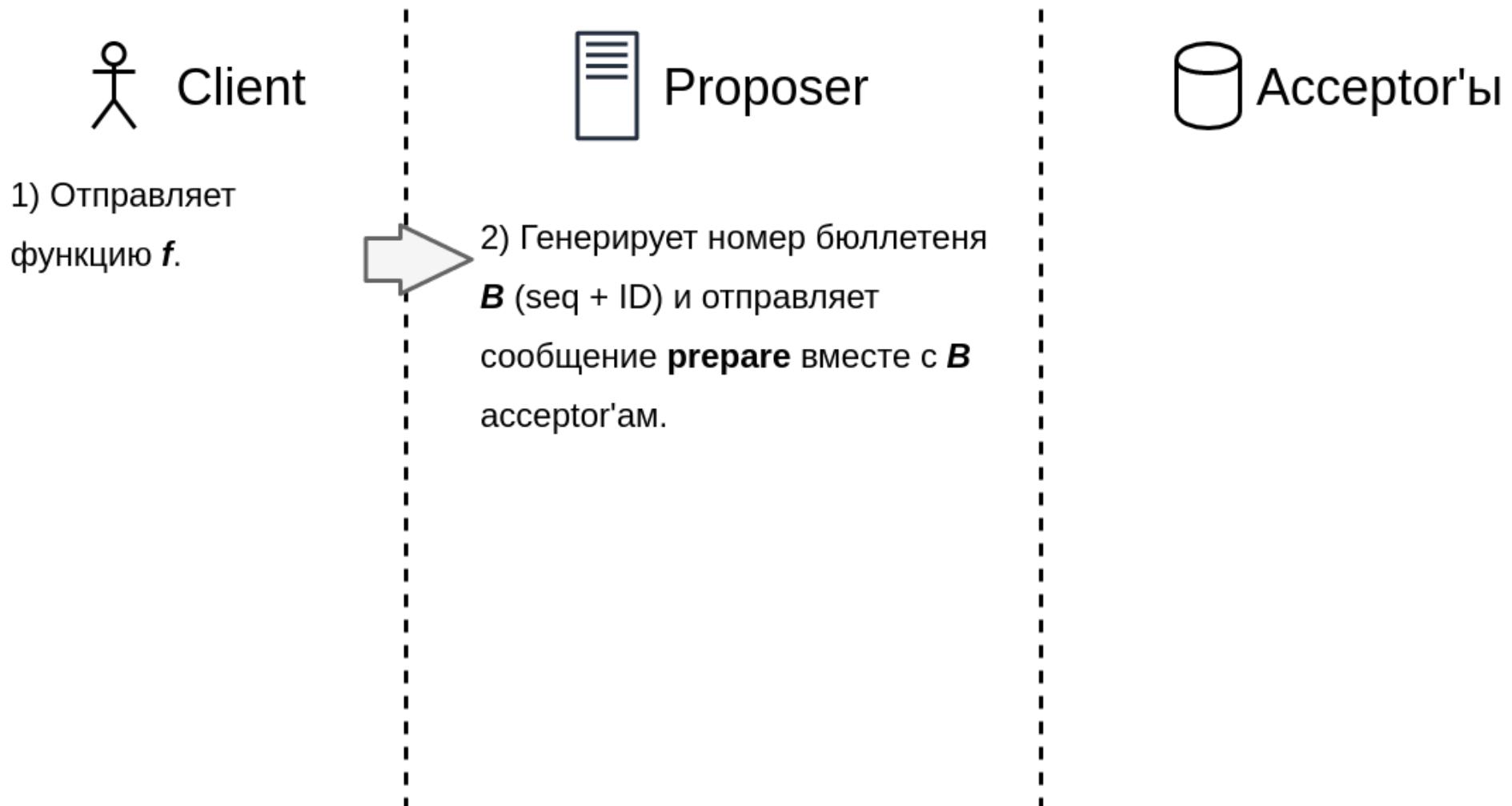
Основы CASPaxos

- Использует один регистр (объект)
- Вводит несколько ролей для процессов:
 - Clients: клиенты системы, отправляют запросы к Proposer
 - Proposers: принимают запросы клиентов, генерируют уникальные номера (proposal ID) и общаются с Acceptors
 - Acceptors: могут принимать предложения Proposers, хранят принятое состояние
- Для сохранения работоспособности системы до F отказов, нужны $2F + 1$ Acceptors

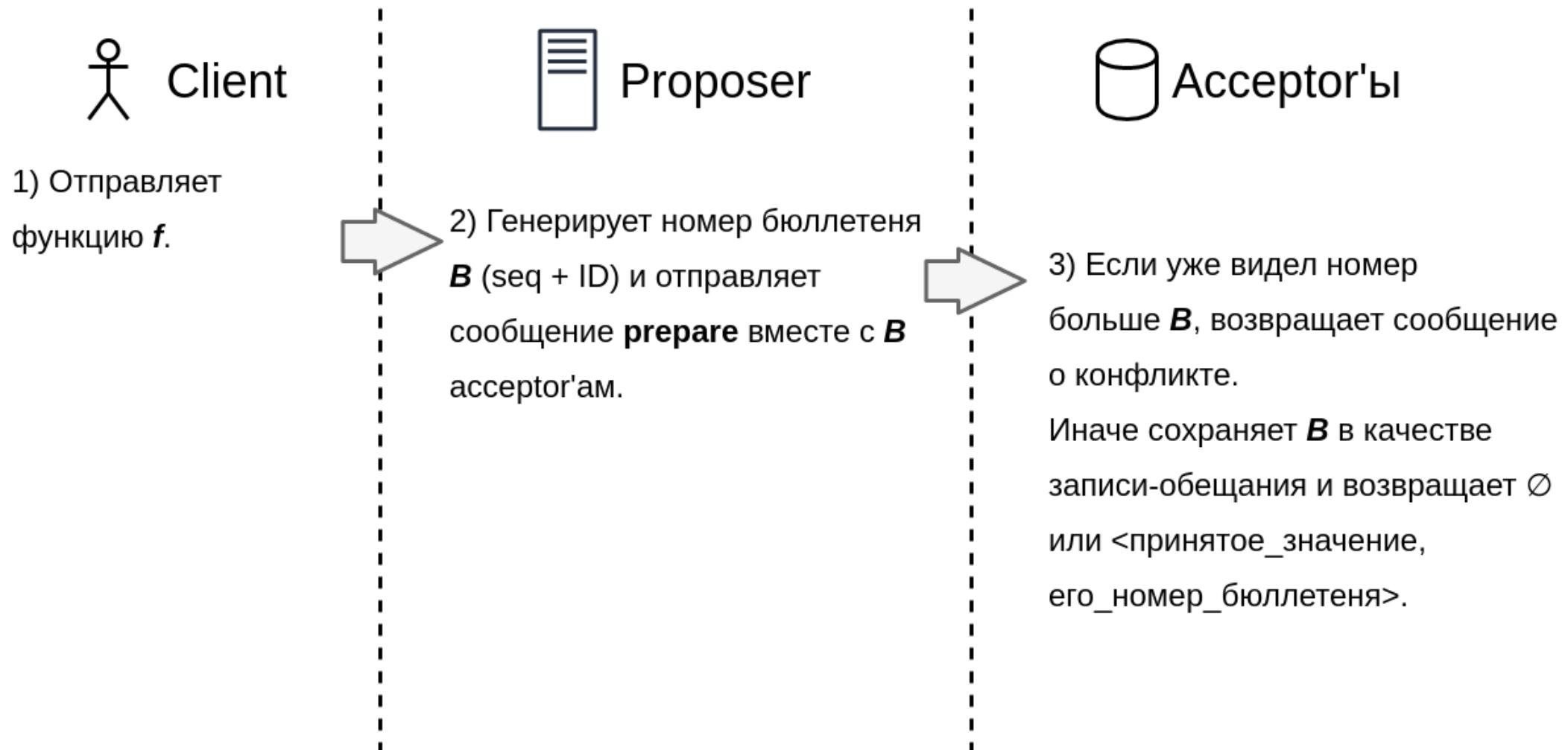
Фаза 1



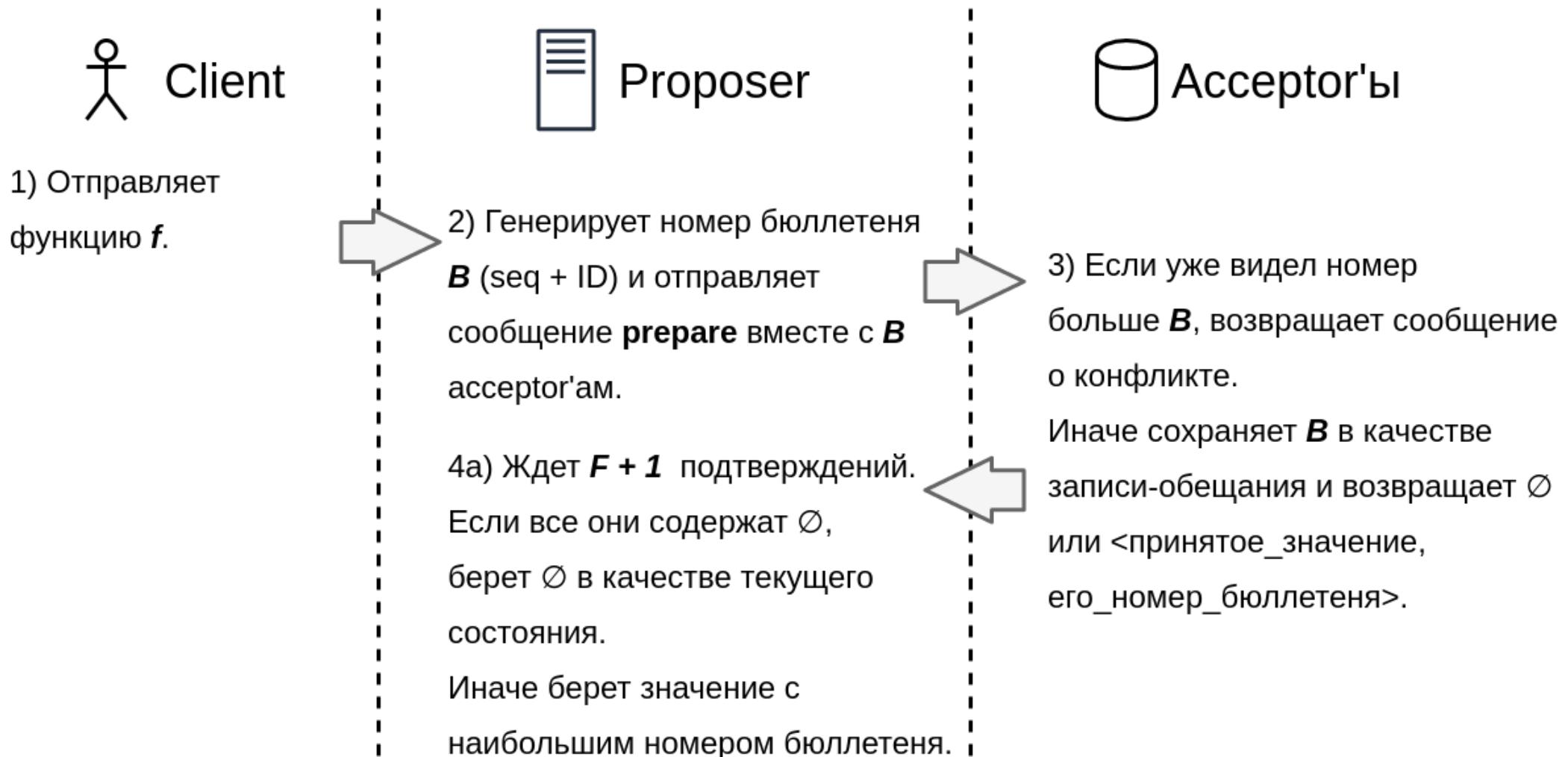
Фаза 1



Фаза 1



Фаза 1



Фаза 2



Client



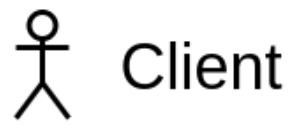
Proposer



Acceptor'ы

4b) Применяет f к текущему состоянию и отправляет сообщение **accept** с парой <результат, B >.

Фаза 2



Client



Proposer

4b) Применяет f к текущему состоянию и отправляет сообщение **accept** с парой <результат, B >.

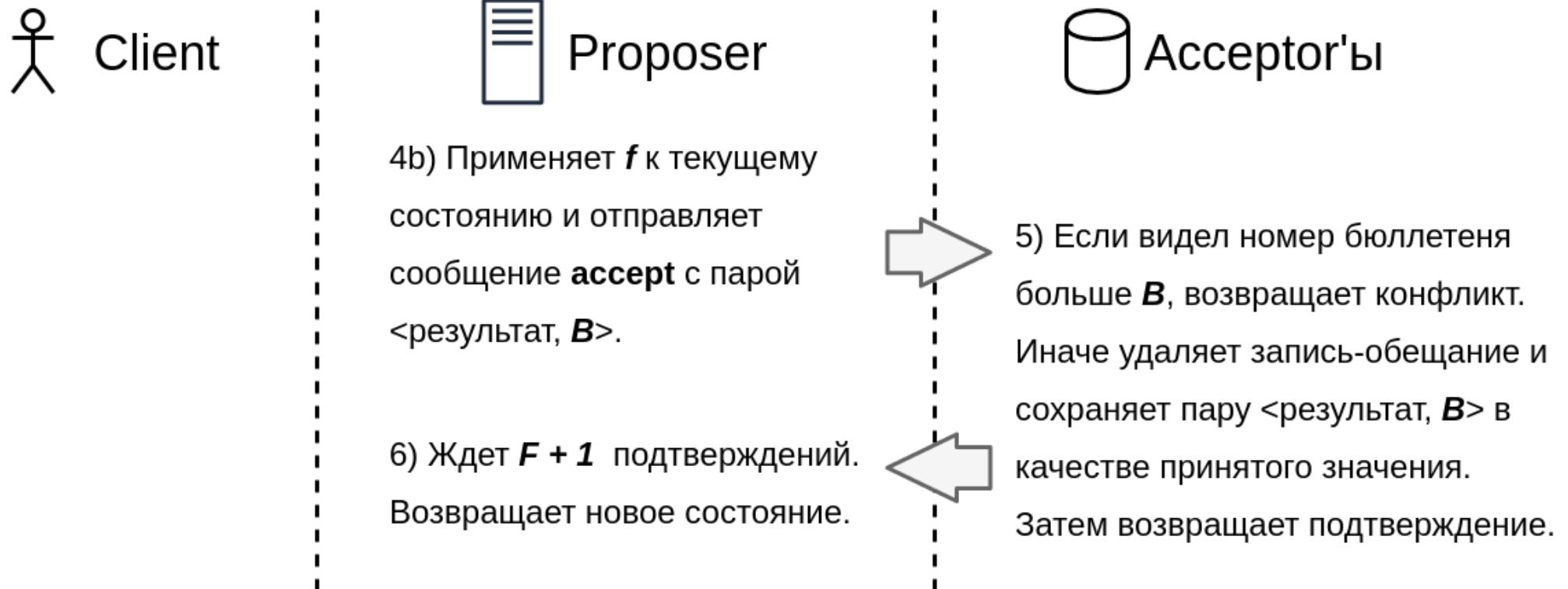


Acceptor'ы

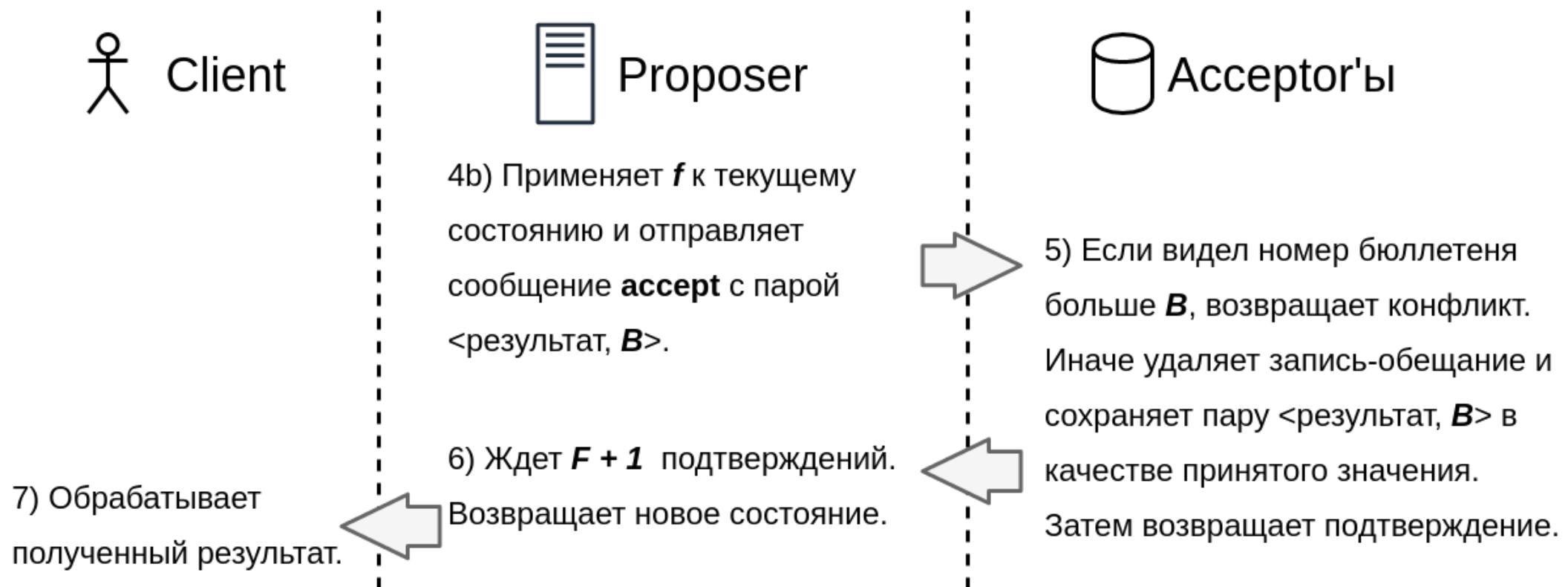


5) Если видел номер бюллетеня больше B , возвращает конфликт. Иначе удаляет запись-обещание и сохраняет пару <результат, B > в качестве принятого значения. Затем возвращает подтверждение.

Фаза 2



Фаза 2



Связь с Synod

CASPaxos эквивалентен Synod, если взять функцию:

```
x -> if x = ∅ then val0 else x
```

CAS регистр на основе CASPaxos

Чтение:

```
x -> x
```

CAS регистр на основе CASPaxos

Инициализация значением val₀:

```
x -> if x = ∅ then (0, val0) else x
```

CAS регистр на основе CASPaxos

Запись значения `val1` при условии версии `3`:

```
x -> if x = (3, *) then (4, val1) else x
```

Хранилище пар ключ-значение на основе CASPaxos

- Хранилище - это набор именованных экземпляров CASPaxos, по одному на ключ
- Преимущества и недостатки подхода в сравнении с тем же Raft выходят за рамки доклада

- ✓ Начинаем пугаться распределенных систем
 - ✓ Знакомимся с моделями согласованности
 - ✓ CAP теорема и прочие классификации
 - ✓ Что за зверь - алгоритм консенсуса?
 - ✓ CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных
- **Pet-проект: CASPaxos на Node.js**

Gryadka

- <https://github.com/gryadka/js>
- ~500 строк JS и Lua кода
- Node.js для proposer'ов, Redis для acceptor'ов
- Внешняя коммуникация - HTTP

Ogorod

- <https://github.com/puzpuzpuz/ogorod>
- 558 строк JS кода
- И proposers, и acceptors живут в одном экземпляре Node.js
- Данные хранятся in-memory
- Внешняя и внутренняя коммуникация - HTTP

Пример использования

```
$ curl -X PUT http://localhost:8080/api/test \
-H "Content-Type: application/json" \
-d '{"foo": "bar"}'
```

```
{"version": 0, "value": {"foo": "bar"}}
```

Пример использования

```
$ curl -X POST http://localhost:8080/api/test/cas \
-H "Content-Type: application/json" \
-d '{"version":0,"value":{"bar":"baz"}}'
```

```
{"version":1,"value":{"bar":"baz"}}
```

Чего не хватает до production-ready?

- Применить оптимизации для Paxos, например, CASPaxos 1RTT
- Поддержка динамической конфигурации, включая версионирование и сохранение на диск
- Поддержка операции delete. Нужен фоновый процесс аля GC (см. статью)
- Интеграция со встраиваемым хранилищем ключ-значение, например, RocksDB
- Перейти с коммуникации для внутренних нужд по HTTP к plain TCP
- Обработка ошибок и логирование
- И многое еще

Подходит ли Node.js для реализации алгоритмов консенсуса?

- Хорошая производительность при I/O-bound нагрузке

Подходит ли Node.js для реализации алгоритмов консенсуса?

- Хорошая производительность при I/O-bound нагрузке
- Зрелые стандартные модули и инструменты

Подходит ли Node.js для реализации алгоритмов консенсуса?

- Хорошая производительность при I/O-bound нагрузке
- Зрелые стандартные модули и инструменты
- Стабильная и развитая экосистема



Призыв к действию

- Распределенных систем бояться - на server-side неходить
- Все, кому интересны высокопроизводительные библиотеки (и распределенные системы) - welcome
- <https://github.com/hazelcast/hazelcast-nodejs-client>
- P.S. Contributions are welcome as well

Спасибо за внимание!



Полезные книги и ссылки

- Designing Data-Intensive Applications, Martin Kleppmann, 2017
- CASPaxos: Replicated State Machines without logs, Denis Rystsov, 2018 -
<https://arxiv.org/abs/1802.07000>
- Paxos Made Simple, Leslie Lamport, 2001 -
<https://lamport.azurewebsites.net/pubs/paxos-simple.pdf>
- <https://raft.github.io/raft.pdf>
- <https://jepsen.io>
- <https://martin.kleppmann.com/2015/05/11/please-stop-calling-databases-cp-or-ap.html>
- <https://vadosware.io/post/paxosmon-gotta-concensus-them-all/>

Исторический бонус: Paxos и его подвиды, Raft

Vanilla Paxos

- Paxos (1998) - p2p (leaderless)
- В основе - Synod/Single-Decree Paxos
- Позволяет принять строго одно решение (о значении регистра)
- Часто под Paxos подразумевают семейство алгоритмов

Подвиды Paxos

- Multipaxos (2001)
- FastPaxos (2004~2005)
- Generalized Paxos (2004~2005)
- Mencius (2008)
- Multicoordinated Paxos (2006)
- Vertical Paxos (2009)
- Ring Paxos (2010) / Multi-Ring Paxos (2010)
- SPaxos (2012) / EPaxos (2013) / FPaxos (2016) / KPaxos (2017) / WPaxos (2017)
- **CASPaxos** (2018)
- SDPaxos (2018)

Raft

- Raft (2013) - single leader, replicated log
- Время делится на периоды (term), каждый из которых начинается в выбора лидера
- Упор сделан на простоту понимания алгоритма
- <https://raft.github.io>

