OS MMXXIV

MIT ;)

https://pdos.csail.mit.edu/6.828

Virtuálna pamäť

Štruktúra prednášky

- Adresné priestory
- Stránkovací hardvér
- Programový kód xv6 pre správu VM

Téma

- Majme program, ktorý z času na čas zapíše niečo na náhodnú adresu v pamäti

- Ako udržať takýto program „na uzde”?

Téma

- Majme program, ktorý z času na čas zapíše niečo na náhodnú adresu v pamäti
- Ako udržať takýto program „na uzde”?
- Izolujme adresné priestory procesov (a jadra)

Izolácia adresného priestoru

Izolácia adresného priestoru

- Každý proces má vlastný adresný priestor
- Môže čítať/zapisovať iba v rámci svojho priestoru (nemôže čítať ani zapisovať v inom)

Izolácia adresného priestoru

- Každý proces má vlastný adresný priestor
- Môže čítať/zapisovať iba v rámci svojho priestoru (nemôže čítať ani zapisovať v inom)
- **Ako SÚČASNE implementovať viac adresných priestorov v rámci jedinej fyzickej pamäte (RAM) a zabezpečiť izoláciu medzi nimi?**

Izolácia adresného priestoru

- Odpoveď: stránkovací hardvér

- Xv6 využíva hardvér procesora RISC-V

Stránkovanie

Stránkovanie

- Poskytuje *nepriamu* adresáciu

Stránkovanie

- Poskytuje *nepriamu* adresáciu
  - program používa ukazovatele (adresy); tieto adresy využíva CPU na prístup k pamäti

Stránkovanie

- Poskytuje ***nepriamu*** adresáciu
  - program používa ukazovatele (adresy); tieto adresy využíva CPU na prístup k pamäti
    - Nie sú to však (vo všeobecnosti) adresy operandov vo fyzickej pamäti!
    - Ide o tzv. virtuálne adresy!

Stránkovanie

- Poskytuje *nepriamu* adresáciu
  - program používa ukazovatele (adresy); tieto adresy využíva CPU na prístup k pamäti
    - Nie sú to však (vo všeobecnosti) adresy operandov vo fyzickej pamäti!
    - Ide o tzv. virtuálne adresy!
  - Hardvér správy pamäte (MMU) „prekladá” virtuálne adresy na fyzické adresy

Stránkovanie

- Poskytuje *nepriamu* adresáciu
  - program používa ukazovatele (adresy); tieto adresy využíva CPU na prístup k pamäti
    - Nie sú to však (vo všeobecnosti) adresy operandov vo fyzickej pamäti!
    - Ide o tzv. virtuálne adresy!
  - Hardvér správy pamäte (MMU) „prekladá” virtuálne adresy na fyzické adresy
    - V literatúre sa často spomína aj termín „lineárna adresa” (v rámci predmetu nerozlišujeme)
    - Až fyzická adresa je adresou operandu na adresnej zbernici (nemusí to byť iba RAM!!!)

Stránkovanie

- Program dokáže pracovať iba s virtuálnymi adresami, nie fyzickými (čo sa týka menenia/čítania obsahu RAM)

- Jadro OS má za úlohu riadiť mapovanie každej VA na PA (nastaviť údaje pre toto mapovanie)

Stránkovanie

- MMU používa na „preklad” tabuľku, v ktorej
  - VA je indexom (zjednodušene)
  - PA je hodnotou na indexe (zjednodušene)

Stránkovanie

- MMU používa na „preklad” tabuľku, v ktorej
  - VA je indexom (zjednodušene)
  - PA je hodnotou na indexe (zjednodušene)
- Tabuľka má názov „tabuľka stránok” (angl. *Page Table*)

Stránkovanie

- MMU používa na „preklad” tabuľku, v ktorej
  - VA je indexom (zjednodušene)
  - PA je hodnotou na indexe (zjednodušene)
- Tabuľka má názov „tabuľka stránok” (angl. *Page Table*)
- Jedna tabuľka popisuje jeden adresný priestor (mapovanie VA na PA)
- MMU dokáže obmedziť, ktoré VA sú prístupné v *user* móde CPU

Stránkovanie

- Odkaz na aktuálnu tabuľku stránok (tabuľku, ktorá sa pri preklade používa), sa nachádza v špeciálnom registri CPU

Stránkovanie

- Odkaz na aktuálnu tabuľku stránok (tabuľku, ktorá sa pri preklade používa), sa nachádza v špeciálnom registri CPU

- Meniť hodnotu tohto registra je možné iba v privilegovanom režime CPU (*kernel/supervisor* mód)
  - Pokus o zmenu v *user* móde vedie ku výnimke

Stránkovanie

- CPU štartuje v režime, kedy je stránkovanie vypnuté
  - Prečo?

Stránkovanie

- CPU štartuje v režime, kedy je stránkovanie vypnuté
  - Prečo?

- Inicializačný kód jadra
  - Vyplní tabuľku
  - Nastaví register, ktorý ukazuje na tabuľku stránok
  - Zapne stránkovanie CPU

Stránkovanie

- Stránkovanie umožňuje

Stránkovanie

- Stránkovanie umožňuje
  - Rozlíšenie oprávnenia typu prístupu (*Read / Write*)
  - Určiť, či mapovanie jestvuje (*Present*)
  - Rozlíšenie oprávnenia prístupu (*Supervisor / User*)

Stránkovanie

- Stránkovanie umožňuje
  - Rozlíšenie oprávnenia typu prístupu (*Read / Write*)
  - Určiť, či mapovanie jestvuje (*Present*)
  - Rozlíšenie oprávnenia prístupu (*Supervisor / User*)
  - Zistiť, či prístup k určitej adrese vyvolal zmenu hodnôt v pamäti (D – *dirty bit*)
  - Zistiť, či bolo vôbec niekedy pristúpené k nejakej adrese v stránke (A – *access bit*)

Stránkovanie

- Stránkovanie umožňuje
  - Rozlíšenie oprávnenia typu prístupu (*Read / Write*)
  - Určiť, či mapovanie jestvuje (*Present*)
  - Rozlíšenie oprávnenia prístupu (*Supervisor / User*)
  - Zistiť, či prístup k určitej adrese vyvolal zmenu hodnôt v pamäti (D – *dirty bit*)
  - Zistiť, či bolo vôbec niekedy pristúpené k nejakej adrese v stránke (A – *access bit*)

- Triky s virtuálnou pamäťou

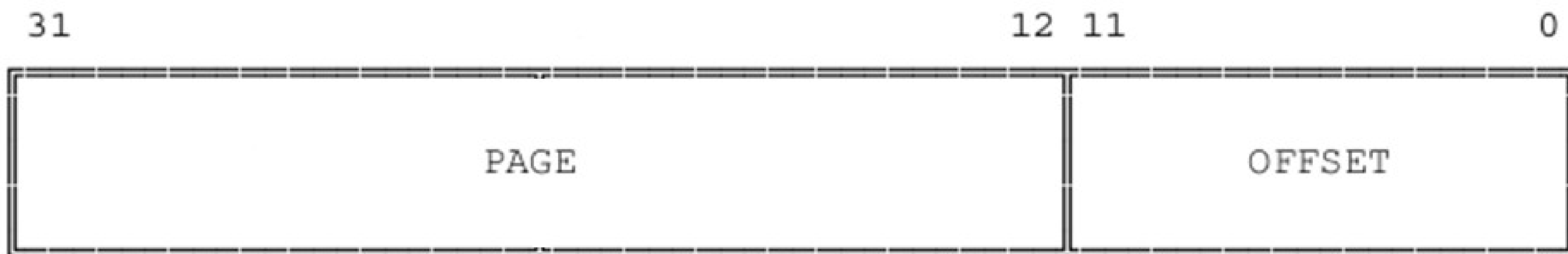
Stránkovanie – čo nám k tomu treba

- Rámec (*page frame*) versus stránka (*page*)

- Lineárna adresa
- Tabuľka stránok
- Položka tabuľky stránok

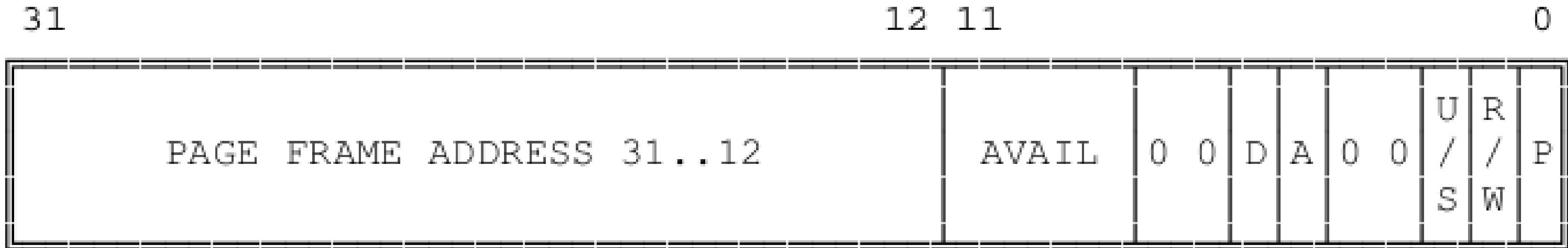
- Ako sa robí preklad

Formát lineárnej adresy



Prevzaté z INTEL 80386 PROGRAMMER'S REFERENCE MANUAL 1986

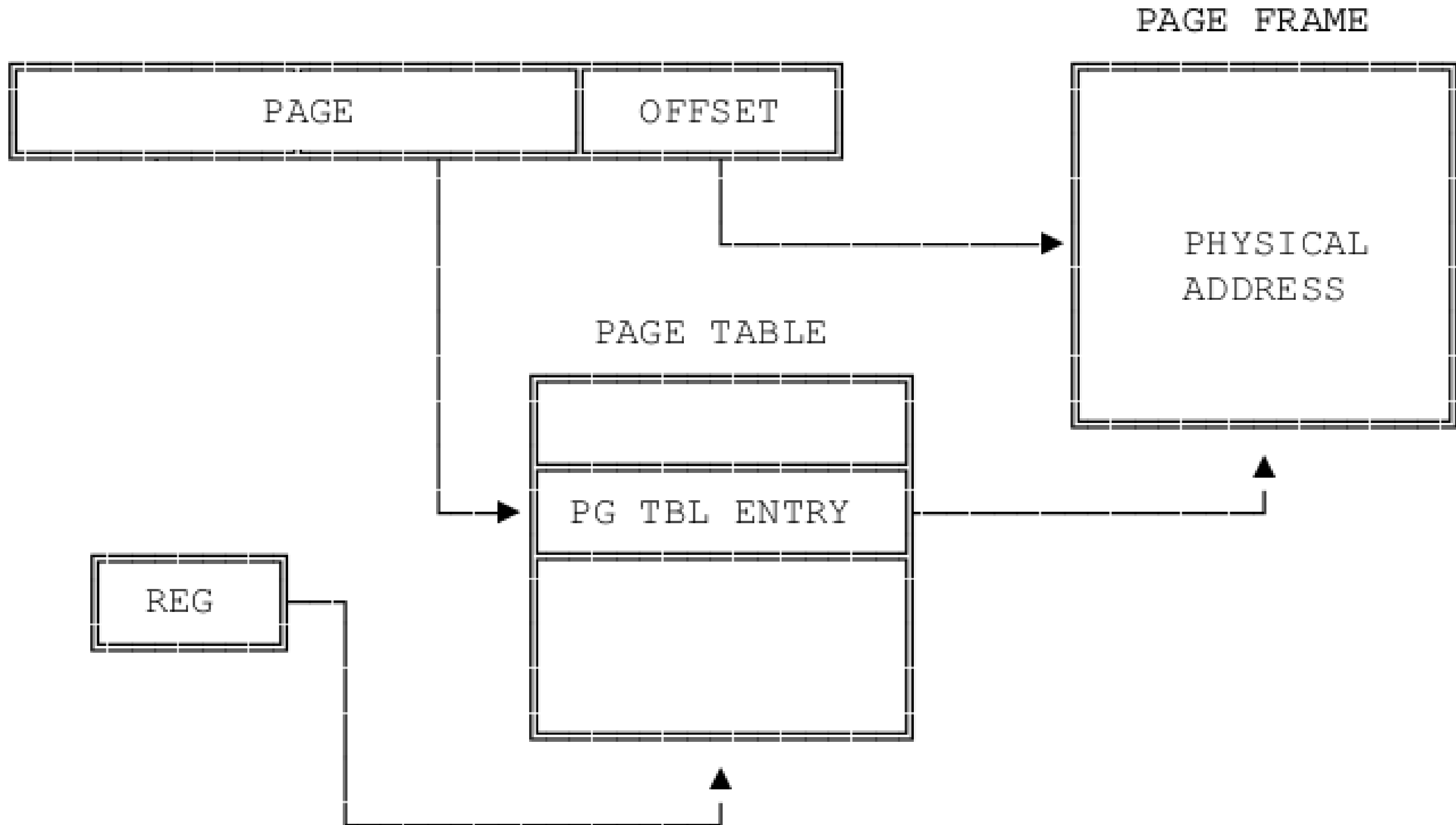
Položka tabuľky stránok (Intel)




```
P      - PRESENT
R/W    - READ/WRITE
U/S    - USER/SUPERVISOR
D      - DIRTY
AVAIL  - AVAILABLE FOR SYSTEMS PROGRAMMER USE

NOTE: 0 INDICATES INTEL RESERVED. DO NOT DEFINE.
```

Preklad lineárnej adresy na fyzickú



RISC-V

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)
- Koľko bitov potrebujeme na indexovanie (adresovanie) v rámci jednej stránky 4 KiB?

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)
- Koľko bitov potrebujeme na indexovanie (adresovanie) v rámci jednej stránky 4 KiB? 12

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)
- Koľko bitov potrebujeme na indexovanie (adresovanie) v rámci jednej stránky 4 KiB? 12
- Xv6 využíva RISC-V v 64-bitovom adresnom režime

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)
- Koľko bitov potrebujeme na indexovanie (adresovanie) v rámci jednej stránky 4 KiB? 12
- Xv6 využíva RISC-V v 64-bitovom adresnom režime
  - Na index do PT sa využíva 64−12 = 52 bitov z VA

RISC-V

- Mapuje stránky o veľkosti 4 KiB
- Zarovnané na hranicu 4 KiB (0, 4 Ki, 8 Ki, 12 Ki, …)
- Koľko bitov potrebujeme na indexovanie (adresovanie) v rámci jednej stránky 4 KiB? 12
- Xv6 využíva RISC-V v 64-bitovom adresnom režime
  - Na index do PT sa využíva 64−12 = 52 bitov z VA
  - Nie tak celkom, horných 25 bitov z týchto 52 sa nevyužíva, takže index má reálne 27 bitov

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu?

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je … B

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je 8 B

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je 8 B
- Koľko teda bude zaberať celá PT v pamäti?

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je 8 B
- Koľko teda bude zaberať celá PT v pamäti? 128 Mi * 8 B = **1 GiB** ;)

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je 8 B
- Koľko teda bude zaberať celá PT v pamäti? 128 Mi * 8 B = **1 GiB** ;)

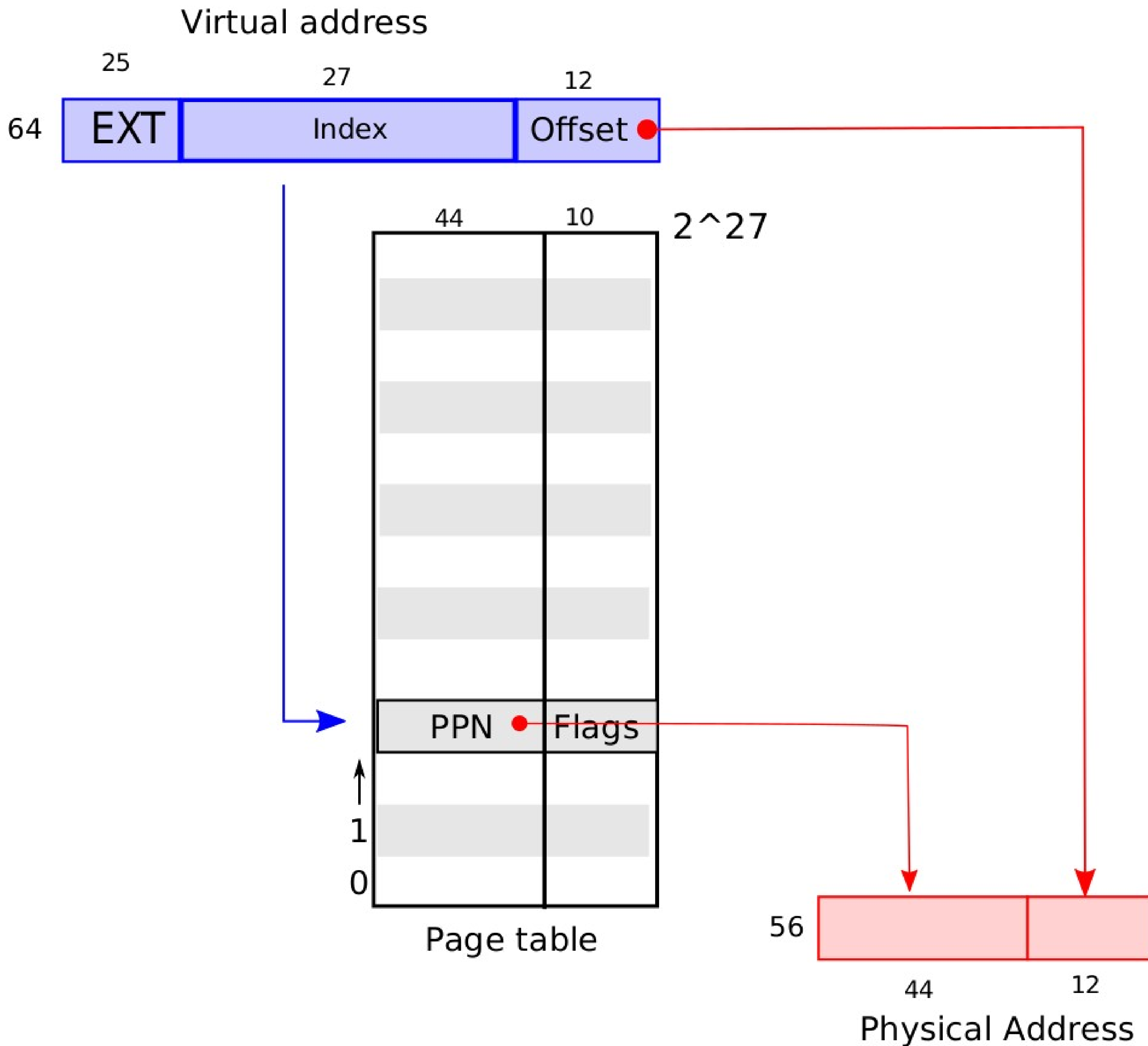
- Ak PT pre 1 proces zaberá 1 GiB v RAM, koľko procesov asi tak môže bežať v OS? :D :D :D

RISC-V

- Máme 27 bitov na index, koľko indexov je to spolu? 2^27=2^7 * 2^20 = 128 * 1 Mi = 128 Mi
- Každá položka tabuľky má 64 b, čo je 8 B
- Koľko teda bude zaberať celá PT v pamäti? 128 Mi * 8 B = **1 GiB** ;)

- Ak PT pre 1 proces zaberá 1 GiB v RAM, koľko procesov asi tak môže bežať v OS? :D :D :D
- Xv6 má 128 MiB RAM… Tak tu **niečo nesedí**…

Preklad MMU



Virtual address
25
27
12
64
EXT
Index
Offset
44
10
2^27
PPN
Flags
1
0
Page table
56
44
12
Physical Address

Preklad MMU

- Záznam v tabuľke PT sa nazýva PTE (*Page Table Entry*)
  - Má 64 b (8 B), ale využíva sa „iba” 54

Preklad MMU

- Záznam v tabuľke PT sa nazýva PTE (*Page Table Entry*)
  - Má 64 b (8 B), ale využíva sa „iba” 54
  - Horných 44 bitov PTE tvoria horných 44 bitov fyzickej adresy (*Physical Page Number* = PPN)

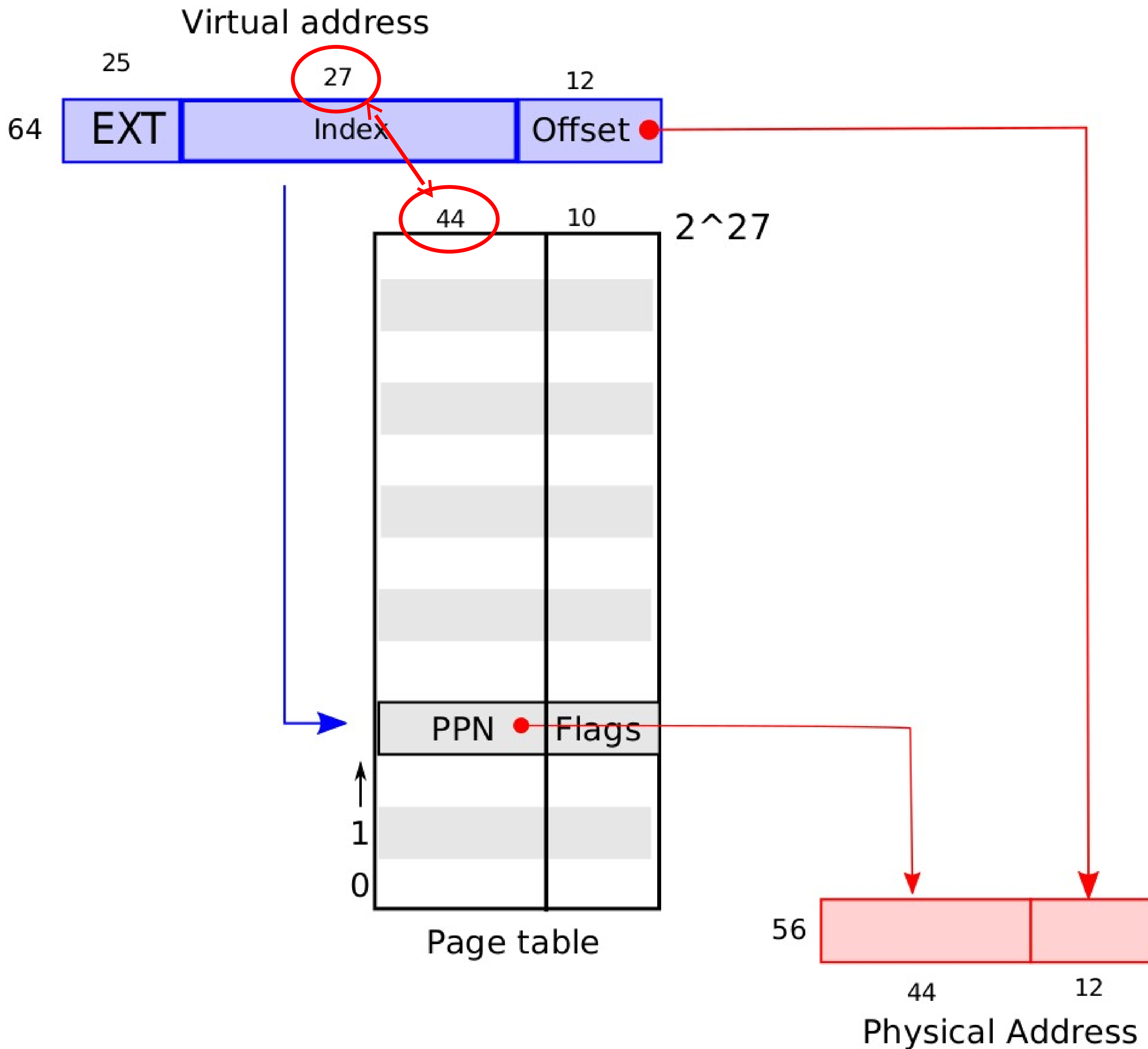
Preklad MMU

- Záznam v tabuľke PT sa nazýva PTE (*Page Table Entry*)
  - Má 64 b (8 B), ale využíva sa „iba” 54
  - Horných 44 bitov PTE tvoria horných 44 bitov fyzickej adresy (*Physical Page Number* = PPN)
  - Spodných 10 sú tzv. príznaky
    - *Present*, *Writeable*, *User*, *Accessed*, *Dirty*…

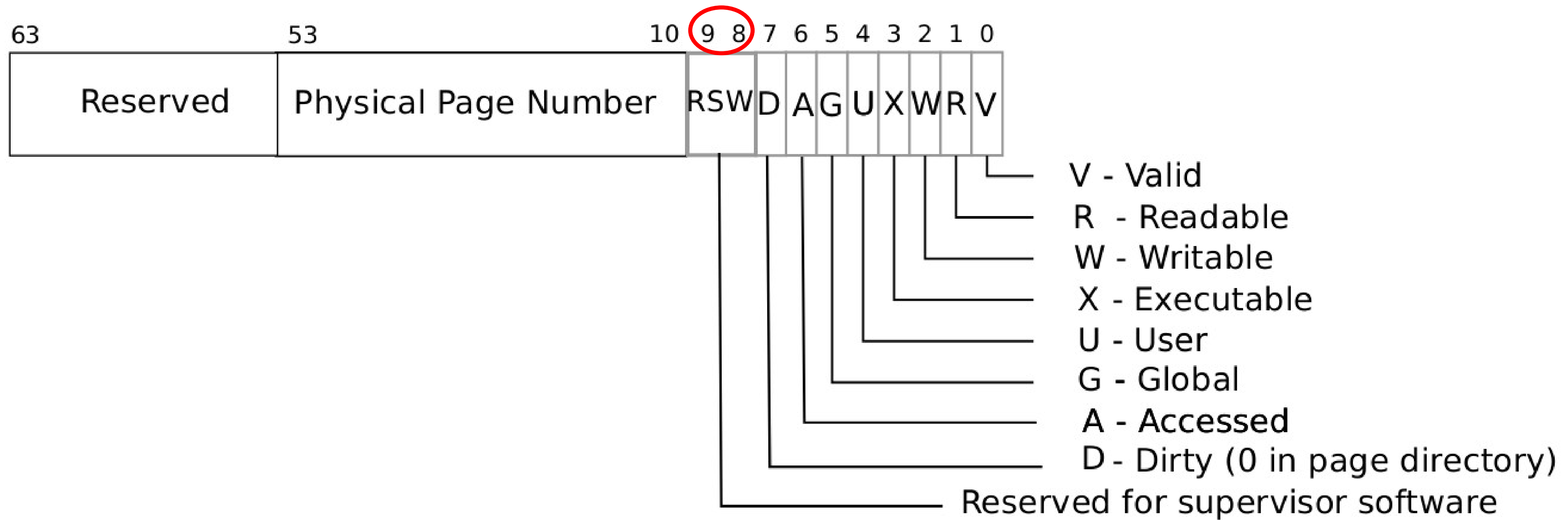
Preklad MMU

- Záznam v tabuľke PT sa nazýva PTE (*Page Table Entry*)
  - Má 64 b (8 B), ale využíva sa „iba” 54
  - Horných 44 bitov PTE tvoria horných 44 bitov fyzickej adresy (*Physical Page Number* = PPN)
  - Spodných 10 sú tzv. príznaky
    - *Present*, *Writeable*, *User*, *Accessed*, *Dirty*…

- !POZOR! **veľkosť VA != veľkosť PA**


Virtual address
25
27
12
64
EXT
Index
Offset
44
10
2^27
PPN
Flags
1
0
Page table
56
44
12
Physical Address

PTE



PT

- Kde je PT uložená? V RAM

- MMU dokáže manipulovať so záznamami PTE
- Podobne to dokáže aj OS

PT

- Ako sme už vypočítali, veľkosť PT je 1 GiB!
  - 1 PT na 1 adresný priestor
  - 1 adresný priestor zväčša pre 1 aplikáciu (proces)

PT

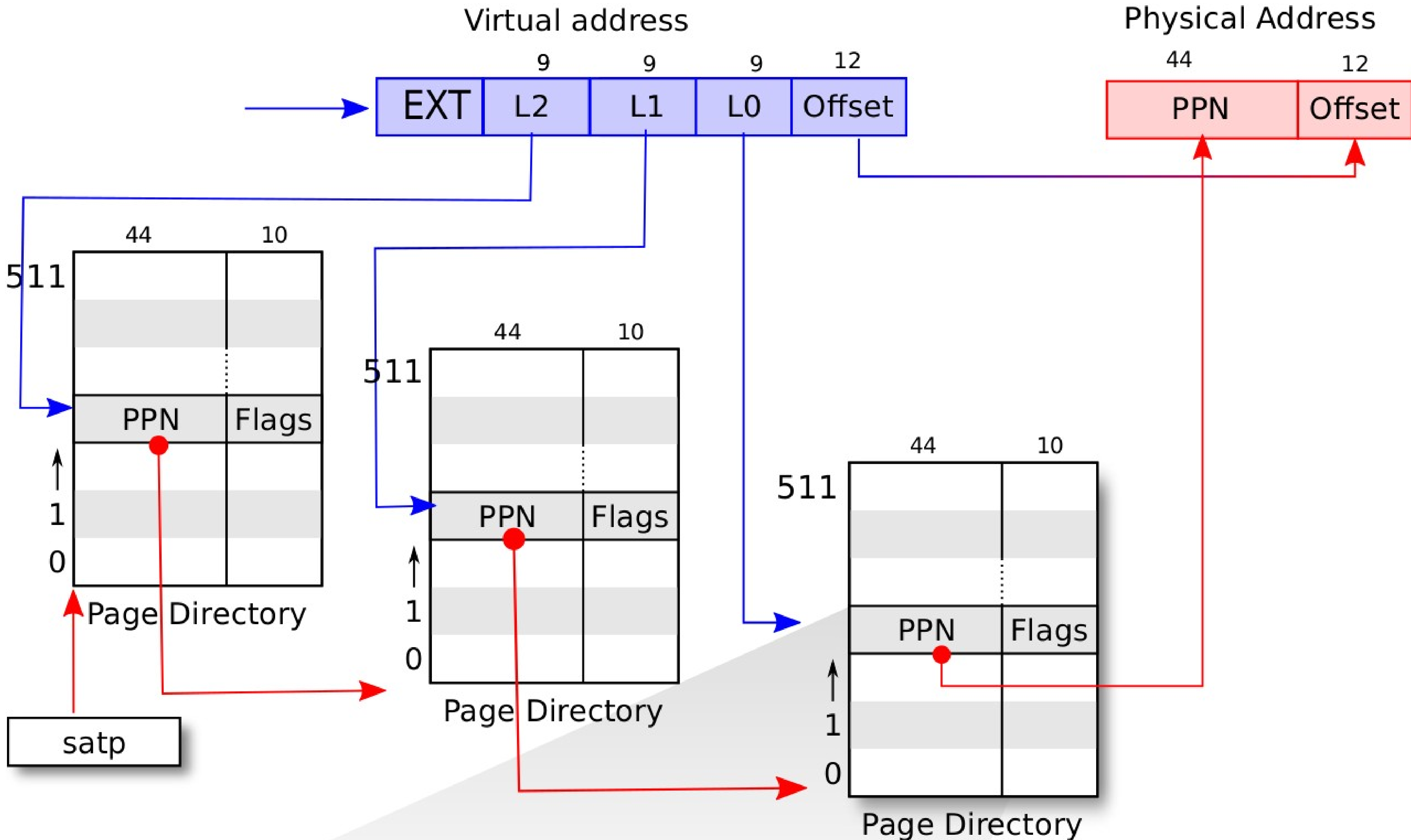
- Ako sme už vypočítali, veľkosť PT je 1 GiB!
  - 1 PT na 1 adresný priestor
  - 1 adresný priestor zväčša pre 1 aplikáciu (proces)

- Avšak proces často potrebuje iba pár KiB/MiB pamäte, takže iba pár Ki/Mi záznamov PTE bude využitých, ostatné budu prázdne!

PT

- RISC-V 64 využíva na ušetrenie miesta tzv. **trojúrovňovú** tabuľku stránok

PT RISC-V



PT

- V každej úrovni (L2, L1, L0) máme k dispozícii 9 bitov na index → 512 položiek v PD (*Page Directory*)

PT

- V každej úrovni (L2, L1, L0) máme k dispozícii 9 bitov na index → 512 položiek v PD (*Page Directory*)
- 512*512*512 = 2^9 * 2^9 * 2^9 = 2^(3*9) = 2^27

PT

- V každej úrovni (L2, L1, L0) máme k dispozícii 9 bitov na index → 512 položiek v PD (*Page Directory*)
- 512*512*512 = 2^9 * 2^9 * 2^9 = 2^(3*9) = 2^27
- PTE môže byť neplatné (bit *Valid*); nejestvuje prepojenie t.j. mapovanie s RAM)

PT

- V každej úrovni (L2, L1, L0) máme k dispozícii 9 bitov na index → 512 položiek v PD (*Page Directory*)
- 512*512*512 = 2^9 * 2^9 * 2^9 = 2^(3*9) = 2^27
- PTE môže byť neplatné (bit *Valid*); nejestvuje prepojenie t.j. mapovanie s RAM)
- Preto môže byť PT pre proces malá!

PT

- V jednej úrovni máme 512 položiek PTE; jedna má veľkosť 64 b, takže celkovo je to 512 * 8 B = 4 KiB

PT

- V jednej úrovni máme 512 položiek PTE; jedna má veľkosť 64 b, takže celkovo je to 512 * 8 B = 4 KiB (čírou „náhodou” to sedí na veľkosť stránky?)

PT

- V jednej úrovni máme 512 položiek PTE; jedna má veľkosť 64 b, takže celkovo je to 512 * 8 B = 4 KiB (čírou „náhodou” to sedí na veľkosť stránky?)
- 512 záznamov môže ukazovať na 512 stránok v RAM; 1 tabuľkou vieme „pokryť” max. 512 * 4 KiB RAM, t.j. 2048 KiB, t.j. 2 MiB

PT

- V jednej úrovni máme 512 položiek PTE; jedna má veľkosť 64 b, takže celkovo je to 512 * 8 B = 4 KiB (čírou „náhodou” to sedí na veľkosť stránky?)
- 512 záznamov môže ukazovať na 512 stránok v RAM; 1 tabuľkou vieme „pokryť” max. 512 * 4 KiB RAM, t.j. 2048 KiB, t.j. 2 MiB
- Na pokrytie mapovania niekoľko desiatok MiB nám stačia desiatky (stovky) KiB tabuľky PT namiesto 1 GiB

PT

- Ako MMU „vie”, kde v RAM sa PT nachádza?

PT

- Ako MMU „vie”, kde v RAM sa PT nachádza?

- Na RISC-V je **FYZICKÁ** adresa hornej časti PT (pre index L2) v registri `satp`
- Prepísaním `satp` sa prepínajú adresné priestory!

PT

- Ako MMU „vie”, kde v RAM sa PT nachádza?

- Na RISC-V je **FYZICKÁ** adresa hornej časti PT (pre index L2) v registri `satp`
- Prepísaním `satp` sa prepínajú adresné priestory!

- Stránky PT môžu byť voľne roztrúsené v RAM, nemusí ísť o súvislú oblasť RAM!!!

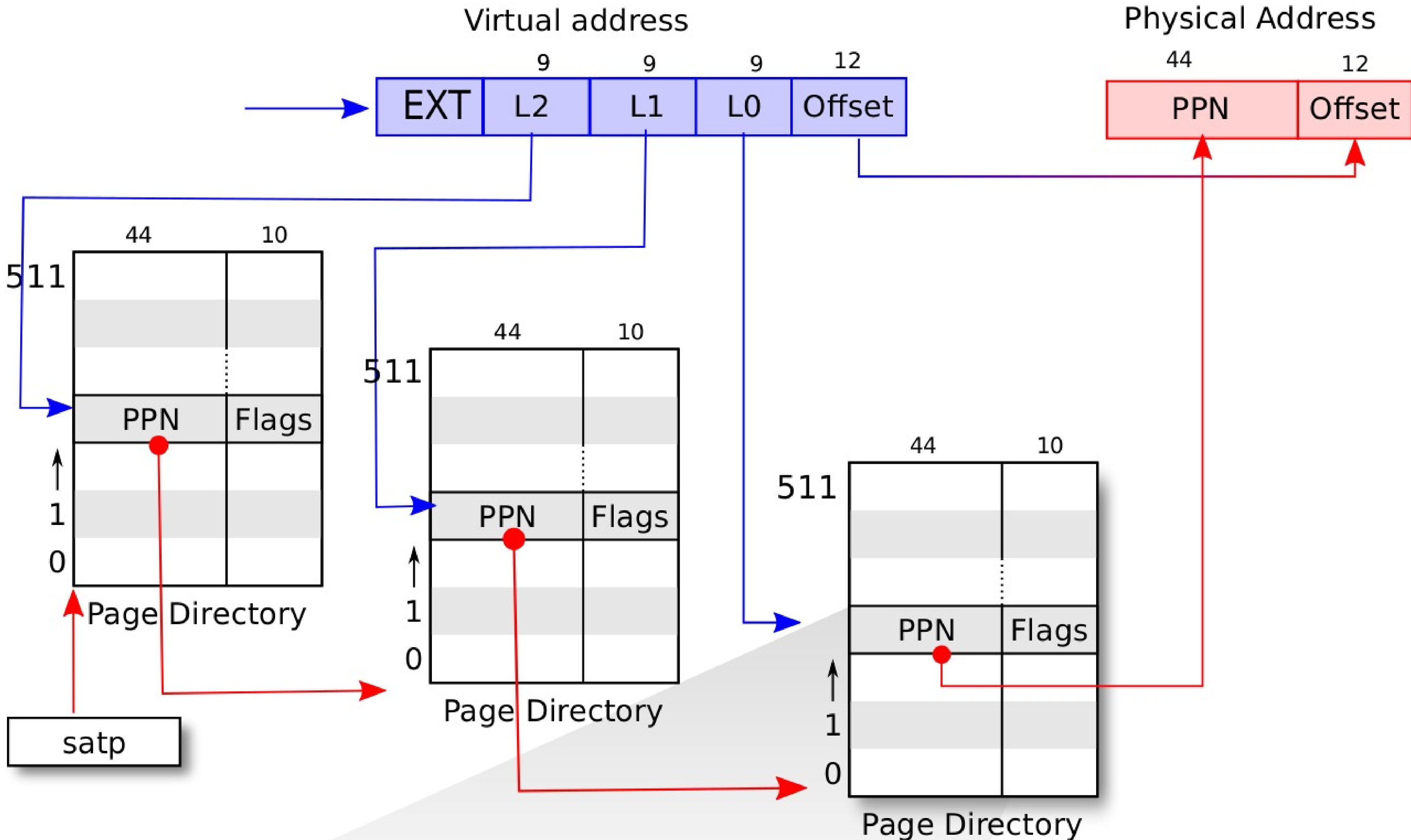
Preklad va2pa

- MMU musí nájsť správny záznam PTE zodpovedajúci danej VA; ako?

Preklad va2pa

- MMU musí nájsť správny záznam PTE zodpovedajúci danej VA; ako?
  - Z registra `satp` vieme PA pre obsah tabuľky PD_{L2}
  - Horných 9 bitov indexu VA (L2) ukazuje do PD_{L2}; z PD_{L2}[L2] získame PA pre obsah PD_{L1}
  - Ďalších 9 bitov indexu VA (L1) ukazuje do PD_{L1}; z PD_{L1}[L1] získame PA pre obsah PD_{L0}
  - Posledných 9 bitov indexu VA (L0) ukazuje do PD_{L0}; z PD_{L0}[L0] získame PA pre PTE
  - PA = PPN z PTE plus spodných 12 bitov VA

PT RISC-V

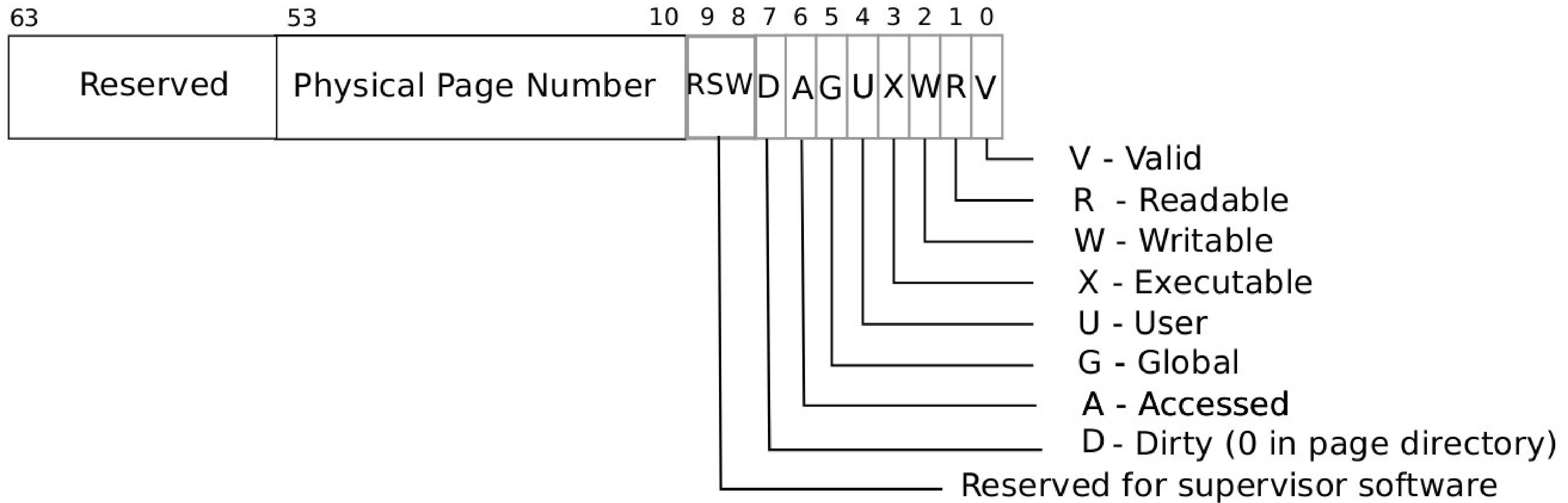


Príznaky PTE

- Xv6 využíva V, R, W, X, U

- V cvičení 4 musíte využiť príznak A
- Neskôr využijeme aj niektorý z tých, ktoré sú voľne dostupné pre OS

Príznaky PTE



Príznaky PTE

- Čo ak bit V nie je nastavený? Alebo zapisujeme a nie je nastavený W?

Príznaky PTE

- Čo ak bit V nie je nastavený? Alebo zapisujeme a nie je nastavený W?
- Výpadok stránky (angl. *Page Fault*)

Príznaky PTE

- Čo ak bit V nie je nastavený? Alebo zapisujeme a nie je nastavený W?
- Výpadok stránky (angl. *Page Fault*)
  - Vynútený presun do jadra (trap.c)

Príznaky PTE

- Čo ak bit V nie je nastavený? Alebo zapisujeme a nie je nastavený W?
- Výpadok stránky (angl. *Page Fault*)
  - Vynútený presun do jadra (trap.c)
  - Jadro buď vypíše chybovú správu a ukončí proces, ktorý chybu spôsobil („usertrap(): unexpected scause…”) (viď ukážka cat.c)

Príznaky PTE

- Čo ak bit V nie je nastavený? Alebo zapisujeme a nie je nastavený W?
- Výpadok stránky (angl. *Page Fault*)
  - Vynútený presun do jadra (trap.c)
  - Jadro buď vypíše chybovú správu a ukončí proces, ktorý chybu spôsobil („usertrap(): unexpected scause…”) (viď ukážka cat.c)
  - Alebo môže nainštalovať chýbajúci PTE a obnoviť beh procesu (napr. ak sa používa *swapovanie* pamäte RAM na disk)

Výhody stránkovania

- Spojitý virtuálny adresný priestor nevyžaduje spojitý fyzický adresný priestor! (vôbec neprichádza ku *externej* fragmentácii!!!)

Výhody stránkovania

- Spojitý virtuálny adresný priestor nevyžaduje spojitý fyzický adresný priestor! (vôbec neprichádza ku *externej* fragmentácii!!!)

- „*lazy allocation*”; alokácia pamäte až pri jej prvom použití (nastane výpadok, jadro alokuje PTE a proces zopakuje inštrukciu)

Výhody stránkovania

- Spojitý virtuálny adresný priestor nevyžaduje spojitý fyzický adresný priestor! (vôbec neprichádza ku *externej* fragmentácii!!!)
- „*lazy allocation*”; alokácia pamäte až pri jej prvom použití (nastane výpadok, jadro alokuje PTE a proces zopakuje inštrukciu)
- „*copy-on-write fork*”; kópia stránky až pri prvom pokuse o zápis

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou?

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou? ÁNO, môže!

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou? ÁNO, môže!
- Väčšina jadier OS však využíva VA; prečo?

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou? ÁNO, môže!
- Väčšina jadier OS však využíva VA; prečo?
  - Je (časovo) drahé vypínať/zapínať stránkovanie

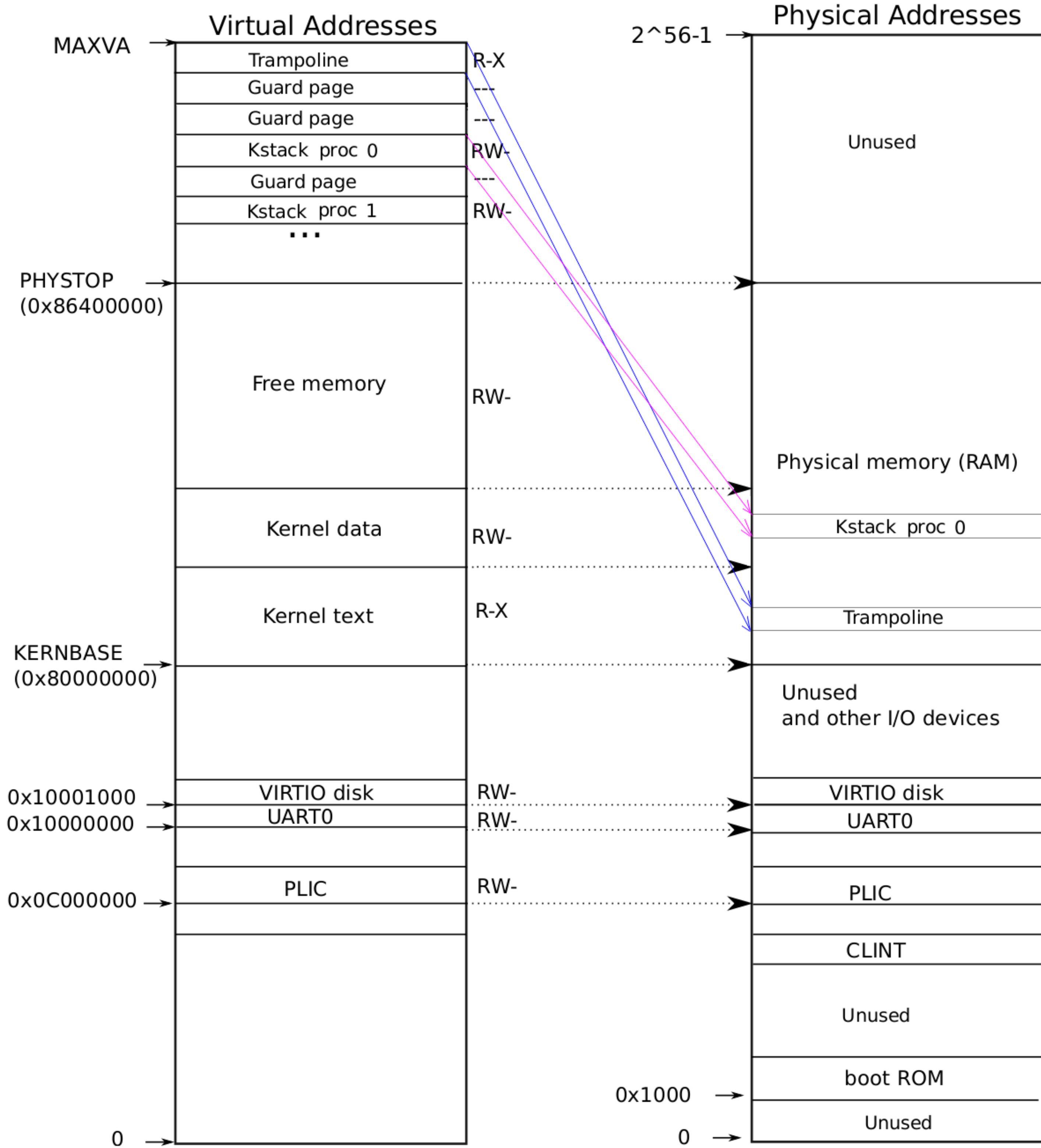
Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou? ÁNO, môže!
- Väčšina jadier OS však využíva VA; prečo?
  - Je (časovo) drahé vypínať/zapínať stránkovanie
  - Uľahčuje to hľadanie chýb
    - Text (kód) jadra označíme X, údaje nie
    - Ponechanie pamäťovej „diery” pod zásobníkom

Virtuálna pamäť v jadre

- Pre procesy je využitie VM v poriadku, ale prečo ju využívať aj v jadre?
- Môže bežať jadro iba s fyzickou pamäťou? ÁNO, môže!
- Väčšina jadier OS však využíva VA; prečo?
  - Je (časovo) drahé vypínať/zapínať stránkovanie
  - Uľahčuje to hľadanie chýb
    - Text (kód) jadra označíme X, údaje nie
    - Ponechanie pamäťovej „diery" pod zásobníkom
  - Uľahčuje prechod medzi user/kernel (tým istým mapovaním tej istej stránky – viď *trampoline*)

Virtuálna pamäť JADRA xv6



Virtuálna pamäť JADRA xv6

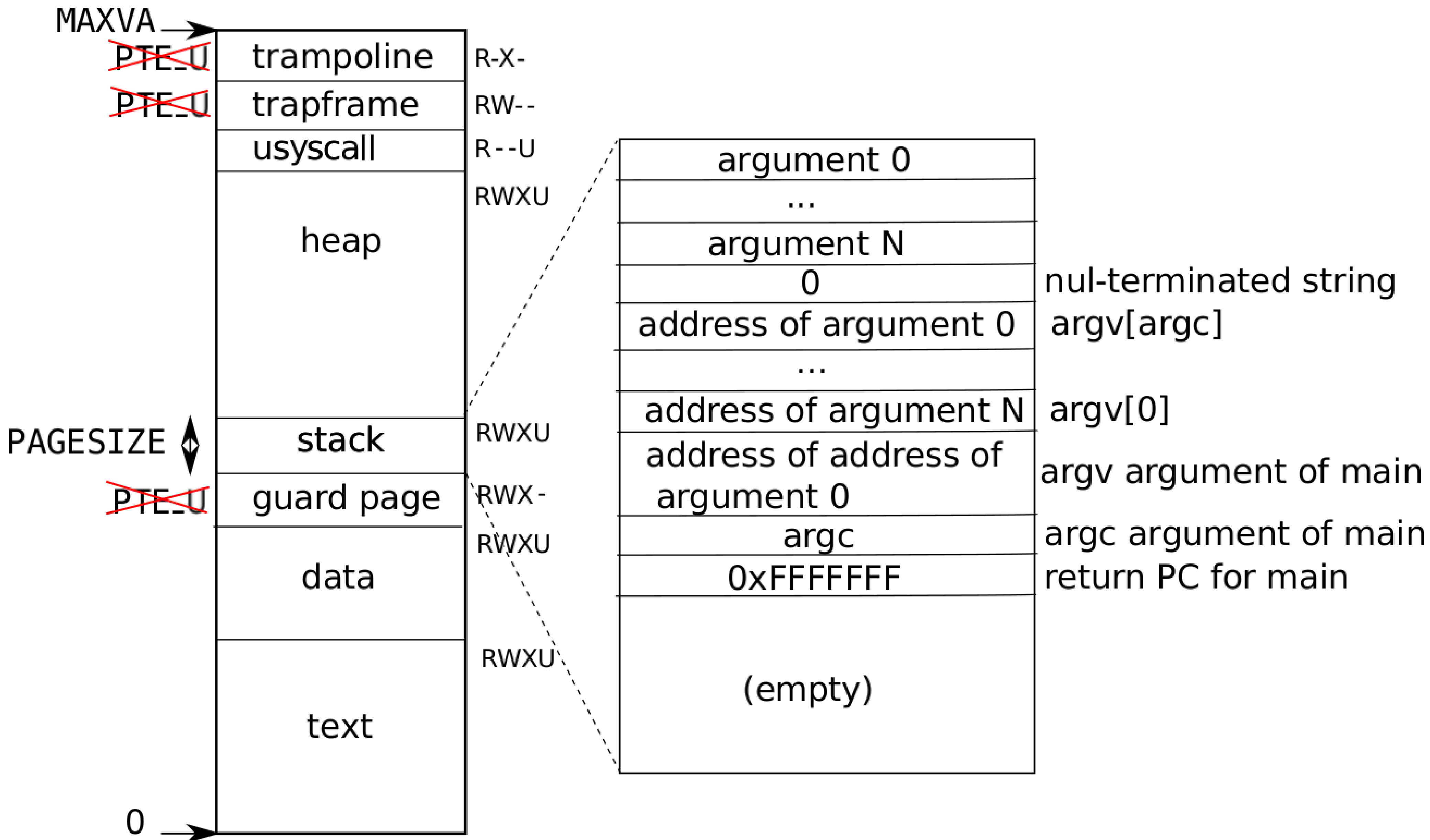
- Jednoduché mapovanie virtuálnej pamäte na fyzickú jedna-k-jednej
- Prečo sa mapujú aj zariadenia?
- Viď oprávnenia rôznych oblastí...

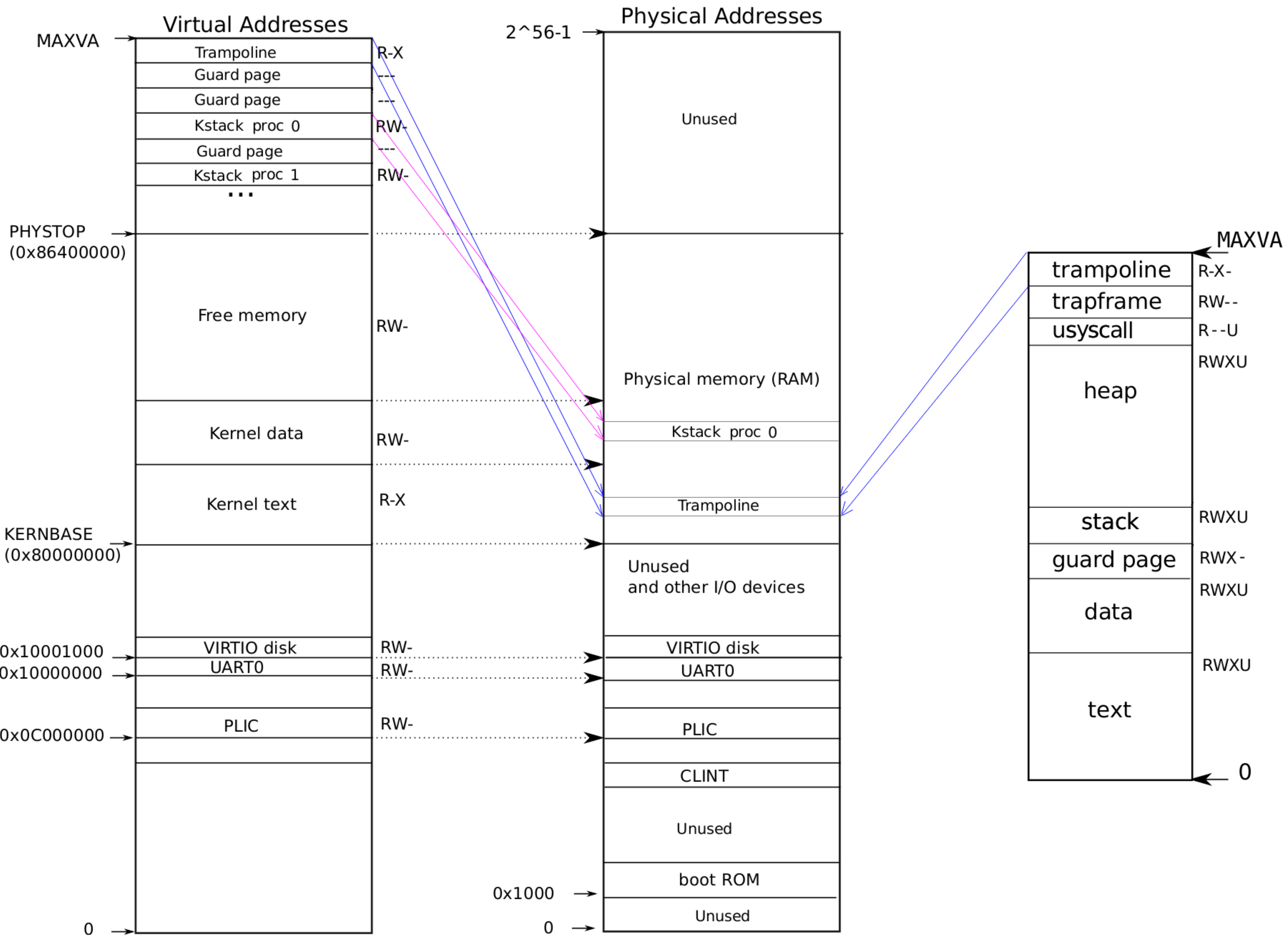
Virtuálna pamäť **<u>POUŽÍVATEĽA</u>** xv6

- Každý proces má vlastný adresný priestor
- Vlastnú tabuľku stránok
- Viď `trampoline` a `trapframe` – nie sú zapisovateľné pre používateľský proces!!!

- Jadro OS nastavuje register `satp` pri prepínaní procesov (`usertrapret()` `kernel/trap.c`:123)

Virtuálna pamäť **POUŽÍVATEĽA** xv6



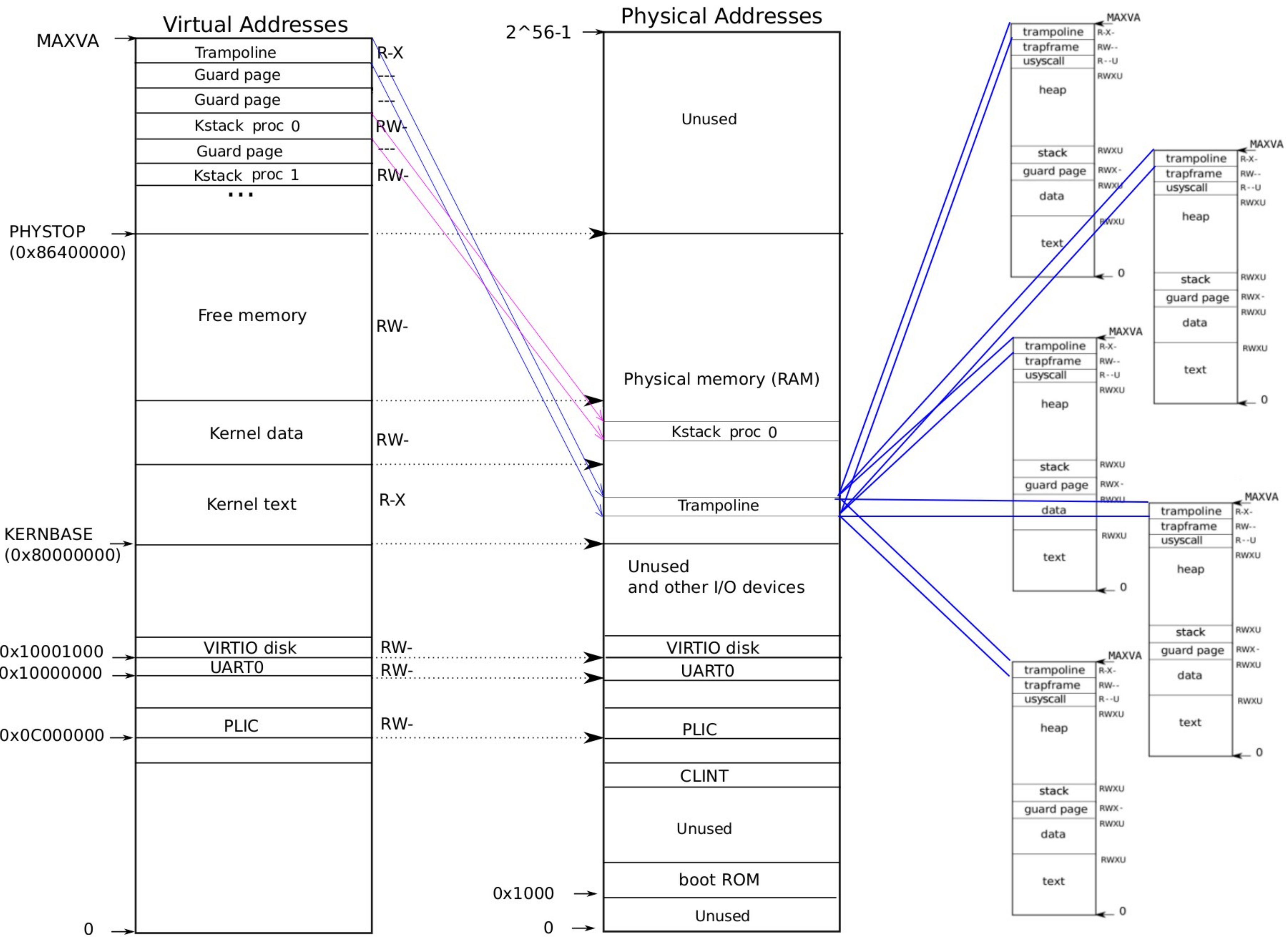


Virtual Addresses
MAXVA
Trampoline
R-X
Guard page

Guard page

Kstack proc 0
RW-
Guard page

Kstack proc 1
RW-
...
PHYSTOP
(0x86400000)
Free memory
RW-
Kernel data
RW-
Kernel text
R-X
KERNBASE
(0x80000000)
0x10001000
VIRTIO disk
RW-
0x10000000
UART0
RW-
PLIC
RW-
0x0C000000
0
Physical Addresses
2^56-1
Unused
Physical memory (RAM)
Kstack proc 0
Trampoline
Unused
and other I/O devices
VIRTIO disk
UART0
PLIC
CLINT
Unused
boot ROM
0x1000
Unused
0
MAXVA
trampoline
R-X-
trapframe
RW--
usyscall
R--U
heap
RWXU
stack
RWXU
guard page
RWX-
data
RWXU
text
RWXU
0



Virtual Addresses
MAXVA
Trampoline
R-X
Guard page

Guard page

Kstack proc 0
RW-
Guard page

Kstack proc 1
RW-
...
PHYSTOP
(0x86400000)
Free memory
RW-
Kernel data
RW-
Kernel text
R-X
KERNBASE
(0x80000000)
VIRTIO disk
RW-
0x10001000
UART0
RW-
0x10000000
PLIC
RW-
0x0C000000
0
Physical Addresses
2^56-1
Unused
Physical memory (RAM)
Kstack proc 0
Trampoline
Unused
and other I/O devices
VIRTIO disk
UART0
PLIC
CLINT
Unused
boot ROM
0x1000
Unused
0
MAXVA
trampoline
R-X-
trapframe
RW--
usyscall
R--U
heap
RWXU
stack
RWXU
guard page
RWX-
data
RWXU
text
RWXU
0

Virtuálna pamäť xv6

- Vlastnosti takejto organizácie adresného priestoru

Virtuálna pamäť xv6

- Vlastnosti takejto organizácie adresného priestoru
  - VA používateľa začína od 0 (avšak v každom procese je VA používateľa od 0 mapovaná na inú RAM – vo všeobecnosti)

Virtuálna pamäť xv6

- Vlastnosti takejto organizácie adresného priestoru
  - VA používateľa začína od 0 (avšak v každom procese je VA používateľa od 0 mapovaná na inú RAM – vo všeobecnosti)
  - 256 GiB halda užívateľa ;) (viď `MAXVA`)

Virtuálna pamäť xv6

- Vlastnosti takejto organizácie adresného priestoru
  - VA používateľa začína od 0 (avšak v každom procese je VA používateľa od 0 mapovaná na inú RAM – vo všeobecnosti)
  - 256 GiB halda užívateľa ;) (viď `MAXVA`)
  - Jednoduchý prechod *user* ↔ *kernel* mapovaním trampolíny a *trapframe* (o tom nabudúce)

Virtuálna pamäť xv6

- Vlastnosti takejto organizácie adresného priestoru
  - VA používateľa začína od 0 (avšak v každom procese je VA používateľa od 0 mapovaná na inú RAM – vo všeobecnosti)
  - 256 GiB halda užívateľa ;) (viď `MAXVA`)
  - Jednoduchý prechod *user* ↔ *kernel* mapovaním trampolíny a *trapframe* (o tom nabudúce)
  - Neľahký prístup jadra k pamäti používateľa!!!
  - Ľahký prístup jadra k fyzickej pamäti: `pa(x)` mapovaná na `va(x)`

Kód VM xv6

- Inicializácia adresného priestoru jadra
- kernel/memlayout.h a kernel/vm.c kvminit()

Kód VM xv6

- Inicializácia adresného priestoru jadra
- kernel/memlayout.h a kernel/vm.c kvminit()
  - Koľko adresného priestoru vie obsiahnuť 1 L0 položka?
  - Koľko 1 L1 položka?
  - Koľko 1 L2 položka?
  - Ako veľký je celý adresný priestor?

Kód VM xv6

- Inicializácia adresného priestoru jadra
- kernel/memlayout.h a kernel/vm.c kvminit()
  - Koľko adresného priestoru vie obsiahnuť 1 L0 položka? 4 KiB
  - Koľko 1 L1 položka? 2 MiB
  - Koľko 1 L2 položka? 1 GiB
  - Ako veľký je celý adresný priestor? 512 GiB (ale MAXVA je 256 GiB!!!)

Kód VM xv6

- Koľko pamäte (stránok) je použitých na reprezentáciu PT (t.j. mapovania adresného priestoru) po prvom volaní `kvmmap()`?
  - `kernel/vm.c`:30 `kvmmap(kpgtbl, UART0, UART0, PGSIZE, PTE_R | PTE_W);`
- Koľko pamäte (stránok) sa týmto volaním mapuje?

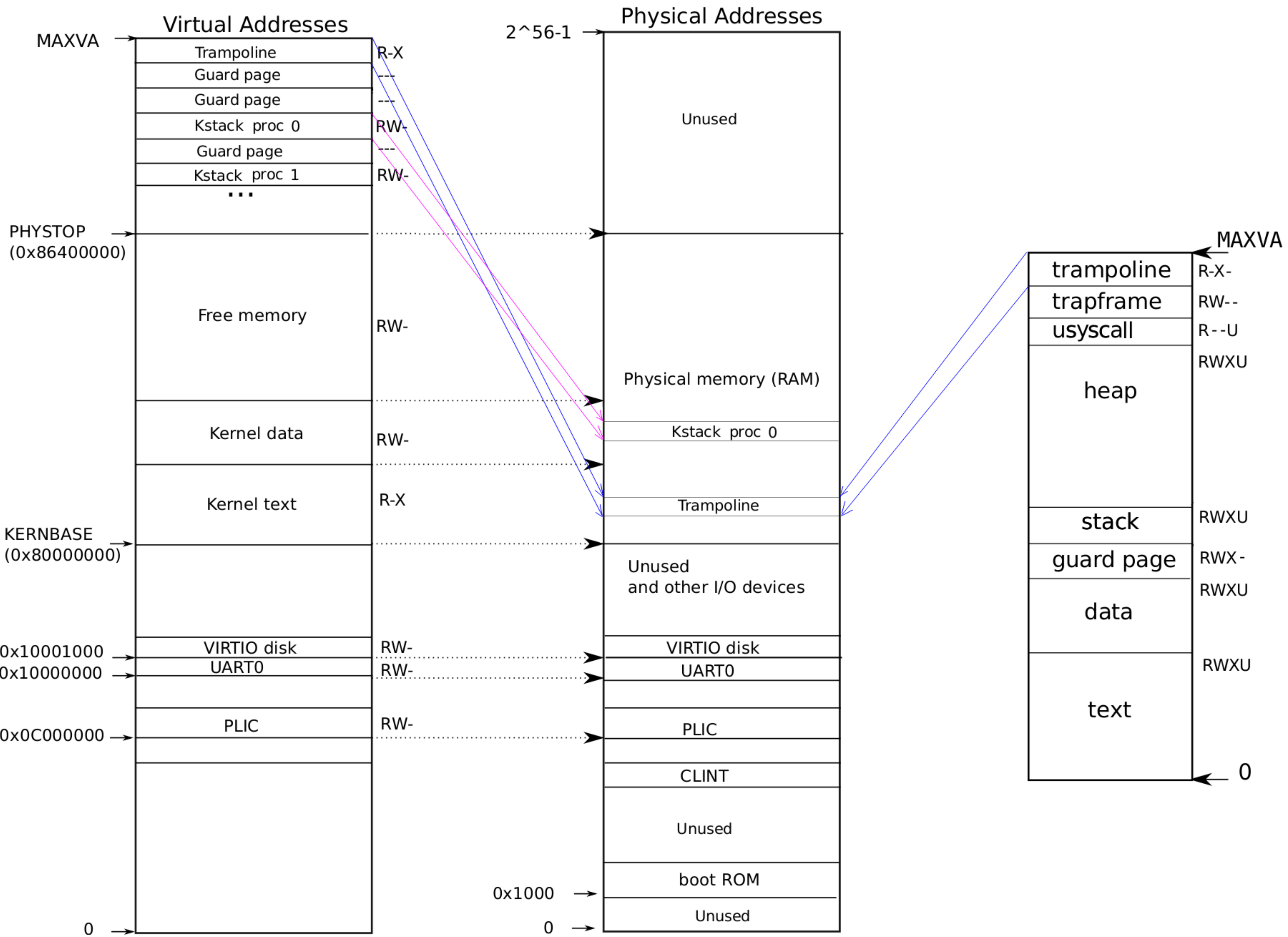
- Ukážka `vmprint()` za týmto prvým volaním

Kód VM xv6

- Koľko položiek v PT jadra zaberá `VIRTIO`
  - `kvmmap(kpgtbl, VIRTIO0, …);`

- Koľko položiek v PT jadra zaberá `PLIC`
  - `kvmmap(kpgtbl, PLIC, …, 0x400000, …);`

- Je trampolína mapovaná v `kpgtbl` iba raz?
- A čo zásobníky procesov?



Virtual Addresses
MAXVA
Trampoline
R-X
Guard page

Guard page

Kstack proc 0
RW-
Guard page

Kstack proc 1
RW-
...
PHYSTOP
(0x86400000)
Free memory
RW-
Kernel data
RW-
Kernel text
R-X
KERNBASE
(0x80000000)
0x10001000
VIRTIO disk
RW-
0x10000000
UART0
RW-
PLIC
RW-
0x0C000000
0
Physical Addresses
2^56-1
Unused
Physical memory (RAM)
Kstack proc 0
Trampoline
Unused
and other I/O devices
VIRTIO disk
UART0
PLIC
CLINT
Unused
boot ROM
0x1000
Unused
0
MAXVA
trampoline
R-X-
trapframe
RW--
usyscall
R--U
heap
RWXU
stack
RWXU
guard page
RWX-
data
RWXU
text
RWXU
0

Kód VM xv6

- `kvminithart()`
  - `w_satp()`
  - `sfence_vma()`

- Prečo po nastavení PT musí nasledovať inštrukcia `sfence_vma()`? (kernel/riscv.h)

Kód VM xv6

- `kvminithart()`
  - `w_satp()`
  - `sfence_vma()`

- Prečo po nastavení PT musí nasledovať inštrukcia `sfence_vma()`? (kernel/riscv.h)
  - TLB (*Translation Lookaside Buffer*) – vyrovnávacia pamäť pre preklad VA→PA

Kód VM xv6

- `mappages()`
  - Argumenty: top PD, va, size, pa, perm
  - Do PT zaznamenáva mapovanie <va; va+size) na príslušný interval <pa; pa+size)

Kód VM xv6

- `mappages()`
  - Argumenty: top PD, va, size, pa, perm
  - Do PT zaznamenáva mapovanie <va; va+size) na príslušný interval <pa; pa+size)
- walk()
  - Napodobňuje činnosť MMU; pre danú VA a PT nájde príslušný PTE záznam v PT
  - Makro `PX(level, va)` extrahuje 9 bitov indexu na úrovni `level`

Kód VM xv6

- `walk(pagetable, va)` algoritmus:

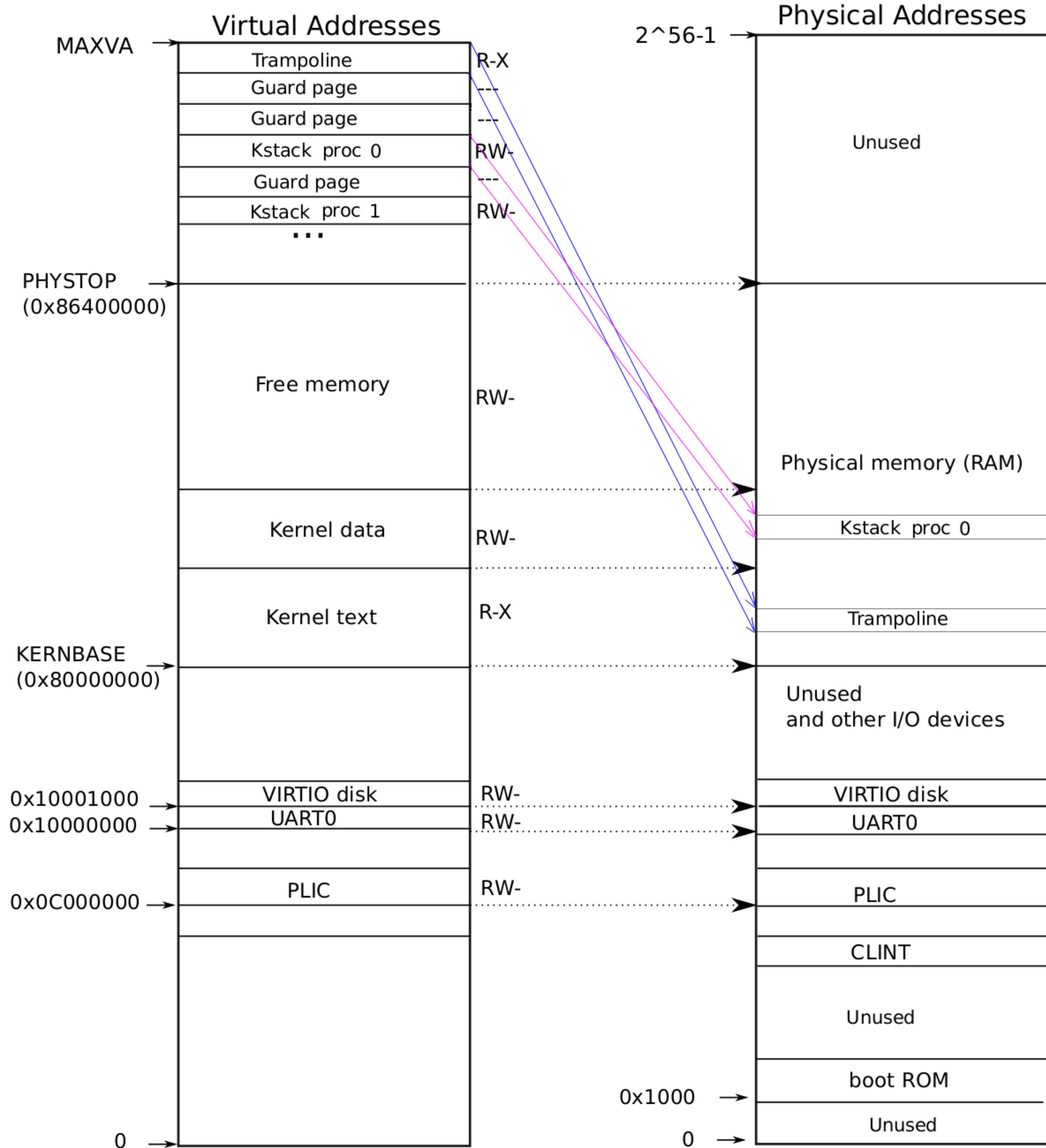
1) PTE_addr = &pagetable[PX(level, va)]
2) If is set PTE_V in *PTE_addr
    - Príslušná tabuľka v PT jestvuje
    - PTE2PA extrahuje PPN zo záznamu PTE
3) If not set PTE_V in *PTE_addr
    - Alokuj tabuľku ďalšej úrovne
    - Vyplň *PTE_addr s PPN alokovanej tabuľky (PA2PTE)
4) Vráť adresu PTE z (vytvorenej/jestvujúcej) tabuľky L0

Kód VM xv6

- `procinit()` v `kernel/proc.c`

- Statické pole procesov
- Každému procesu alokuj v ramke stránku na zásobník jadra (veľkosť `PGSIZE`) a namapuj do VA kernelu
- Každý proces má vlastný zásobník v jadre

- Každý zásobník má „*guard page*”!!! (obrázok)



Virtual Addresses
Physical Addresses
MAXVA
2^56-1
Trampoline
R-X
Guard page

Guard page

Kstack proc 0
RW-
Guard page

Kstack proc 1
RW-
...
Unused
PHYSTOP
(0x86400000)
Free memory
RW-
Physical memory (RAM)
Kernel data
RW-
Kstack proc 0
Kernel text
R-X
Trampoline
KERNBASE
(0x80000000)
Unused
and other I/O devices
0x10001000
VIRTIO disk
RW-
VIRTIO disk
0x10000000
UART0
RW-
UART0
PLIC
RW-
PLIC
0x0C000000
CLINT
Unused
boot ROM
0x1000
Unused
0
0

Kód VM xv6

- Inicializácia používateľského adresného priestoru
  - `allocproc()` v `kernel/proc.c`
  - `fork()` v `kernel/proc.c`
  - `exec()` v `kernel/exec.c`

Kód VM xv6

- Inicializácia používateľského adresného priestoru
  - `allocproc()` alokuje prázdnu PT najvyššieho stupňa
  - `fork()` robí uvmcopy()
  - `exec()` prepíše PT procesu novou
    - `uvmalloc()`
    - `loadseg()`

- Ukážka `vmprint()` pre procesy `init` a `sh`

Kód VM xv6

- Ak chce (používateľský) proces viac pamäte (alokácia z haldy), vyvolá systémové volanie `sbrk(n)`; o n sa zväčší pamäť procesu
  - Viď `user/umalloc.c` volanie `sbrk()`

Kód VM xv6

- Ak chce (používateľský) proces viac pamäte (alokácia z haldy), vyvolá systémové volanie `sbrk(n)`; o n sa zväčší pamäť procesu
  - Viď `user/umalloc.c` volanie `sbrk()`
- Každý proces má svoju veľkosť; volanie `sbrk()` pridáva procesu na konci pamäť, zväčšuje veľkosť procesu

Kód VM xv6

- Ak chce (používateľský) proces viac pamäte (alokácia z haldy), vyvolá systémové volanie `sbrk(n)`; o n sa zväčší pamäť procesu
  - Viď `user/umalloc.c` volanie `sbrk()`
- Každý proces má svoju veľkosť; volanie `sbrk()` pridáva procesu na konci pamäť, zväčšuje veľkosť procesu (`kernel/sysproc.c`)
  - Alokuje fyzickú pamäť (RAM)
  - Mapuje ju do PT procesu
  - Vracia počiatočnú adresu tejto novej pamäte

Kód VM xv6

- `growproc()` v `kernel/proc.c`
  - `proc->sz` je aktuálna veľkosť procesu
  - `uvmalloc()` obsahuje hlavnú funkcionalitu
  - Pri prepnutí z jadra do *user space* sa do `satp` uloží adresa aktualizovanej PT

Kód VM xv6

- `growproc()` v `kernel/proc.c`
  - `proc->sz` je aktuálna veľkosť procesu
  - `uvmalloc()` obsahuje hlavnú funkcionalitu
  - Pri prepnutí z jadra do *user space* sa do `satp` uloží adresa aktualizovanej PT

- `uvmalloc()` v `kernel/vm.c`
  - Prečo je tam `PGROUNDUP`?
  - Prečo `mappages(…, PTE_W|PTE_X|PTE_R|PTE_U)`?

Čítanie na večer / nad ránom

- Prečítať kapitolu 3
- Page Tables

- https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2024/xv6/book-riscv-rev4.pdf