Zircon 笔记

许中兴

May 5, 2018

Contents

1 Bootloader

让 make 输出详细的编译过程。

```
make V=1 arm64 > make.log
```

在 qemu 里运行 Zircon 的命令为:

```
qemu-system-aarch64 -m 2048 -nographic -net none -smp 4 \
    -kernel /Users/xzx/zircon/build-arm64/qemu-zircon.bin \
    -machine virtualization=true -cpu cortex-a53 \
    -machine virt,gic_version=3 \
    -initrd /Users/xzx/zircon/build-arm64/bootdata.bin \
    -append 'TERM=xterm-256color \
    kernel.entropy-mixin=a7324cb430cbac8... \
    kernel.halt-on-panic=true '
```

可以看出内核文件是 qemu-zircon.bin。我们在 make.log 里找一下这个文件是怎么来的。

```
./build-arm64/tools/mkbootfs -o build-arm64/qemu-zircon.bin \
    ./build-arm64/zircon.bin --header ./build-arm64/qemu-boot-shim.bin \
    --header-align 65536
```

mkbootfs 会把 qemu-zircon.bin 所代表的内核映像写在 offset 为 65536 的地方。在之前写入的是 boot-shim 的内容。qemu-zircon.bin 的布局实际上是由 image.S 决定的。

1.1 mkbootfs 一些细节

1. `system = true, ramdisk = false, header\_align = 65536`
2. 调用`import_file(path, system, ramdisk)`
   (a) 接着调用`import_file_as(fn, ITEM_BOOTDATA, hdr.length, &hdr)`
   (b) 调用`import_directory_entry("bootdata", fn, &s)`,构造一个 fsentry, length 是输入文件的长度。
   (c) 构造`first_item, type=ITEM_BOOTDATA, first, last`都指向`fsentry`
3. 进入`write_bootdata(output_file, first_item, header_path, header_align)`
   (a) 首先把 header 原封不动的写入目标文件
   (b) 然后 seek 到 header align 的位置
   (c) 然后再留出一个`bootdata_t` 的位置
   (d) copybootdatafile(fd, item->first->srcpath, item->first->length)
      i. 首先把`BOOTDATA_CONTAINER` 读到 hdr 里
      ii. 然后把剩下的内核映像原封不动的写入目标文件

(e) 把BOOTDATA_CONTAINER 再写入之前留出来的bootdata_t 的位置

qemu-boot-shim.bin 的来历:

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-objcopy -O binary \
    build-arm64/boot-shim/qemu/boot-shim.elf build-arm64/qemu-boot-shim.bin
```

boot-shim.elf 的来历:

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-ld -nostdlib --build-id -z noexecstack \
    -z max-page-size=4096 --gc-sections  --emit-relocs --build-id=none \
    ./build-arm64/boot-shim/qemu/boot-shim.S.o \
    ./build-arm64/boot-shim/qemu/boot-shim.c.o \
    ./build-arm64/boot-shim/qemu/debug.c.o \
    ./build-arm64/boot-shim/qemu/devicetree.c.o \
    ./build-arm64/boot-shim/qemu/util.c.o  \
    -T kernel/target/arm64/boot-shim/boot-shim.ld \
    -o build-arm64/boot-shim/qemu/boot-shim.elf
```

boot-shim.S 中 _start 的地址是 0。所以 qemu-zircon.bin 加载之后，自然就从 boot-shim.S 的 _start 开始执行。那么，内核的 _start 又是如何找到的呢? 注意到有这样一段代码:

```
    // x0: pointer to device tree
    // x1: pointer to kernel bootdata container
    bl      boot_shim

    // kernel entry point is returned in x0
    mov     tmp, x0

    // pass bootdata to kernel in x0
    adr     x0, bootdata_return
    ldr     x0, [x0]

    br      tmp
```

也就是说，boot_shim 函数应该会找到 kernel 的 entry point。我们去看一下。

```
return kernel_base + kernel->data_kernel.entry64;
```

这里 kernel_base 就是 KERNEL_ALIGN=65536。boot_shim 函数从 bootdata 中获得入口地址。bootdata 是 mkbootfs 这个工具填写到启动映像里的。在 image.S 的头上就是 bootdata。

```
// BOOTDATA_KERNEL payload (bootdata_kernel_t)
DATA(_bootdata_kernel_payload)
    // The boot-shim code expects this to be an offset from the beginning
    // of the load image, whatever the kernel's virtual address.
```

```
    .quad IMAGE_ELF_ENTRY - _bootdata_file_header
    .quad 0
END_DATA(_bootdata_kernel_payload)
```

从而，上面的 br tmp 能够正确跳转到内核入口。

boot-shim.S 文件里设置了 stack pointer，指向了 boot-shim 之后，kernel 之前的一块大小为 4k 的内存区域。

zircon.bin 的来历：

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-objcopy \
    -O binary build-arm64/zircon-image.elf build-arm64/zircon.bin
```

zircon-image.elf 的来历：

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-ld -nostdlib --build-id -z noexecstack \
    -z max-page-size=4096 --gc-sections --build-id=none \
-o build-arm64/zircon-image.elf -T kernel/image.ld \
    --just-symbols ./build-arm64/zircon.elf \
./build-arm64/kernel-vars.ld ./build-arm64/zircon.image.o
```

链接脚本 image.ld 内容：

```
ENTRY(IMAGE_ELF_ENTRY)

SECTIONS {
    . = IMAGE_LOAD_START;

    .load_image : {
        KEEP(*(.text))
    } :load_image

    /*
     * When a boot loader is actually using the ELF headers, it needs to
     * know how much memory to reserve after the load image (p_filesz is
     * the load image, and p_memsz > p_filesz to indicate the extra space
     * to reserve).  This ensures that the segment has the right p_memsz.
     */
    .bss : {
        . += ABSOLUTE(IMAGE_MEMORY_END) - ABSOLUTE(.);
ASSERT(ABSOLUTE(.) == ABSOLUTE(IMAGE_MEMORY_END), "image layout bad");
    }
}

PHDRS {
    load_image PT_LOAD FLAGS(7); /* PF_R|PF_W|PF_X */
}
```

ENTRY 指定了程序入口的虚拟地址，它对应于 ELF Header 中的 entry 项。IMAGE_ELF_ENTRY 的定义在 kernel/arch/arm64/start.S 中。

```
// This symbol is used by image.S.
.global IMAGE_ELF_ENTRY
IMAGE_ELF_ENTRY = _start
```

实际上在最终生成的内核映像中 ELF 结构是不存在的，所以上面的 ENTRY 信息并没有实际的用处。

IMAGE_LOAD_START 是在 kernel.ld 中定义的符号，它的值是-4GB

```
. = KERNEL_BASE;
PROVIDE_HIDDEN(__code_start = .);

...

IMAGE_LOAD_START = __code_start;
```

KERNEL_BASE 定义在 kernel/arch/arm64/rules.mk

```
KERNEL_BASE := 0xffffffff00000000
```

整个内核映像的起始虚拟地址是-4GB，但是入口并不是这个地址，而是 start.S 文件中的 _start。我们在上面已经看到 boot-shim 是如何找到这个入口地址的。

这里 zircon.elf 只是用来获得 symbol 的地址，并不添加到 zircon-image.elf 里。真正的内核映像文件是 zircon.image.o

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-gcc   \
-O2 -g -fdebug-prefix-map=/Users/xzx/zircon=. -finline \
    -include ./build-arm64/config-global.h -Wall -Wextra -Wno-multichar \
    -Werror -Wno-error=deprecated-declarations -Wno-unused-parameter \
    -Wno-unused-function -Werror=unused-label -Werror=return-type -fno-common \
    -ffunction-sections -fdata-sections -Wno-nonnull-compare -ffreestanding \
    -include ./build-arm64/config-kernel.h -Wformat=2 -Wvla -Wformat-signedness \
    -fno-exceptions -fno-unwind-tables -fno-omit-frame-pointer -mgeneral-regs-only \
    -fPIE -include kernel/include/hidden.h   -mcpu=cortex-a53 -ffixed-x18 \
    -Isystem/public -Isystem/private -I./build-arm64/gen/global/include \
    -I./build-arm64 -Ikernel/include -Ikernel/platform/generic-arm/include \
    -Ikernel/arch/arm64/include -Ikernel/top/include \
    -Ikernel/dev/hdcp/amlogic_s912/include \
    -Ikernel/dev/interrupt/arm_gic/common/include \
    -Ikernel/dev/interrupt/arm_gic/v2/include \
    -Ikernel/dev/interrupt/arm_gic/v2/include \
    -Ikernel/dev/interrupt/arm_gic/v3/include \
    -Ikernel/dev/iommu/dummy/include -Ikernel/dev/pcie/include \
    -Ikernel/dev/pdev/include -Ikernel/dev/pdev/power/include \
    -Ikernel/dev/power/hisi/include -Ikernel/dev/psci/include \
    -Ikernel/dev/timer/arm_generic/include -Ikernel/dev/uart/amlogic_s905/include \
    -Ikernel/dev/uart/nxp-imx/include -Ikernel/dev/uart/pl011/include \
    -Ikernel/kernel/include -Isystem/ulib/bitmap/include \
```

```
    -Ikernel/lib/bitmap/include -Ikernel/lib/cbuf/include \
    -Ikernel/lib/debugcommands/include -Ikernel/lib/debuglog/include \
    -Ikernel/lib/ktrace/include -Ikernel/lib/memory_limit/include \
    -Ikernel/lib/mtrace/include -Ikernel/lib/userboot/include \
    -Ikernel/lib/version/include -Ikernel/object/include \
    -Ikernel/platform/include -Ikernel/syscalls/include \
    -Ikernel/target/include -Ikernel/tests/include \
    -Ikernel/dev/interrupt/include -Ikernel/dev/pdev/interrupt/include \
    -Ikernel/dev/pdev/uart/include -Ikernel/dev/udisplay/include \
    -Ikernel/lib/console/include -Ikernel/lib/counters/include \
    -Ikernel/lib/crypto/include -Ikernel/lib/debug/include \
    -Isystem/ulib/explicit-memory/include -Ikernel/lib/explicit-memory/include \
    -Ikernel/lib/fbl/include -Isystem/ulib/fbl/include \
    -Ikernel/lib/fbl/include -Ikernel/lib/fixed_point/include \
    -Ikernel/lib/header_tests/include -Ikernel/lib/heap/include \
    -Ikernel/lib/heap/include -Ikernel/lib/hypervisor/include \
    -Ikernel/lib/libc/include -Ikernel/lib/oom/include -Ikernel/lib/pci/include \
    -Ikernel/lib/pci/include -Ikernel/lib/pow2_range_allocator/include \
    -Isystem/ulib/region-alloc/include -Ikernel/lib/region-alloc/include \
    -Ikernel/lib/unittest/include -Ikernel/lib/user_copy/include \
    -Ikernel/lib/vdso/include -Isystem/ulib/zxcpp/include \
    -Ikernel/lib/zxcpp/include -Ikernel/vm/include \
    -Ikernel/arch/arm64/hypervisor/include -Ikernel/dev/hw_rng/include \
    -Ikernel/lib/gfx/include -Ikernel/lib/gfxconsole/include \
    -Ikernel/lib/heap/cmpctmalloc/include -Ikernel/lib/io/include \
    -Isystem/ulib/pretty/include -Ikernel/lib/pretty/include \
    -Ithird_party/ulib/cryptolib/include -Ithird_party/lib/cryptolib/include \
    -Ithird_party/lib/jitterentropy/include -Ithird_party/lib/jitterentropy/include\
    -Ithird_party/ulib/qrcodegen/include -Ithird_party/lib/qrcodegen/include \
    -Ithird_party/ulib/uboringssl/include -Ithird_party/lib/uboringssl/include \
    -I./build-arm64 \
-c kernel/arch/arm64/image.S -MD -MP -MT build-arm64/zircon.image.o \
    -MF build-arm64/zircon.image.d -o build-arm64/zircon.image.o
```

image.S 文件里嵌入了真正的内核 zircon.elf.bin

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-objcopy \
-O binary build-arm64/zircon.elf build-arm64/zircon.elf.bin
```

真正的 kernel 是 zircon.elf

```
./prebuilt/downloads/gcc/bin/aarch64-elf-ld -nostdlib --build-id -z noexecstack \
    -z max-page-size=4096 --gc-sections  --emit-relocs -T kernel/kernel.ld \
    build-arm64/kernel-vars.ld \
    build-arm64/kernel/platform/generic-arm/generic-arm.mod.o \
    build-arm64/kernel/arch/arm64/arm64.mod.o build-arm64/kernel/top/top.mod.o \
    build-arm64/kernel/dev/hdcp/amlogic_s912/amlogic_s912.mod.o \
```

```
build-arm64/kernel/dev/interrupt/arm_gic/common/common.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/interrupt/arm_gic/v2/v2.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/interrupt/arm_gic/v3/v3.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/iommu/dummy/dummy.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/pcie/pcie.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/pdev/pdev.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/pdev/power/power.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/power/hisi/hisi.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/psci/psci.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/timer/arm_generic/arm_generic.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/uart/amlogic_s905/amlogic_s905.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/uart/nxp-imx/nxp-imx.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/uart/pl011/pl011.mod.o \
build-arm64/kernel/kernel/kernel.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/bitmap/bitmap.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/cbuf/cbuf.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/debugcommands/debugcommands.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/debuglog/debuglog.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/ktrace/ktrace.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/memory_limit/memory_limit.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/mtrace/mtrace.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/userboot/userboot.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/version/version.mod.o \
build-arm64/kernel/object/object.mod.o \
build-arm64/kernel/platform/platform.mod.o \
build-arm64/kernel/syscalls/syscalls.mod.o \
build-arm64/kernel/target/target.mod.o \
build-arm64/kernel/tests/tests.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/interrupt/interrupt.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/pdev/interrupt/interrupt.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/pdev/uart/uart.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/udisplay/udisplay.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/console/console.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/counters/counters.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/crypto/crypto.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/debug/debug.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/explicit-memory/explicit-memory.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/fbl/fbl.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/fixed_point/fixed_point.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/header_tests/header_tests.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/heap/heap.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/hypervisor/hypervisor.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/libc/libc.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/oom/oom.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/pci/pci.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/pow2_range_allocator/pow2_range_allocator.mod.o \
```

```
build-arm64/kernel/lib/region-alloc/region-alloc.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/unittest/unittest.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/user_copy/user_copy.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/vdso/vdso.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/zxcpp/zxcpp.mod.o \
build-arm64/kernel/vm/vm.mod.o \
build-arm64/kernel/arch/arm64/hypervisor/hypervisor.mod.o \
build-arm64/kernel/dev/hw_rng/hw_rng.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/gfx/gfx.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/gfxconsole/gfxconsole.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/heap/cmpctmalloc/cmpctmalloc.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/io/io.mod.o \
build-arm64/kernel/lib/pretty/pretty.mod.o \
build-arm64/third_party/lib/cryptolib/cryptolib.mod.o \
build-arm64/third_party/lib/jitterentropy/jitterentropy.mod.o \
build-arm64/third_party/lib/qrcodegen/qrcodegen.mod.o \
build-arm64/third_party/lib/uboringssl/uboringssl.mod.o \
-o build-arm64/zircon.elf
```

kernel 在链接的时候，以-4G 为基地址。也就是说，内核里所有的东西的虚拟地址都在-4G 地址之上。

2 ARM 架构

sp 指的是 el0 的 stack pointer。其他的 stack pointer 需要指明 el 级别。在 Zircon 里，el1 使用的是sp_el1，但是在arm64_elX_to_el1 里，sp_el1 被设置为与sp 相同的值。

pc 寄存器是专用寄存器，不能再被显式指代。

frame pointer 不是专用寄存器，是 X29，但是 A64 Procedure Call Standard 把 X29 定义为专门的 frame pointer. X30 是 link register.

异常级别定义程序运行的特权级别。

安全状态下处理器能访问安全内存地址空间。

scr_el3 寄存器定义 EL0 和 EL1 的安全状态。

ELR 存放异常返回地址。PLR 存放函数调用返回地址。

处理异常之前，处理器状态 (PSTATE) 会保存在 SPSR 中。

2.1 关于 MMU

EL1 有 2 个页表基地址指针寄存器：ttbr0_el1 和ttbr1_el1。使用哪一个由虚拟地址的最高几位决定，如果都是 0 则使用ttbr0_el1，如果都是 1 则使用ttbr1_el1。具体检查多少位由tcr_el1 的 t0sz 和 t1sz 决定。在 Zircon 里 t0sz=22, t1sz=16.

IPS 设置为 1TB.

ESR_ELn 寄存器存放了当前的异常具体是什么异常的信息。

2.2 Exceptions

```
sync_exception #(ARM64_EXCEPTION_FLAG_LOWER_EL), 1

.macro sync_exception, exception_flags, from_lower_el_64=0
    start_isr_func
    regsave_long
    mrs x9, esr_el1
.if \from_lower_el_64
    // If this is a syscall, x0-x7 contain args and x16 contains syscall num.
    // x10 contains elr_el1.
    lsr x11, x9, #26              // shift esr right 26 bits to get ec
    cmp x11, #0x15                // check for 64-bit syscall
    beq arm64_syscall_dispatcher  // and jump to syscall handler
.endif
    // Prepare the default sync_exception args
    mov x0, sp
    mov x1, ARM64_EXCEPTION_FLAG_LOWER_EL
    mov w2, w9
    bl  arm64_sync_exception
    b  arm64_exc_shared_restore_long
.endm
```

3 start.S

内核真正的入口是 start.S 里面的`_start`。
一些基础知识。

`http://refspecs.linuxfoundation.org/LSB_3.0.0/LSB-Core-generic/LSB-Core-generic/ehframechpt.`

The `.eh_frame` section shall contain 1 or more Call Frame Information (CFI) records. The number of records present shall be determined by size of the section as contained in the section header. Each CFI record contains a Common Information Entry (CIE) record followed by 1 or more Frame Description Entry (FDE) records. Both CIEs and FDEs shall be aligned to an addressing unit sized boundary.

`.cfi_startproc` is used at the beginning of each function that should have an entry in `.eh_frame`. It initializes some internal data structures. Don't forget to close the function by .cfi_endproc.

Unless `.cfi_startproc` is used along with parameter simple it also emits some architecture dependent initial CFI instructions.

1. 获取`MPIDR_EL1` 寄存器的 Aff0 和 Aff1 16bit 信息。主 cpu 执行保存启动信息的代码。

2. 把 x0 的内容，也就是内核 header 的地址保存在`bootdata_paddr` 里。`str x0, [tmp, #:lo12:bootdata_paddr]` 的形式为什么这么奇怪? 因为 adrp 指令是拿 4kb 对齐的页地址。低 12 位是丢掉的，所以需要用上面这个形式再拿一次低 12 位的相对地址（这个形式应该在静态链接的时候被 ld 改写成实际的数值），加到 4kb 对齐的页地址上。为什么不用 adr 指令直接取址，因为 adr 只能取和当前 PC 相差不超过 1MB 的符号的地址。`bootdata_paddr` 与当前位置的距离应该已经超过了 1MB

   具体解释：`adrp tmp, bootdata_paddr` 将`bootdata_paddr` 相对于 PC 的偏移量 (低 12 位清零)，再加上 PC(低 12 位清零)，存入`tmp` 中。`str x0, [tmp, #:lo12:bootdata_paddr]` 将`bootdata_paddr` 相对于 PC 的偏移量的低 12 位（这个值是 linker 算出来写入指令的，as 只是放一个重定位项在目标代码中）加到`tmp` 上，作为 str 的目标地址。

3. 把内核入口地址`_start` 存入`kernel_entry_paddr`。这个地址在之后启动副 cpu 的地方`psci_cpu_on()` 会用到。

4. 把当前异常级别存入`arch_boot_el`

5. 调用`arm64_elX_to_el1`，将处理器异常级别置为 1。如果有 EL3 的话，打开 HVC 指令，`mov x9, #((0b1111 << 6) | (0b0101))` 返回到的是 EL1h 模式。使用 `SP_EL1`

6. 调用`arch_invalidate_cache_all`,

7. 打开 icache, dcache

8. `__data_end` 的定义在 kernel.ld 中。调用 image.S 中的`apply_fixups` image.S 里只定义了一个.text 段。fixup 现在没有实际用处。将来，因为 kernel 在 ld 链接时，用的基地址是固定的-4G，但是未来内核可能会被加载到一个任意的虚拟地址上。所以需要进行 fixup. 也就是说，`kernel_vaddr` 会保存一个任意地址。

9. `tt_trampoline` 存放了 8 个页表项。`arm64_kernel_translation_table` 的定义在 mmu.cpp 里。它的大小之后再研究。

10. 如果不是主 cpu，则跳转到`.Lmmu_enable_secondary`，下面是主 cpu 逻辑。

11. `__bss_start` 的定义在 kernel.ld 里。把 bss 段清零。

12. 把 sp 设置到`boot_cpu_kstack_end`，在 bss 里。

13. 调用`boot_alloc_init`，把整个内核结束的位置的物理地址记录在 C++ 变量中。这个用作后来分配物理页表使用。把内核开始的物理地址`__code_start` 保存到 C++ 变量里。

14. 把`arm64_kernel_translation_table` 清零

15. 把物理地址 0 映射到内核地址空间 ffff000000000000，范围是 512GB。物理页表的分配从内核结束的位置`_end` 开始。

16. 把物理地址`__code_start` 映射到虚拟地址`kernel_vaddr`(-4GB) 上，范围就是内核的长度，到`_end` 为止

17. 用一个 512MB 的 block 做恒等映射。计算中用到的一些常量：

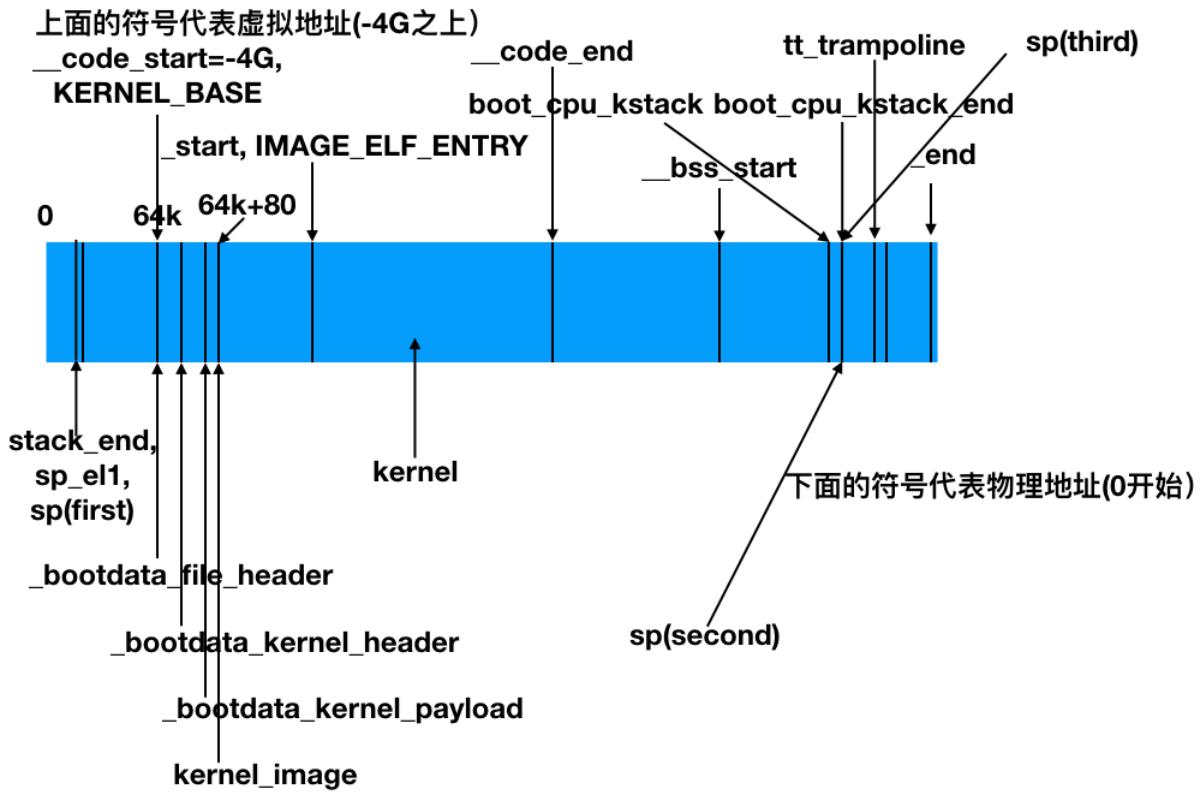
    ```
    MMU_IDENT_SIZE_SHIFT = 42,
    MMU_IDENT_PAGE_SIZE_SHIFT = 16,
    MMU_IDENT_TOP_SHIFT = 29,
    MMU_PAGE_TABLE_ENTRIES_IDENT_SHIFT = 10,
    MMU_PAGE_TABLE_ENTRIES_IDENT = 1 << 10,
    KERNEL_ASPACE_BITS = 48,
    MMU_KERNEL_SIZE_SHIFT = 48
    ```

18. 打开 MMU，为什么要用 trampoline 进行过渡？因为我们需要做二件事：打开 MMU，设置 PC 到虚拟地址上。如果先打开 MMU，这时 PC 还指向物理地址，而物理地址的直接映射没有设置的话，cpu 就找不到下一条指令了。如果先通过 br 指令弹跳 PC，这时 MMU 还没有打开，PC 指向虚拟地址也会找不到下一条指令。所以必须先设置好直接映射的地址，然后打开 MMU，然后弹跳 PC 到高端虚拟地址上，最后关闭 MMU

19. 再设置一次 stack pointer, 这一次是虚拟地址了。因为`adr_global` 是 PC 相对计算地址。这时 PC 已经是虚拟地址了。

20. 调用`lk_main` 进入 C 的世界

整个内核至此的内存映像如下图所示。



3.1 副 cpu

1. 切换到 el1
2. 等待主 cpu 把`arm64_secondary_sp_list` 设置好。在此之前会执行 wfe。如果在主 cpu 设置之前执行的话，副 cpu 会进入死循环。但是主 cpu 会调用`psci_smc_call` 重启副 cpu。实际调用的是 smc 0. smc 的异常处理配置是固件设置的。在 Zircon 的代码中没有对 `vbar_el3` 的设置。
3. 最后进入`arm64_secondary_entry()`

4 lk_main

4.1 thread_init_early

`thread_construct_first(t, "bootstrap")`, 在主 cpu 上创建一个反映当前运行状态的`thread_t`.

1. 拿到的 cpu num 是 0
2. `thread_t` 清零
3. `THREAD_MAGIC` 暂时不知道什么用
4. 设置 thread 名字
5. `retcode_wait_queue` 的前驱后继都指向自己
6. 从`tpidr_el1` 中拿到`boot_cpu_fake_thread_pointer_location` 的地址
7. `__has_feature(safe_stack)` 是 clang 的特性，对 gcc 来说，`unsafe_sp` 就是 0（在 start.S 里安排的）
8. 把 x18 保存在`current_percpu_ptr` 里
9. 让`tpidr_el1` 指向这个真正的`thread_t`,也就是 percpu 里的 `idle_thread`
10. 把这个 thread 加到全局的 thread list 上

`sched_init_early()` 初始化各个 cpu 的 run queue 为空。
调用 C++ 的全局变量的构造函数`__init_array_start`。
`lk_init_level()`
`required_flag = LK_INIT_FLAG_PRIMARY_CPU`
`start_level = LK_INIT_LEVEL_EARLIEST`
`stop_level = LK_INIT_LEVEL_ARCH_EARLY - 1`
这次没有匹配的 init 函数可以被调用。（也许我漏掉了?）
`arch_curr_cpu_num_slow()` 返回 0，因为这时`arm64_cpu_map` 还没有初始化。
`arch.cpp: arm64_cpu_early_init()`
把 x18 指向当前 cpu 的 percpu.
让`VBAR_EL1` 指向`exceptions.S` 中的`arm64_el1_exception_base`.
把一些 cpu feature 读到`arm64_features` 里
打开 DAIF 遮掩位。
`main.cpp: platform_early_init()`
`bootdata_paddr` 存放的是 initrd 的加载地址 0x48000000。boot-shim 会把从 device tree 中读出来的 initrd 的加载地址写入`bootdata_paddr`。此外，qemu 会把内核加载到 0x40080000 处。内核的实际物理地址就是 0x40090000。这些细节需要从 qemu 的源码中获得。
`boot_reserve_add_range(get_kernel_base_phys(), get_kernel_size())`