

5. Динамическая КОМПИЛЯЦИЯ

Интерпретируемые языки и VM

➤ Интерпретируемые языки

- Основные особенности:
 - Управление памятью (сборка мусора, контроль доступа к объектам, границ при обращении к массивам, и т.п.)
 - Динамические типы (классы могут изменяться, а также создаваться новые во время выполнения)
 - Создание нового кода во время выполнения (*eval*)
- Эти особенности делают статическую компиляцию затруднительной или невыгодной
- Примеры: JavaScript, Python, Ruby (и в некоторой степени Java)

Примеры динамических свойств языка

➤ Наследование в JS

- «Родитель» - объект, а не класс
- Если поля или метода нет в самом объекте, оно ищется в базовом - «прототипе»:

```
let animal = {  
  eats: true  
};
```

```
let rabbit = {  
  jumps: true  
};
```

```
rabbit.__proto__ = animal;
```

```
var x = rabbit.eats; // true
```

- Прототип может быть переопределен во время исполнения!

Примеры динамических свойств языка

➤ Наследование в JS

- «Родитель» - объект, а не класс
- Если поля или метода нет в самом объекте, оно ищется в базовом - «прототипе»:

```
var foo = {name: "foo", one: 1, two: 2};
var bar = {two: "two", three: 3};
bar.__proto__ = foo;
console.log("one = " + bar.one); // from foo
console.log("two = " + bar.two); // from bar (overridden)
console.log("three = " + bar.three); // from bar (newly added)
```

```
$ d8 ex-proto.js
```

```
one = 1
two = two
three = 3
```

- Прототип может быть переопределен во время исполнения!

Интерпретация vs JIT компиляция

- Стандартный подход к реализации среды выполнения:
 - Программа компилируется в *байт-код* – набор простых инструкций, напоминающих ассемблер
 - Байт-код интерпретируется в виртуальной машине, которая также управляет динамическими объектами и предоставляет доступ к функциям времени выполнения
- JIT (Just-In-Time) Compilation – компиляция «на лету»:
 - Вместо интерпретации, байт-код сначала компилируется в код целевой архитектуры
 - Функции компилируются по мере необходимости, а не все заранее
 - Используется профилирование и спекулятивные оптимизации

JIT компиляция

➤ Преимущества JIT-компилятора:

- Выполняет оптимизацию кода
- Может использовать внутреннее представление более низкого уровня, и более подходящее для оптимизаций, чем байт-код (например, SSA)
- Может оптимизировать программу под конкретные входные данные, т.к. работая во время выполнения, располагает данными о профиле программы («горячие» места, типы данных, значения переменных, вероятности переходов)
- Если профиль изменился, может «на лету» перекомпилировать программу

JIT компиляция

➤ Недостатки:

- По сравнению с «обычным» (статическим) компилятором, сильно ограничен в сложности выполняемых оптимизаций, т.к. не должен задерживать выполнение программы

➤ Решение:

- Оптимизировать только самые «горячие» места
- Многоуровневый JIT: каждый уровень обрабатывает все более «горячие» места, сложность оптимизаций нарастает
- Делать сложные оптимизации для следующего уровня параллельно с исполнением неоптимизированного кода на предыдущем уровне

Современные JavaScript-«движки»

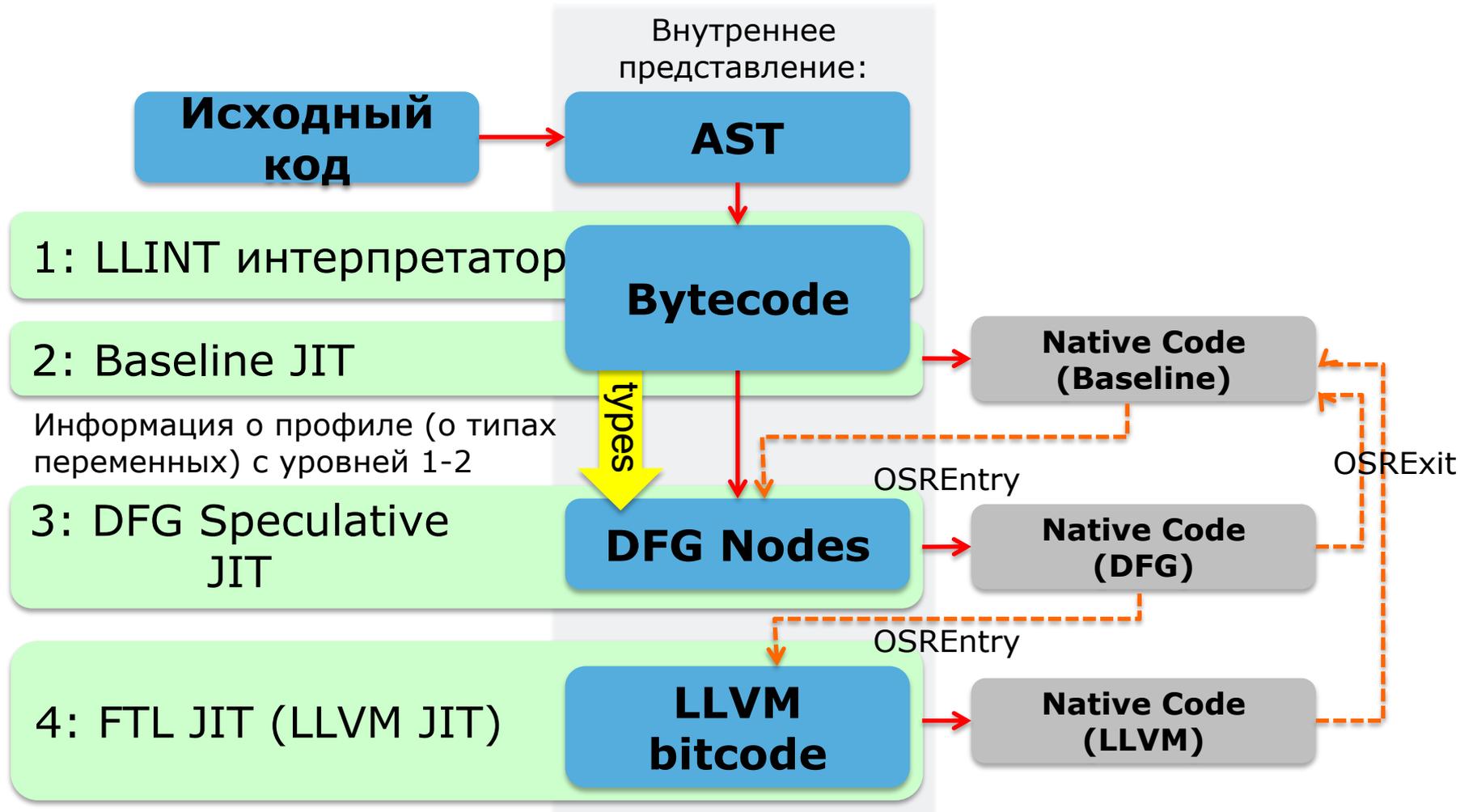
- Самые популярные open-source проекты:
 - **SFX** (JavaScriptCore)
 - Используется в Safari и других браузерах на базе WebKit (BlackBerry)
 - Составная часть браузерного движка WebKit, разрабатывается Apple
 - **V8**
 - Используется в Google Chrome, встроенном браузере Android, а также Node.js
 - Основной JavaScript-движок в Blink (изначально был заменой для SFX в WebKit), разрабатывается Google
 - Mozilla SpiderMonkey
 - JS движок в Mozilla FireFox
- Общие особенности SFX и V8
 - Многоуровневый JIT, каждый уровень имеет собственное внутреннее представление и набор оптимизаций
 - Используется профилирование и спекулятивные оптимизации
 - Всего в ~2 раза медленнее C++ кода (SunSpider benchmark)

Особенности JIT

➤ Многоуровневый JIT

- 1-й уровень: JIT с быстрой компиляцией (либо даже интерпретатор) – включает только самые простые оптимизации. Сразу же начинает выполнять байткод, и собирает информацию о профиле программы
- 2-й уровень: оптимизирует только «горячие» места, выполняет более сложные оптимизации с использованием профиля, использует собственное внутреннее представление (например, SSA), может быть спекулятивным
- Возможно большее число уровней, а также переключение между компиляторами разных уровней при изменении профиля

Устройство Webkit JavaScriptCore



Итеративный интерпретатор байтового кода

```
// Итеративный интерпретатор байтового кода на языке Си
// с явным циклом
void Interpreter(void)
{
    const byte *ip;
    // ...
    for (;;) {
        switch (*ip++) {
            case iadd: {
                const int a = pop();
                const int b = pop();
                push(a + b) break;
            }
            // ...
        }
    }
}
```

Итеративный интерпретатор байтового кода

```
// Итеративный интерпретатор байтового кода на ассемблере
// с явным циклом
InterpreterLoop:
    tmp = *ip++;
    jmp bytecode_table[BytesInWord*tmp];
...
L_iadd:
    pop tmp1;
    pop tmp2;
    tmp1 += tmp2;
    push tmp1;
    jmp InterpreterLoop;
...
Bytecode_table: .word ..., L_iadd, ...
```

Итеративный интерпретатор байтового кода

```
// Итеративный интерпретатор байтового кода на ассемблере
// с неявным циклом
next: macro()
    tmp = *ip++;
    jmp bytecode_table[BytesInWord*tmp];
endm
```

Interpreter:

```
    next();
```

...

L_iadd:

```
    pop tmp1;
```

```
    pop tmp2;
```

```
    tmp1 += tmp2;
```

```
    push tmp1;
```

```
    next();
```

...

```
Bytecode_table: .word ..., L_iadd, ...
```

Данная реализация позволяет сократить накладные расходы на выполнение избыточных инструкций диспетчеризации

После исполнения текущей инструкции интерпретатор не возвращается в общую точку (switch), а переходит сразу на сервисную процедуру следующей инструкции

Представление данных внутри компилятора

➤ JavaScriptCore:

- Все значения - вещественные double
- 64-битные double: 1 знак + 11 экспонента + 52 бит мантисса
- Для остальных типов используется специальное значение стандарта IEEE754 QNaN:
 - старшие 12 бит установлены в 1
 - младшие биты могут быть использованы для представления целых и указателей на объекты
- В целочисленной арифметике можно использовать только младшие 32-битные половины чисел, и хранить их на целочисленных регистрах

Представление данных в V8

- Факт: все указатели выровнены - их значения в бинарном виде - *чётные*
- Как это используется в V8:
 - *Нечетные* значения представляют указатели на *boxed* объекты (младший бит обнуляется перед использованием)
 - *Чётные* значения представляют "small 31-bit integers" (на 32-битной архитектуре)
 - Настоящее значение числа получается сдвигом влево на 1 бит (т.е. $\times 2$)
 - Вся арифметика корректна, а переполнения проверяются аппаратно

Пример (код, созданный LLVM JIT)

```
function hot_foo(a, b) {  
    return a + b;  
}
```

```
loc_5345F407163:  
mov    rax, [rbp+arg_8]  
test   al, 1  
jnz    loc_5345F40718F
```

Not an SMI

```
mov    rbx, [rbp+arg_0]  
test   bl, 1  
jnz    loc_5345F407194
```

```
loc_5345F40718F:  
call   near ptr 5345F00600Ah
```

Not an SMI

```
add    rbx, rax  
jo     loc_5345F407199
```

```
loc_5345F407194:  
call   near ptr 5345F006014h
```

Overflow

```
mov    rax, rbx  
mov    rsp, rbp  
pop    rbp  
retn  18h
```

```
loc_5345F407199:  
call   near ptr 5345F00601Eh  
xchg   ax, ax  
sub    5345F407163, rax
```

Deoptimization:
go back to 1st-level
Full Codegen compiler

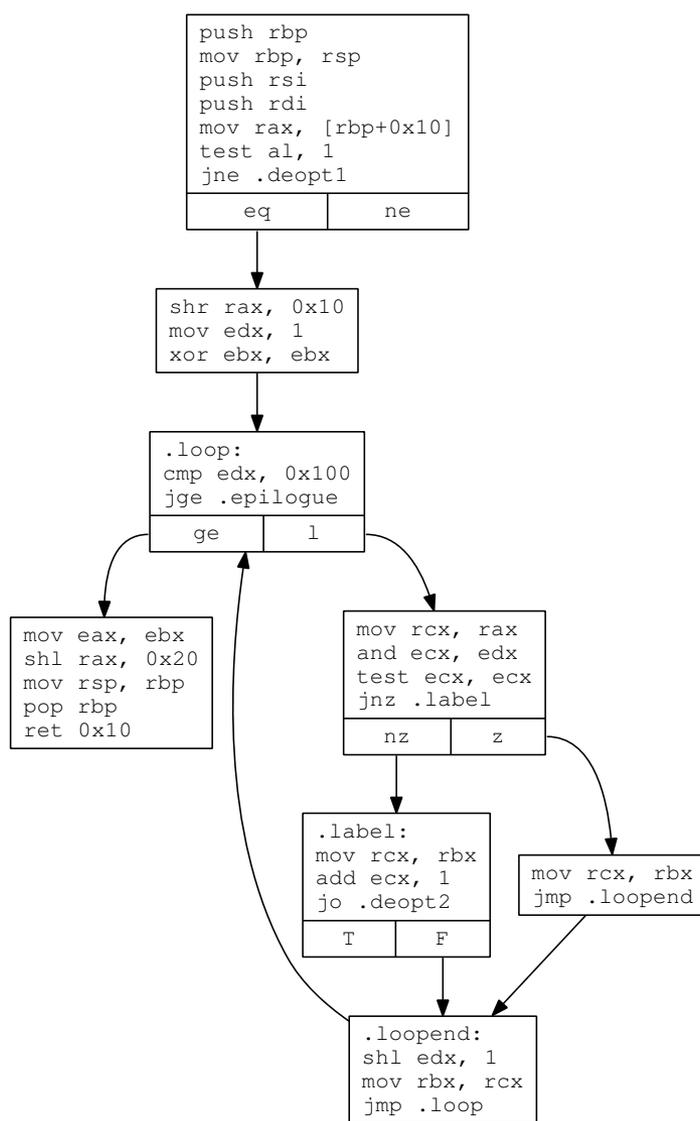
Пример из бенчмарка SunSpider

```
function foo(b) {  
  var m = 1, c = 0;  
  while(m < 0x100) {  
    if(b & m) c++;  
    m <<= 1;  
  }  
  return c;  
}
```

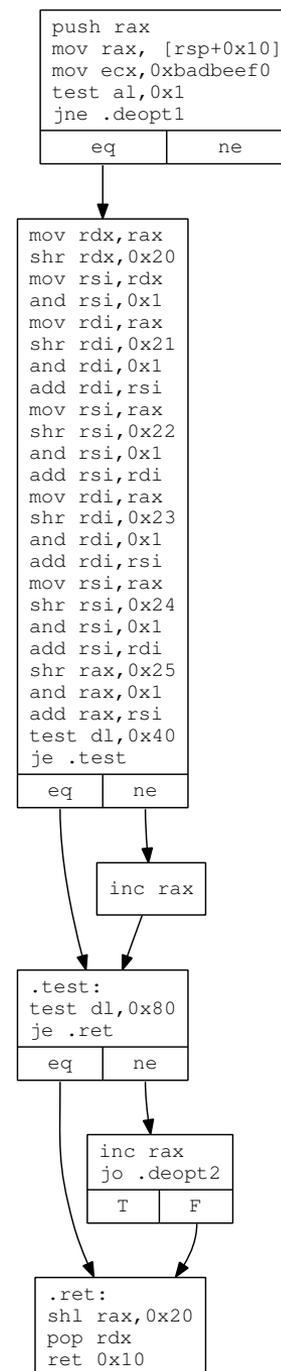
```
function TimeFunc(func) {  
  var sum = 0;  
  for(var x = 0; x < ITER; x++)  
    for(var y = 0; y < 256; y++)  
      sum += func(y);  
  return sum;  
}  
  
result = TimeFunc(foo);
```

SunSpider test: bitops-bits-in-byte.js

Iterations	x100	x1000
Execution time, Crankshaft , <i>ms</i>	0.19	1.88
Execution time, LLV8 , <i>ms</i>	0.09	0.54
Speedup, times	x2.1	x3.5



Original V8 CrankShaft's code



LLV8-generated code
(LLVM applied loop unrolling)

Компиляция JavaScript в JSC: LLINT и Baseline JIT

JavaScript:

```
function foo() {  
  var i, s;  
  for (i = 0; i < 10000; i++) {  
    s += i;  
  }  
  return s;  
}
```



байткод LLINT / Baseline JIT:

```
[ 0] enter  
[ 1] mov      r0, Int32: 0 (@k0)  
[ 4] jnless   r0, Int32: 10000 (@k1), 16(->20)  
[ 8] loop_hint  
[ 9] add      r1, r1, r0  
[14] pre_inc   r0  
[16] loop_if_less r0, Int32: 10000 (@k1), -8(->8)  
[20] ret      r1
```

Компиляция JavaScript в JSC: DFG JIT (SSA)

11: < 1:2> **GetLocal(@10, JS, r1(E), bc#9)** predicting StringIntDoublerealDoublenanOther

0x7f86bc7bc8fe: mov 0x8(%r13), %rcx

13: < 2:3> **GetLocal(@12, JS, r0(H<Int32>), bc#9)** predicting Int

0x7f86bc7bc902: mov 0x0(%r13), %ebx

14: <!1:2> **ValueAdd(@11, @13<Int32>, JS|MustGen|MightClobber|MayOverflow, bc#9)**

0x7f86bc7bc906: or %r14, %rbx

0x7f86bc7bc909: mov %rcx, 0x10(%r13)

0x7f86bc7bc90d: mov %rbx, 0x18(%r13)

0x7f86bc7bc911: mov %rcx, %rsi

// r0 <- i (Int32)

0x7f86bc7bc914: mov %rbx, %rdx

// r1 <- s (Unknown)

0x7f86bc7bc917: mov %r13, %rdi

0x7f86bc7bc91a: mov \$0x9daff0, %r11

0x7f86bc7bc924: mov \$0xbadbeef, (%r11)

0x7f86bc7bc92b: mov \$0x9daff4, %r11

0x7f86bc7bc935: mov \$0xbadbeef, (%r11)

0x7f86bc7bc93c: mov \$0x0, -0x2c(%r13)

0x7f86bc7bc944: mov \$0x7f8700738685, %r11

0x7f86bc7bc94e: call %r11

0x7f86bc7bc951: xor %esi, %esi

0x7f86bc7bc953: mov \$0x9dc908, %r11

0x7f86bc7bc95d: mov (%r11), %r11

0x7f86bc7bc960: test %r11, %r11

0x7f86bc7bc963: jnz 0x7f86bc7bca05

15: < 2:-> **SetLocal(@14, r1(E), bc#9)** predicting StringIntDoublerealDoublenanOther

0x7f86bc7bc969: mov %rax, 0x8(%r13)

Компиляция JavaScript в JSC: DFG JIT (SSA)

```
19:      < 1:2>JSConstant(JS, $3 = Int32: 1, bc#14)
20:      <!2:2>ArithAdd(@13<Int32>, @19<Int32>, Number|MustGen|CanExit, bc#14) // i++
      0x7f86bc7bc96d: mov 0x18(%r13), %rsi
      0x7f86bc7bc971: mov %rsi, %rdi
      0x7f86bc7bc974: add $0x1, %edi
      0x7f86bc7bc977: jo 0x7f86bc7bca17
21:      < 1:-> SetLocal(@20<Int32>, r0(H<Int32>), bc#14) predicting Int
      0x7f86bc7bc97d: mov %edi, 0x0(%r13)
22:      < 1:3>JSConstant(JS, $1 = Int32: 10000, bc#16)
23:      <!1:3>CompareLess(@20<Int32>, @22<Int32>, Boolean|MustGen|MightClobber, bc#16)
      0x7f86bc7bc981: cmp $0x2710, %edi
      0x7f86bc7bc987: jl 0x7f86bc7bc8fe
24:      <!0:-> Branch(@23<Boolean>, MustGen|CanExit, T:#1, F:#3, bc#16)
```

Замена на стеке (On-Stack Replacement)

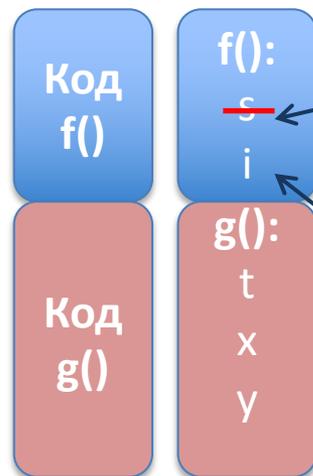
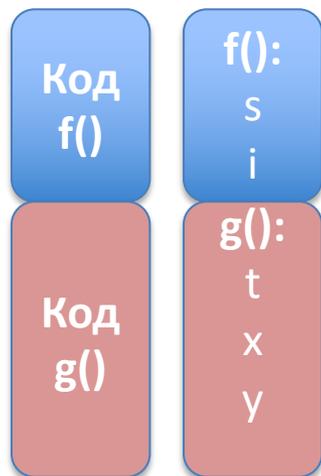
```
function g(t) {  
  var x, y;  
  ...  
}
```

```
function f() {  
  for (var i = 0; i < 10000; i++) {  
    s = g(i);  
  }  
}
```

i=1000: переход на
DFG JIT:

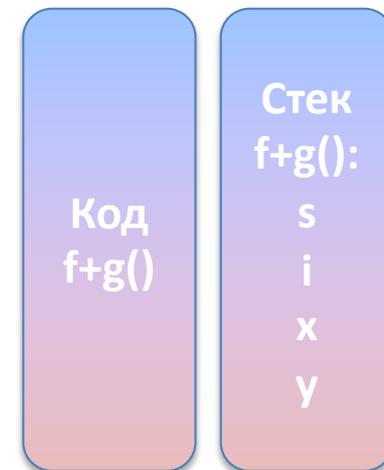
i=2000 в DFG JIT
принято решение
о встраивании g() в
f():

Baseline JIT:



переменная
может быть
удалена

или быть
распределена
в регистр



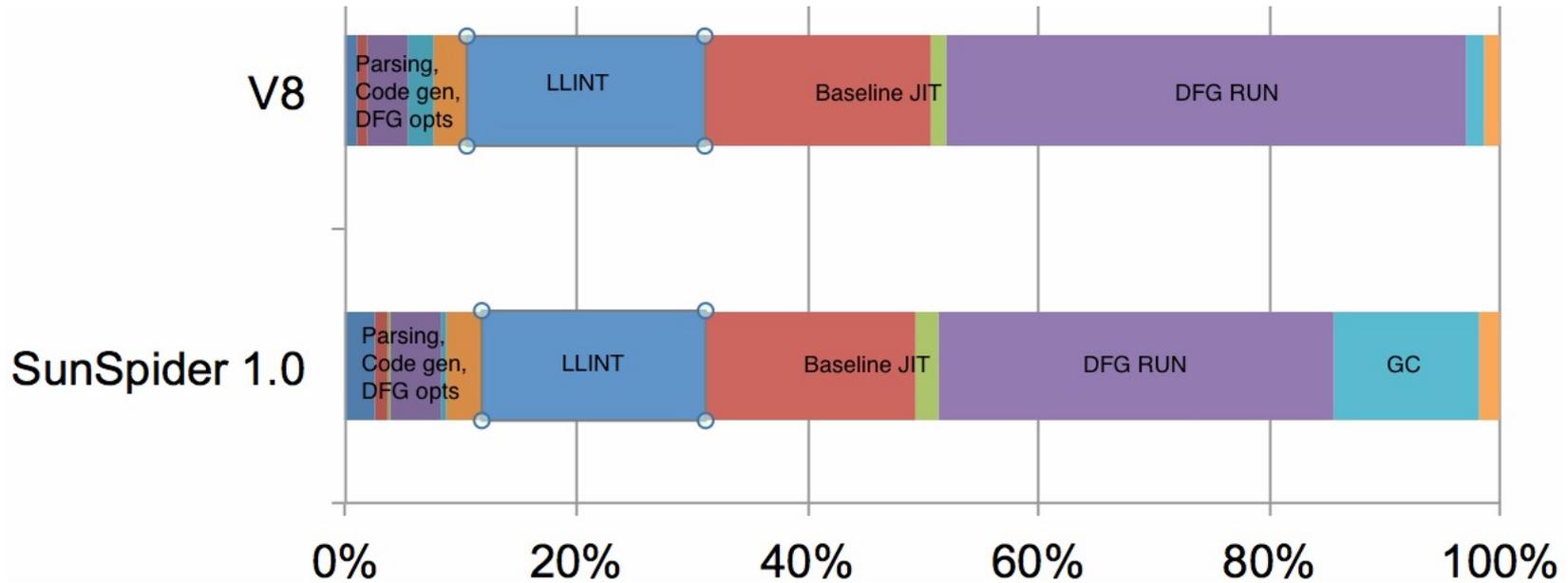
По-разному оптимизированный код работает с разной раскладкой стека

Особенности JIT

➤ Спекулятивный JIT

- Специализирует код для данных, полученных при профилировании (прежде всего типы объектов). Для обработки остальных случаев предусмотрены проверки, возвращающие выполнение на предыдущий уровень JIT
- Например, если профилирование показывает, что код работает только с целыми числами, можно использовать целочисленную арифметику и «обычные» регистры процессора, а результаты операций проверять на переполнение, и если оно произошло, продолжить выполнение на «базовом» JIT, код которого работает для любых типов объектов

Анализ работы JavaScriptCore



■ Построение AST

■ Генерация BaselineJIT кода

■ Перекомпиляция DFG

■ [Run] LL Interpreter

■ [Run] BaselineJIT after DFG

■ Garbage Collection

■ Создание Bytecode

■ Компиляция DFG первый раз

■ SpeculativeJIT

■ [Run] BaselineJIT

■ [Run] DFG JIT

■ Miss

Компоненты JSC: сравнение

Время выполнения мульти-язычного теста PL benchmark от автора Martin Richards

Тест	Время, мс
Язык C	1.2
JavaScript обычный интерпретатор	129
LLINT интерпретатор	58
Baseline JIT	8.4
DFG JIT	2.1

Сравнение производительности уровней JIT у JavaScriptCore

Test	V8-richards speedup, times		Browsermark speedup, times	
	Relative to interpreter	Relative to prev. tier	Relative to LLINT	Relative to prev. tier
JSC interpreter	1.00	-	n/m	-
LLINT	2.22	2.22	1.00	-
Baseline JIT	15.36	6.90	2.50	2.5
DFG JIT	61.43	4.00	4.25	1.7
Same code in C	107.50	1.75	n/m	-

Особенности оптимизации JavaScript

0 / -1 = ?

Особенности оптимизации JavaScript

$$0 / -1 = ?$$

$$1 / (0 / -1) = ?$$

Особенности оптимизации JavaScript

$$0 / -1 = -0$$

$$1 / (0 / -1) = -INF$$

Отрицательный ноль

```
function foo() {  
  var x = 1;  
  var y = -1;  
  var s;  
  var i;  
  for (i = 0; i < 2001; i++) {  
    if (i == 2000) x = 0;  
    s = 1/(x/y);  
  }  
  return s;  
}  
var a = (1/(0/-1)).toString();  
var b = foo().toString();
```

В выражении $1/(x/-1)$ переменная x меняет значение с 1 на 0.

Аналогичные примеры строятся для выражений

$1/(-x)$ и $1/(x/-1+(-0))$, а так же для выражения $1/(x \% 4)$, в последнем x меняет значение с 1 на -4

Проверка на отрицательный ноль

Результатом должно быть $-\text{Infinity}$

$1 / (-0)$; $1 / (0 / -3)$; $1 / (-4 \% 4)$

Проверки при целочисленном делении

$x \% y$ равно -0 , когда $\text{result} == 0$ и $x < 0$

x / y равно -0 , когда $x == 0$ и $y < 0$

Проверка не всегда необходима:

$5 / (A \% B + 3)$