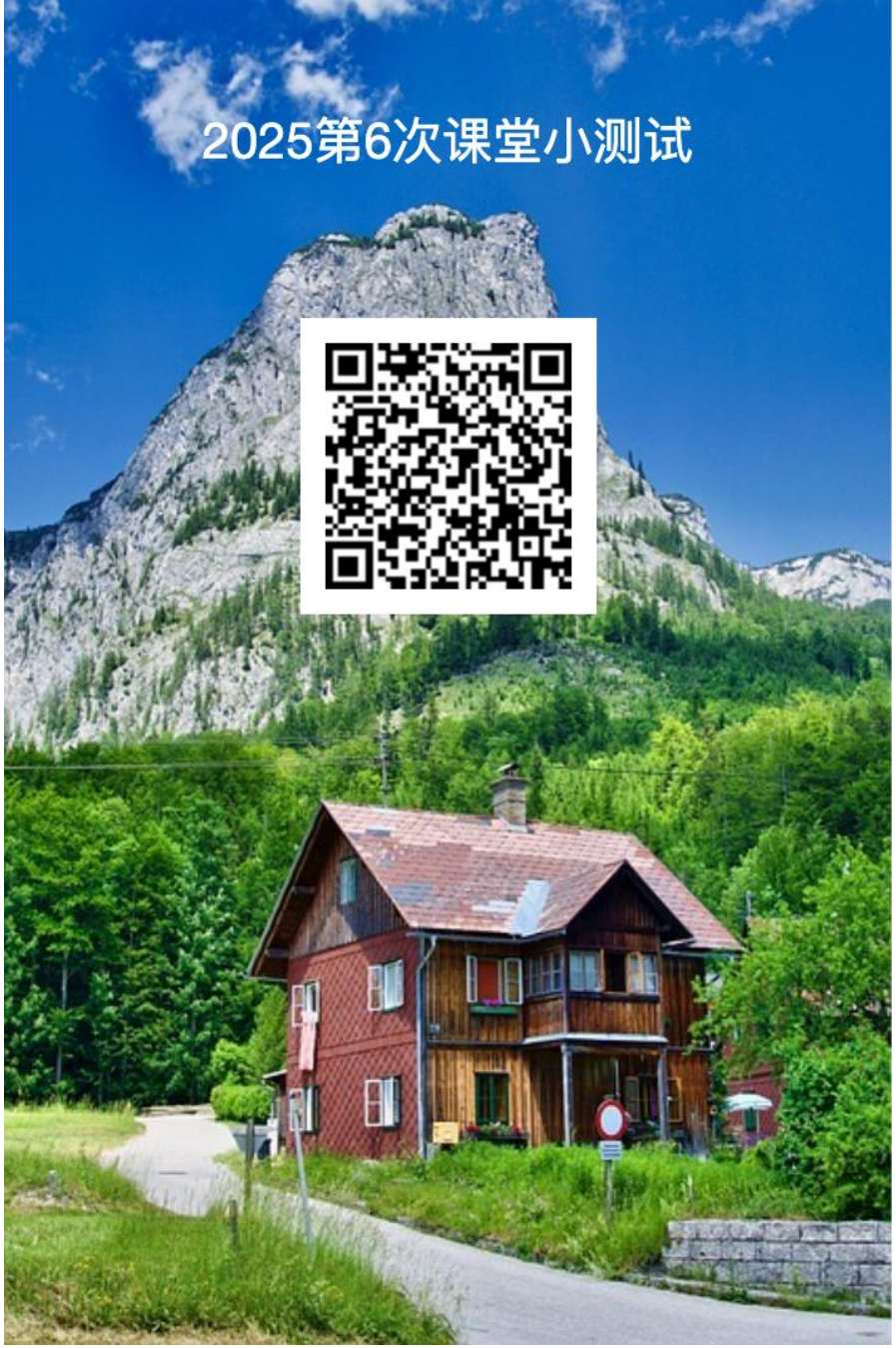

2025第6次课堂小测试


2025第7次课堂小测试

操作系统 Operating System

3.6 内存管理-页目录自映射

原仓周

yuancz@buaa.edu.cn

内容提要

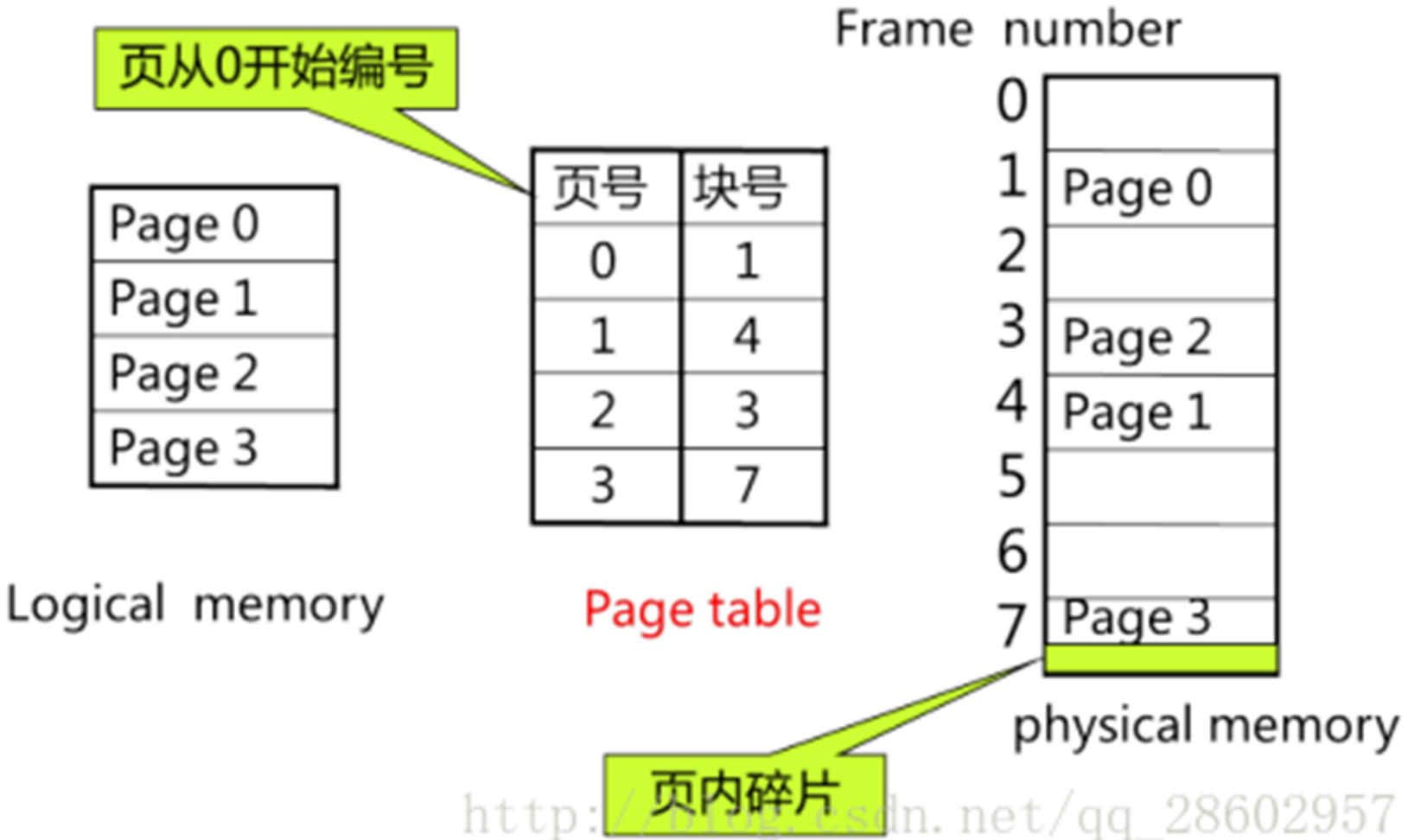
- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

内容提要

- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

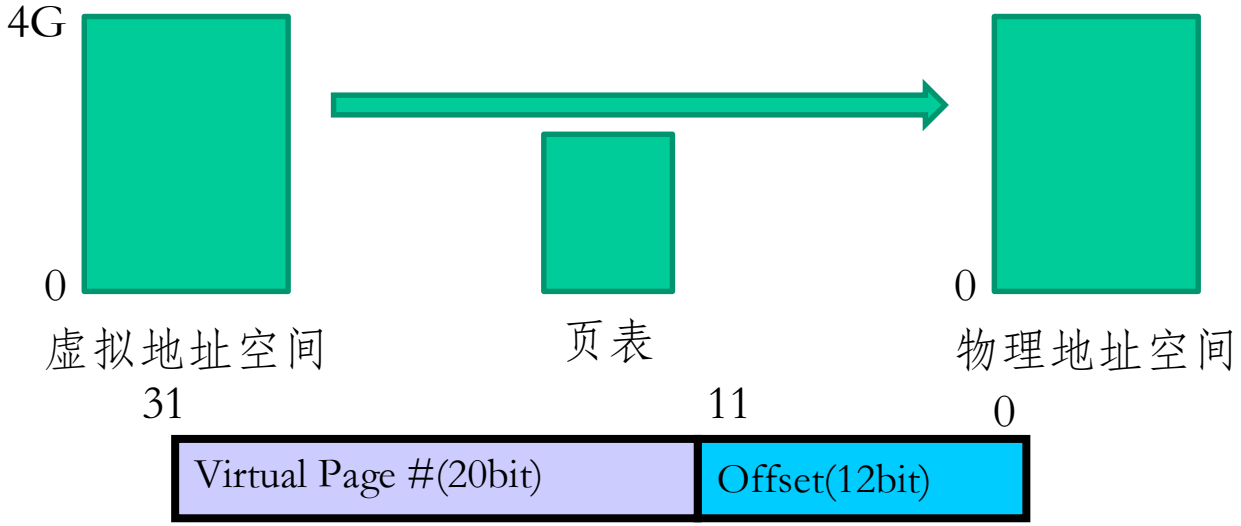
回顾：页式内存管理

- 页式内存管理思想：破除内存分配“连续性假设”



回顾：虚拟页式内存管理

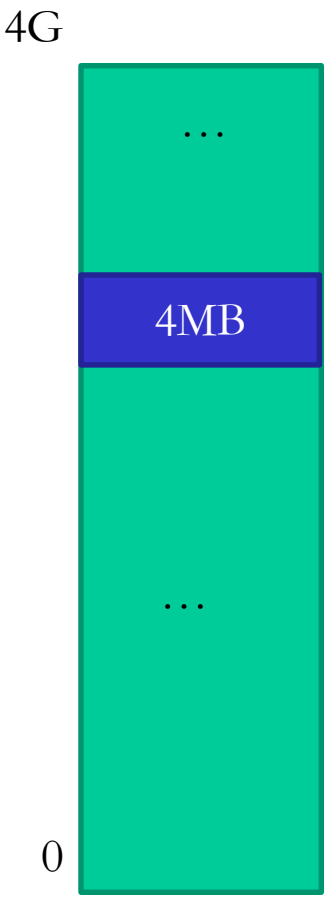
- 页表的作用是将虚拟地址空间映射到物理地址空间



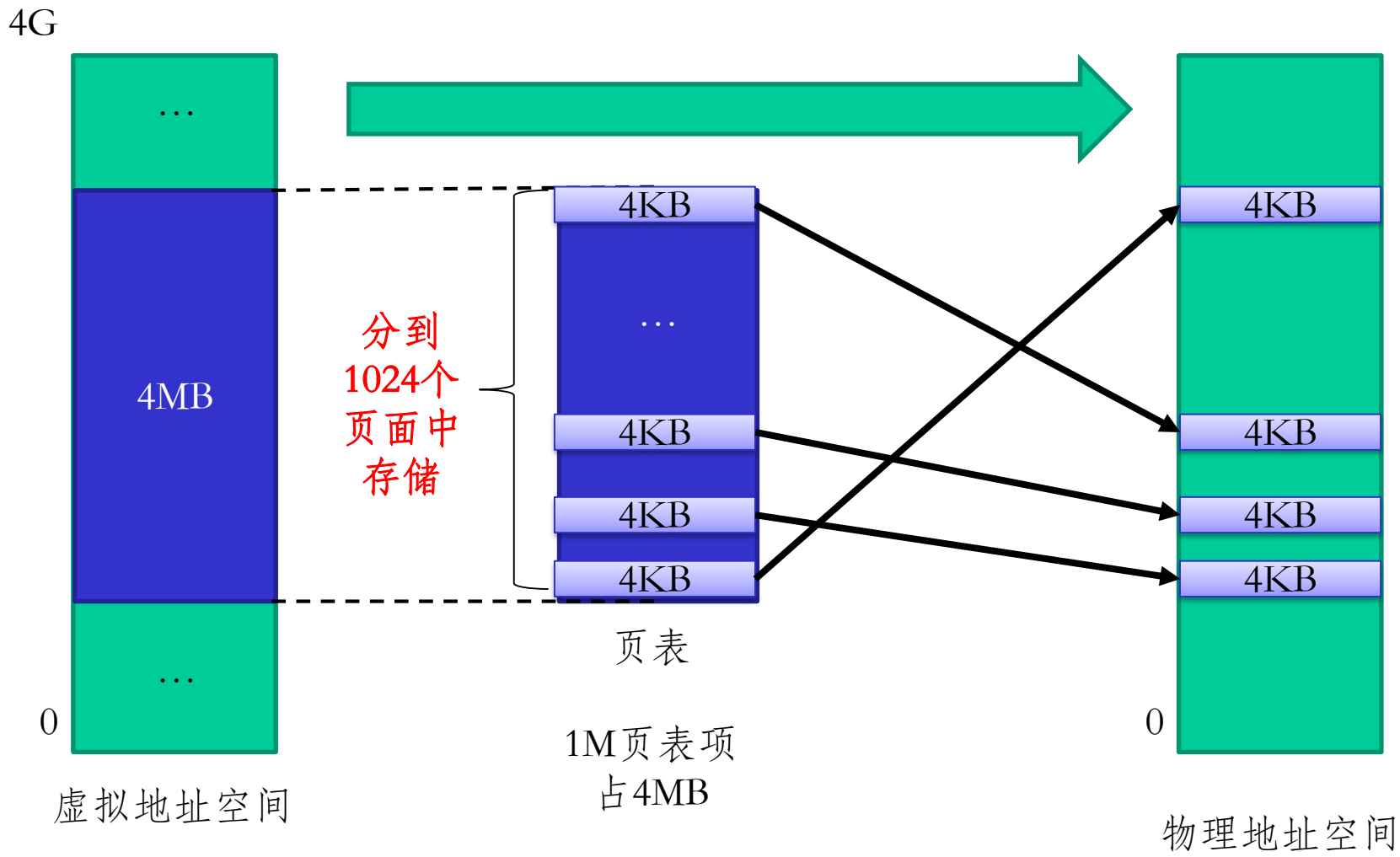
- 对于32位地址长度，可寻址空间为4GB
- 采用12位页内偏移，表明内存页大小为4KB
- 每个页表项负责记录1页（4KB）的地址映射关系
- 整个4GB地址空间被划分为4GB/4KB=1M页，所以需要1M个页表项来记录逻辑-物理映射关系

回顾：一级页表过大的问题

- 页表的大小与逻辑地址空间大小成正比
  - 如果逻辑地址空间很大，则划分的页比较多，页表就很大，占用的物理存储空间大，实现较困难（分配困难）。
  - 例如：对于 32 位逻辑地址空间的分页系统，如果规定页面大小为 4 KB 即 2^{12} B，则在每个进程页表就由高达2^{20} 页组成。设每个页表项占用4个字节，每个进程仅仅页表就要占用 4 MB 的连续物理内存空间。
  - 64位逻辑地址空间呢？
    - $2^{64}/2^{12}=2^{52}$页，2^{54}B=16PB的连续物理内存

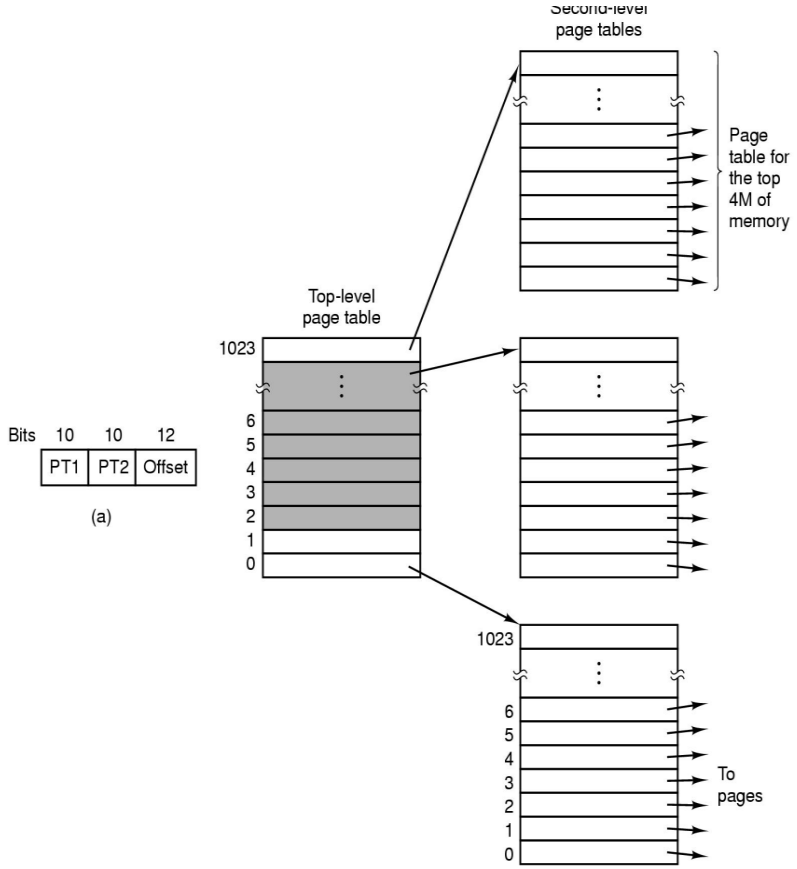


回顾：需要4MB虚存来实现一级页表映射



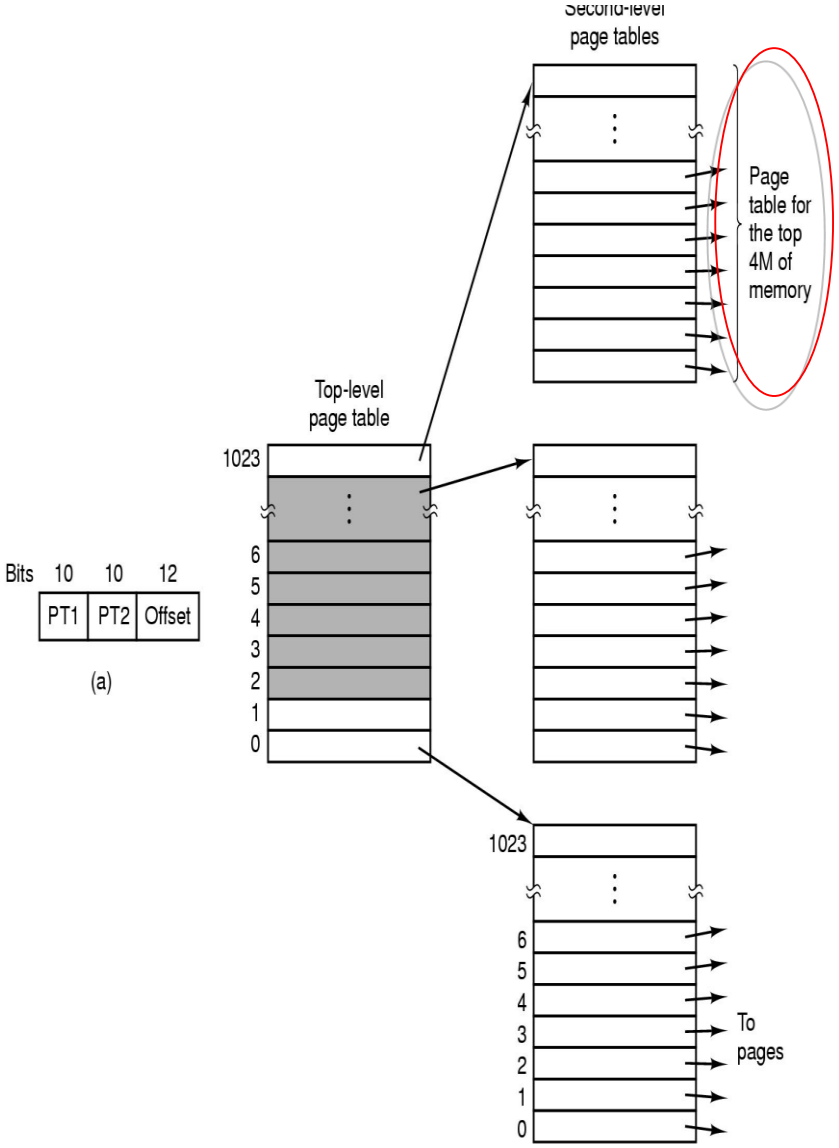
回顾：多级页表

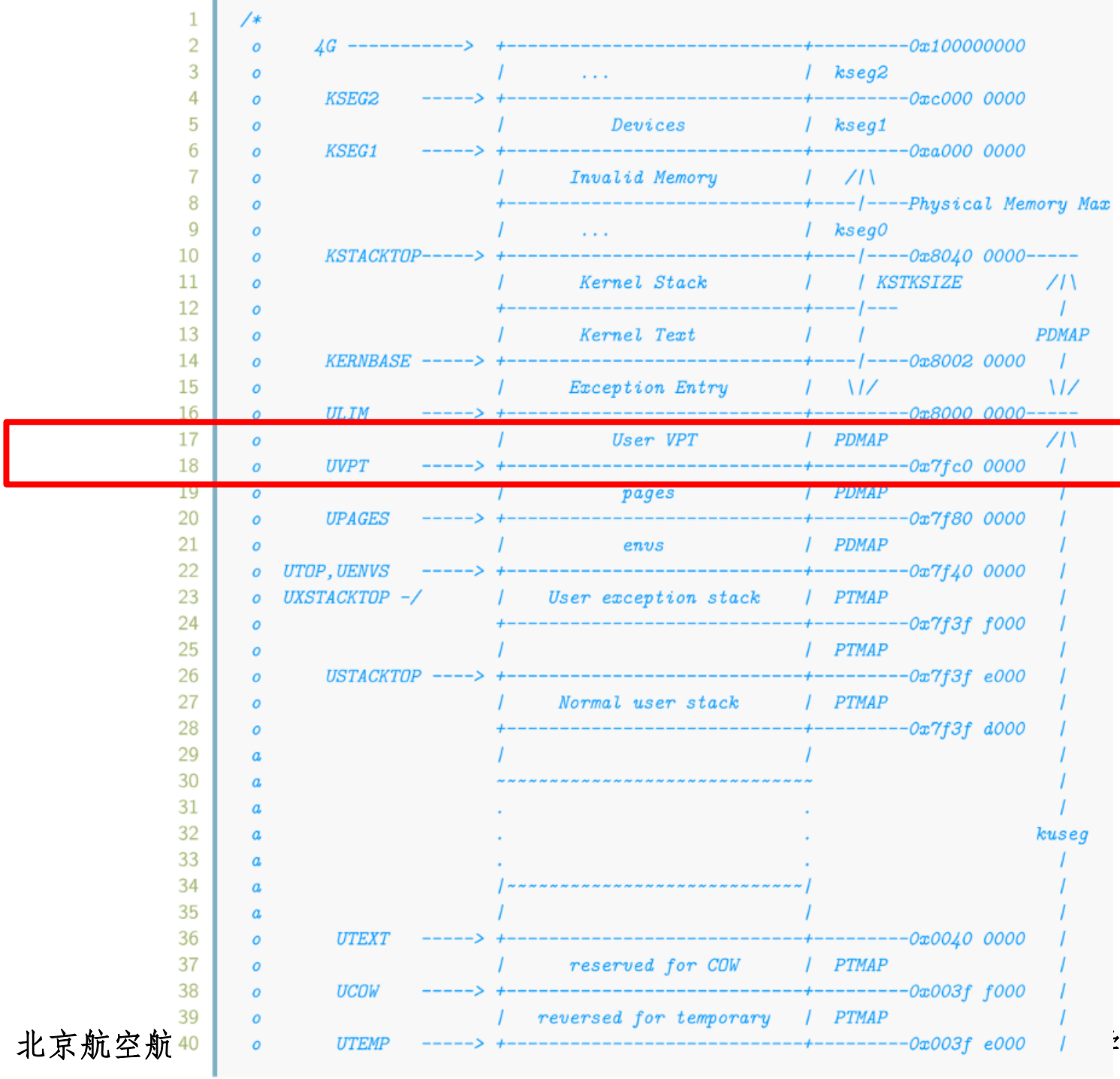
- 解决问题的方法
  - 多级页表：继续破除页表存储的连续性假设
  - 动态调入页表: 只将当前需用的部分页表项调入内存，其余的需用时再调入。
- 例：
  - 32位地址空间
  - 4K页面大小
  - 1M+1K页表项
  - 地址结构
    - 10 10 12



二级页表共4MB + 4KB 的物理内存

- 页目录定义：页表页的地址映射
  - 1024个页表页逻辑上连续，物理上可以分散，其对应逻辑-物理映射关系记录在页目录中
  - 页目录占1页（4KB）空间，有1024项（页目录项），每一项指向一个页表页
  - 每一页目录项对应4MB内存，1024个页目录项正好对应4GB内存（整个地址空间）




/*
4G ----------> +----------0x100000000
... | kseg2
KSEG2 -----> +----------0xc000 0000
Devices | kseg1
KSEG1 -----> +----------0xa000 0000
Invalid Memory | /|\
+----|----Physical Memory Max
... | kseg0
KSTACKTOP-----> +----|----0x8040 0000-----
Kernel Stack | | KSTKSIZE /|\
+----|--- |
Kernel Text | | PDMAP
KERNBASE -----> +----|----0x8002 0000 |
Exception Entry | \|/ \|/
ULIM -----> +----------0x8000 0000-----
User VPT | PDMAP /|\
UVPT -----> +----------0x7fc0 0000 |
pages | PDMAP |
UPAGES -----> +----------0x7f80 0000 |
envs | PDMAP |
UTOP,UENVS -----> +----------0x7f40 0000 |
UXSTACKTOP -/ User exception stack | PTMAP |
+----------0x7f3f f000 |
| PTMAP |
USTACKTOP ----> +----------0x7f3f e000 |
Normal user stack | PTMAP |
+----------0x7f3f d000 |
| | |
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ |
. . |
. . kuseg
. . |
|~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~| |
| | |
UTEXT -----> +----------0x0040 0000 |
reserved for COW | PTMAP |
UCOW -----> +----------0x003f f000 |
reversed for temporary | PTMAP |
UTEMP -----> +----------0x003f e000 |
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

基本功练习1

- 1 KB = 1024 B = 2^{10} B
- 4 KB = 4096 B = 2^{12} B
- 1MB = 2^{20} B
- 4MB = 2^{22} B

以下用最大字节单位

- 2^{16} B = 64KB
- 2^{32} B = 4GB
- 2^{64} B = 16EB

- 2^{10} B = 1KB
- 2^{20} B = 1MB
- 2^{30} B = 1GB
- 2^{40} B = 1TB
- 2^{50} B = 1PB
- 2^{60} B = 1EB
- 2^{70} B = 1ZB

基本功练习2

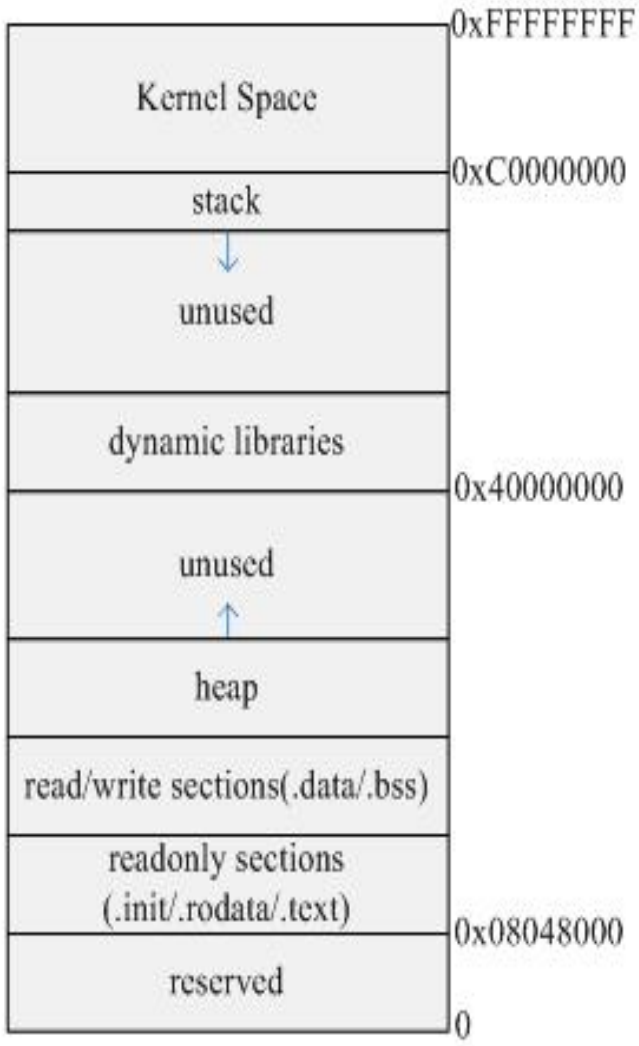
- 十六进制数0x12345678转成二进制有 32 位
- 0x12345678 >> 12 = 0x12345
- 0x80000000 >> 22 = 0x200
- 0x1000 = 4096 (10) = 4 K
- 16K = 0x 4000 ; 64K = 0x 10000
- 1M = 0x 100000 ; 4M = 0x 400000
- 1G = 0x 40000000 ; 2G = 0x 80000000
- 3G = 0x C0000000 ; 4G = 0x 100000000

内容提要

- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

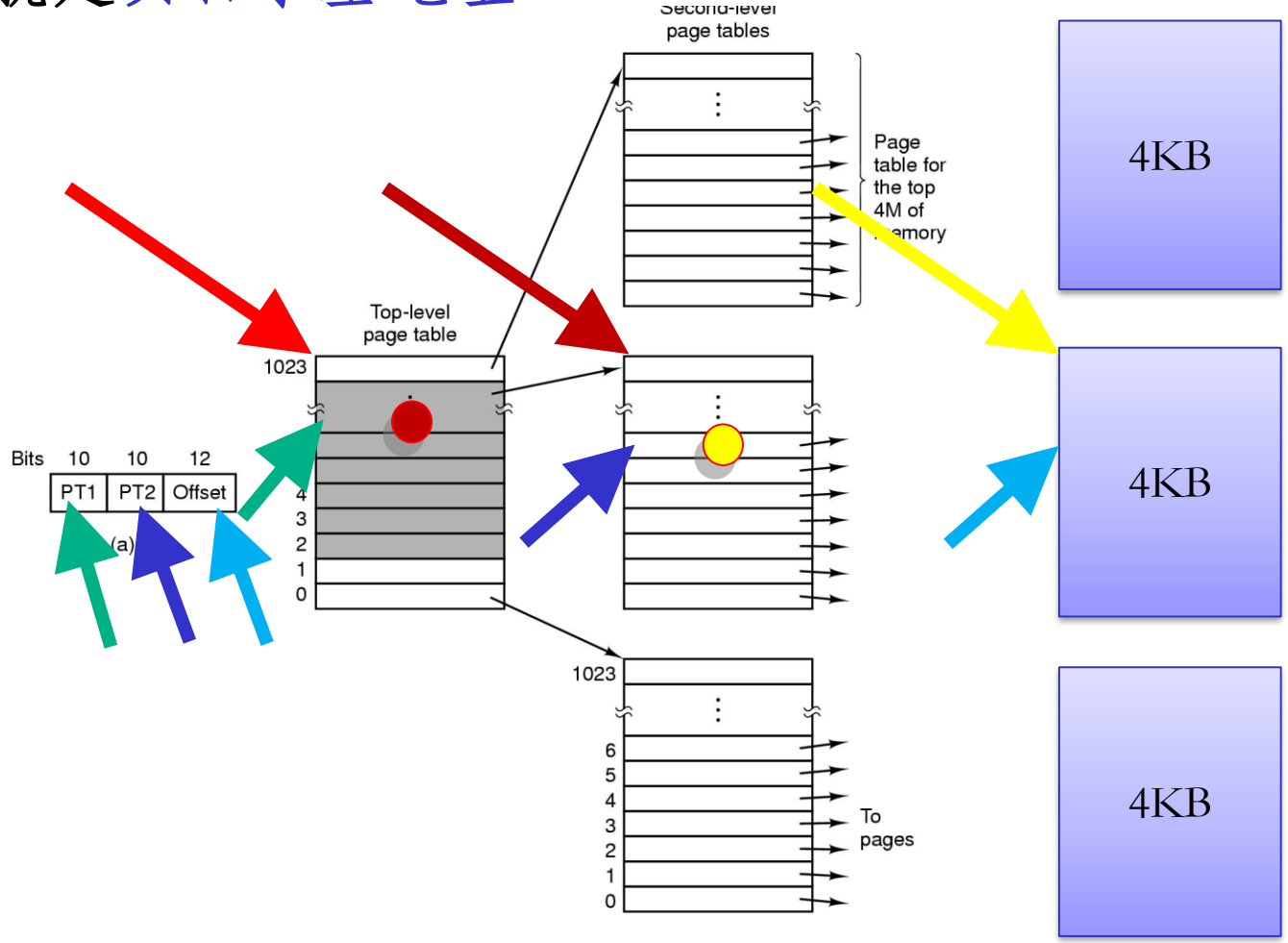
为什么页目录要自映射?

- 谁来管理（填写）页表?
  - 当然是OS
- 填写页表目的?
  - 反映内存布局
- 如何填写、修改页表?
  - 写页表所在内存
  - 用虚拟地址还是物理地址?



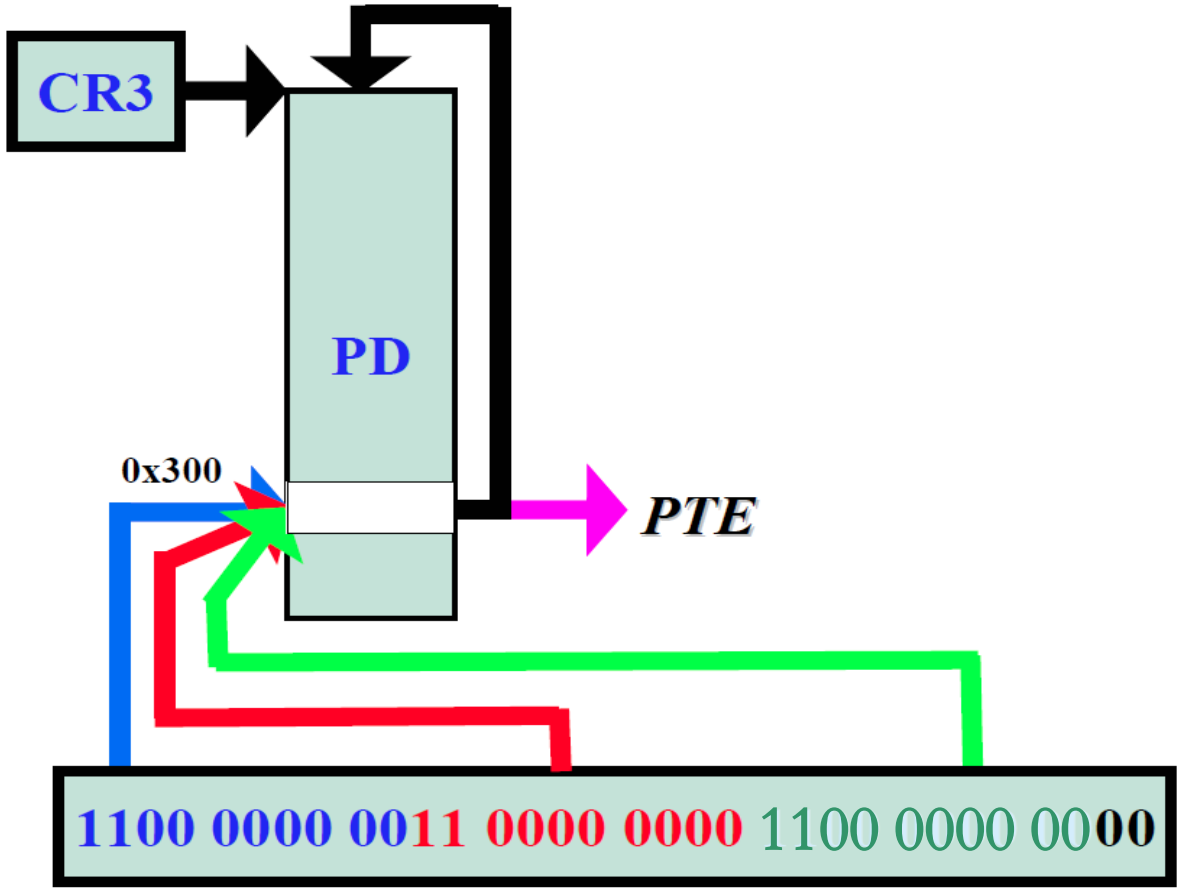
什么是自映射：页目录框=页表框=页框

- 自映射：页目录中有一条PDE指向自身物理地址
- 也就是页目录基地址

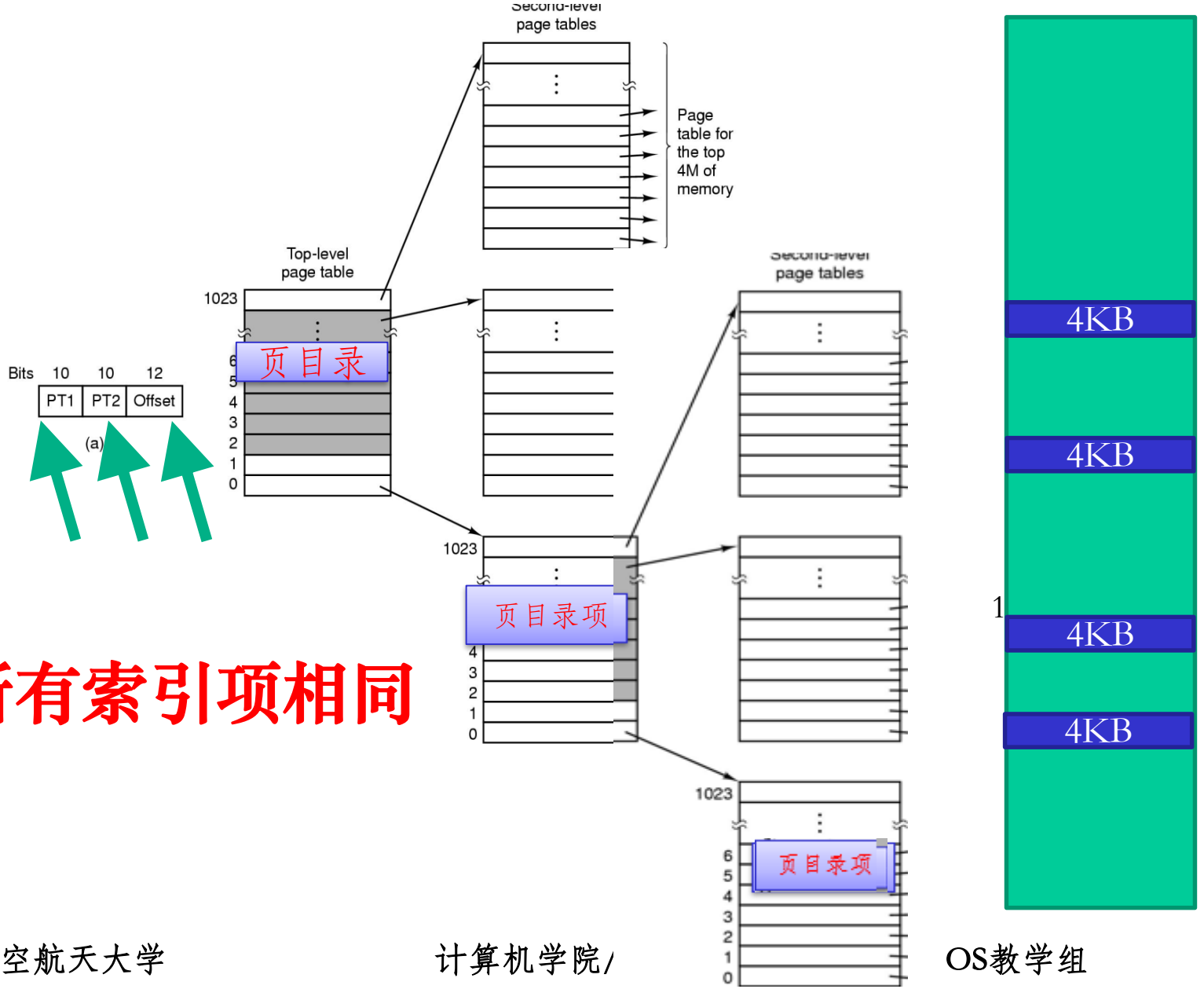


0

自映射的使用过程示例——多种使用方式

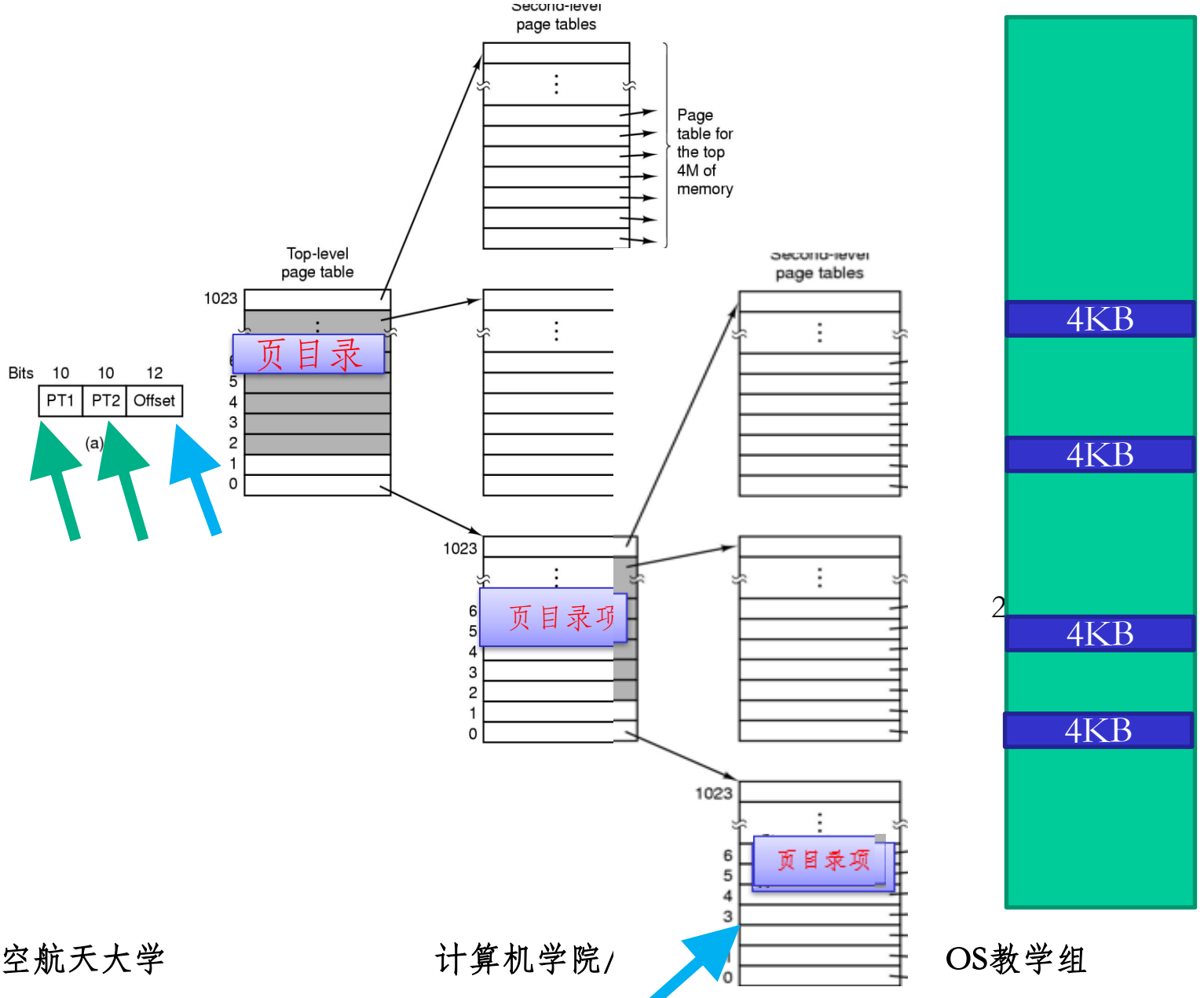


自映射的使用效果示例——访问页映射项

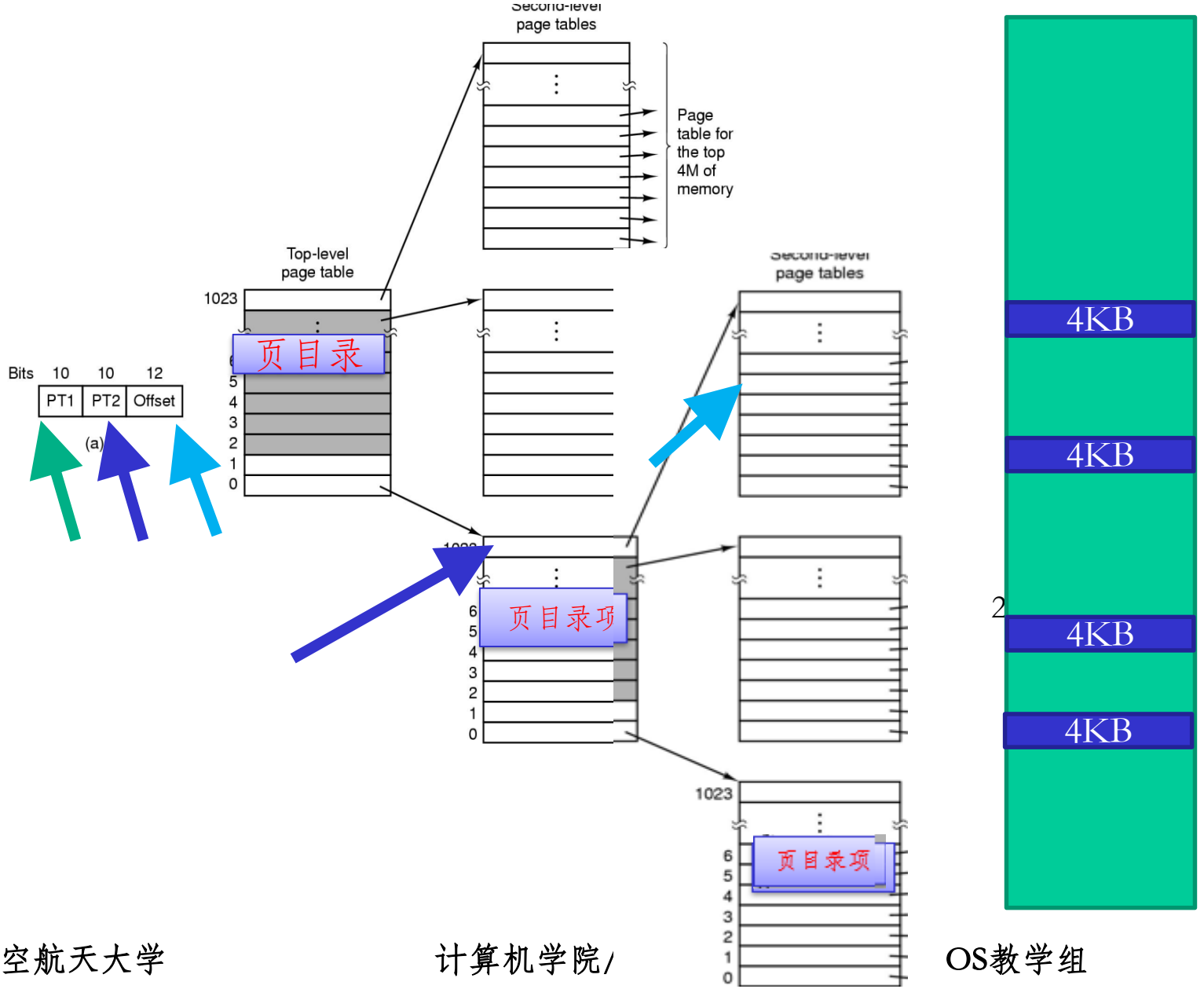


所有索引项相同

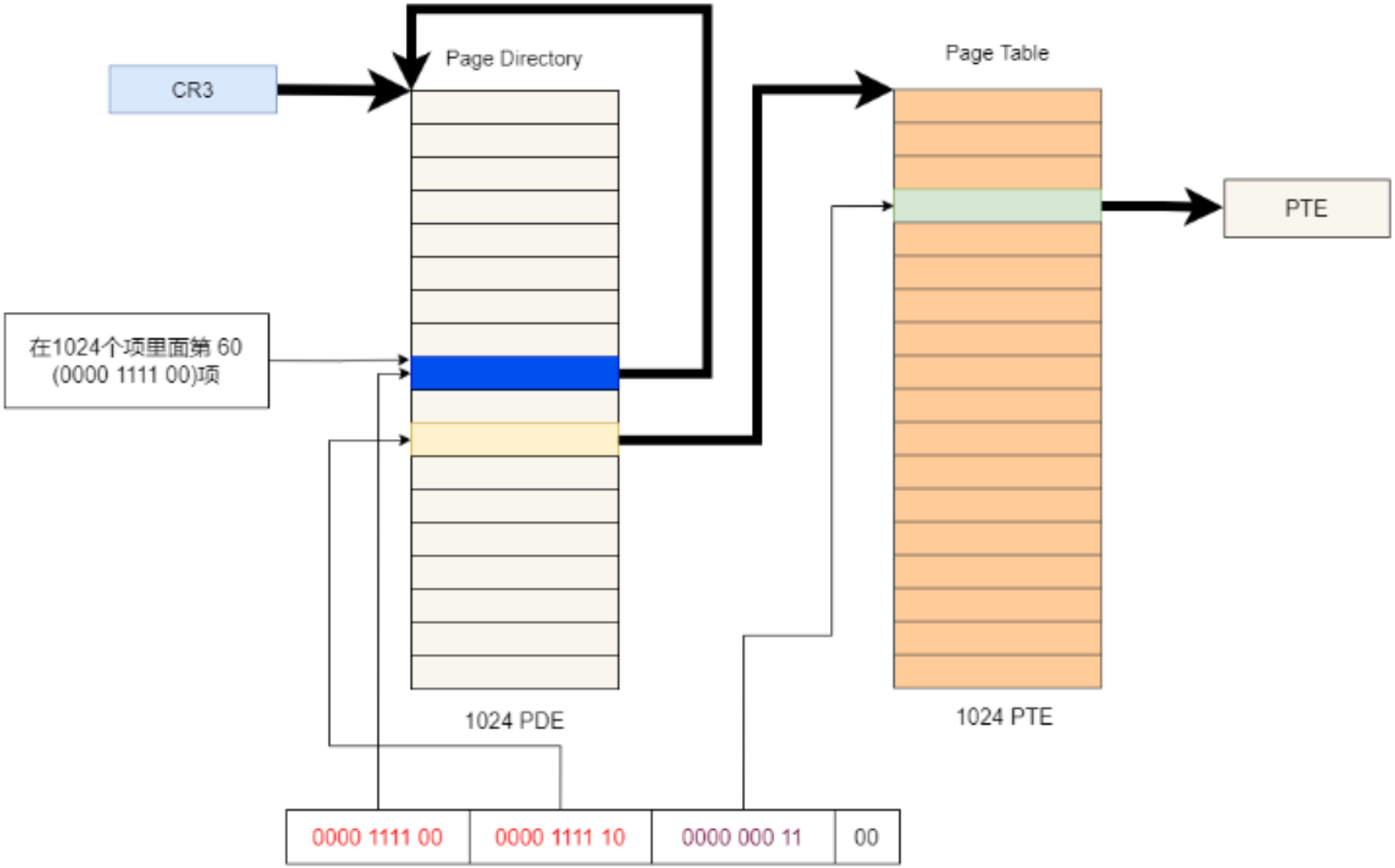
自映射的使用效果示例——访问页目录



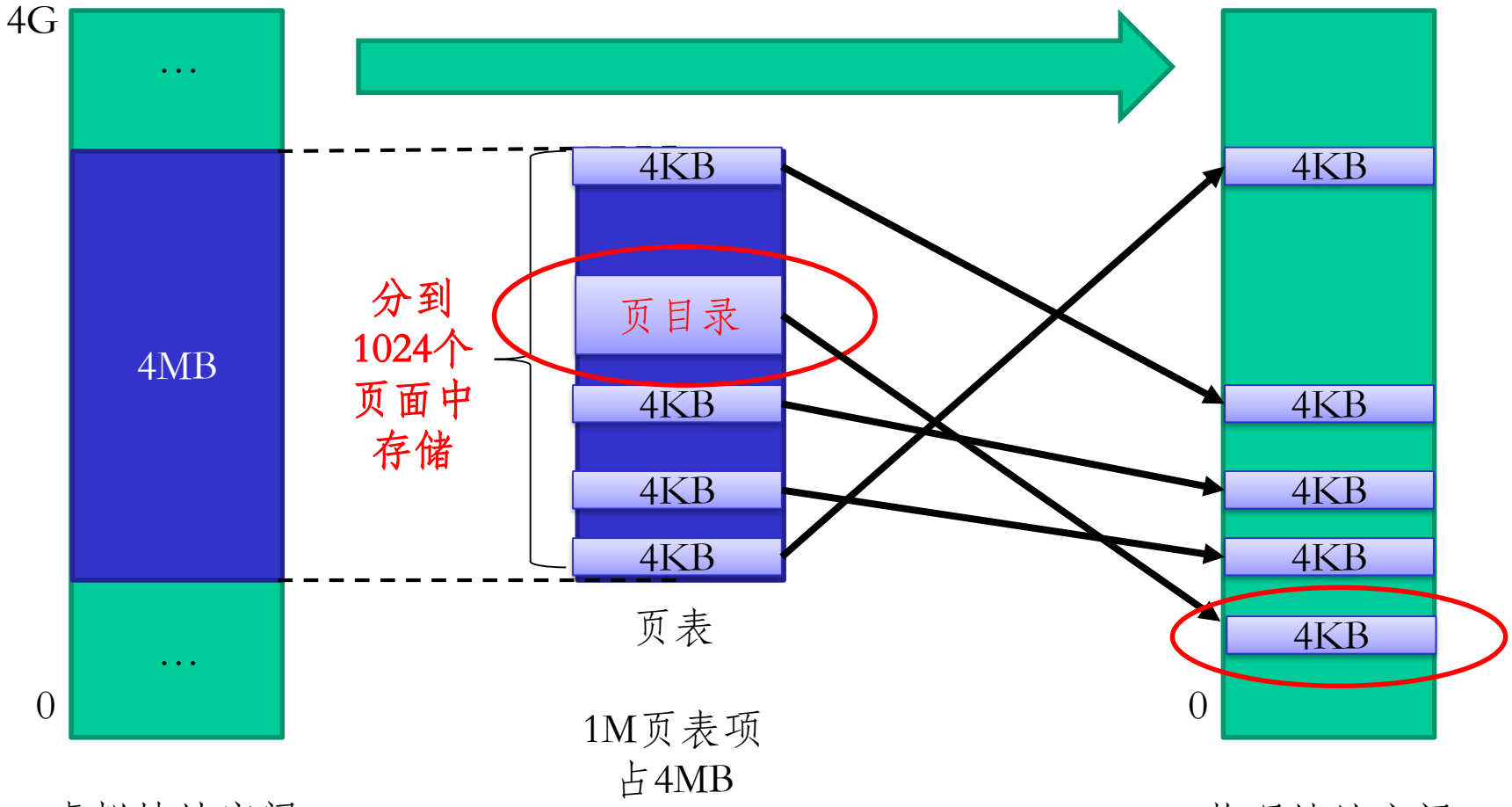
自映射的使用效果示例——访问页表



自映射的使用过程示例——访问页表



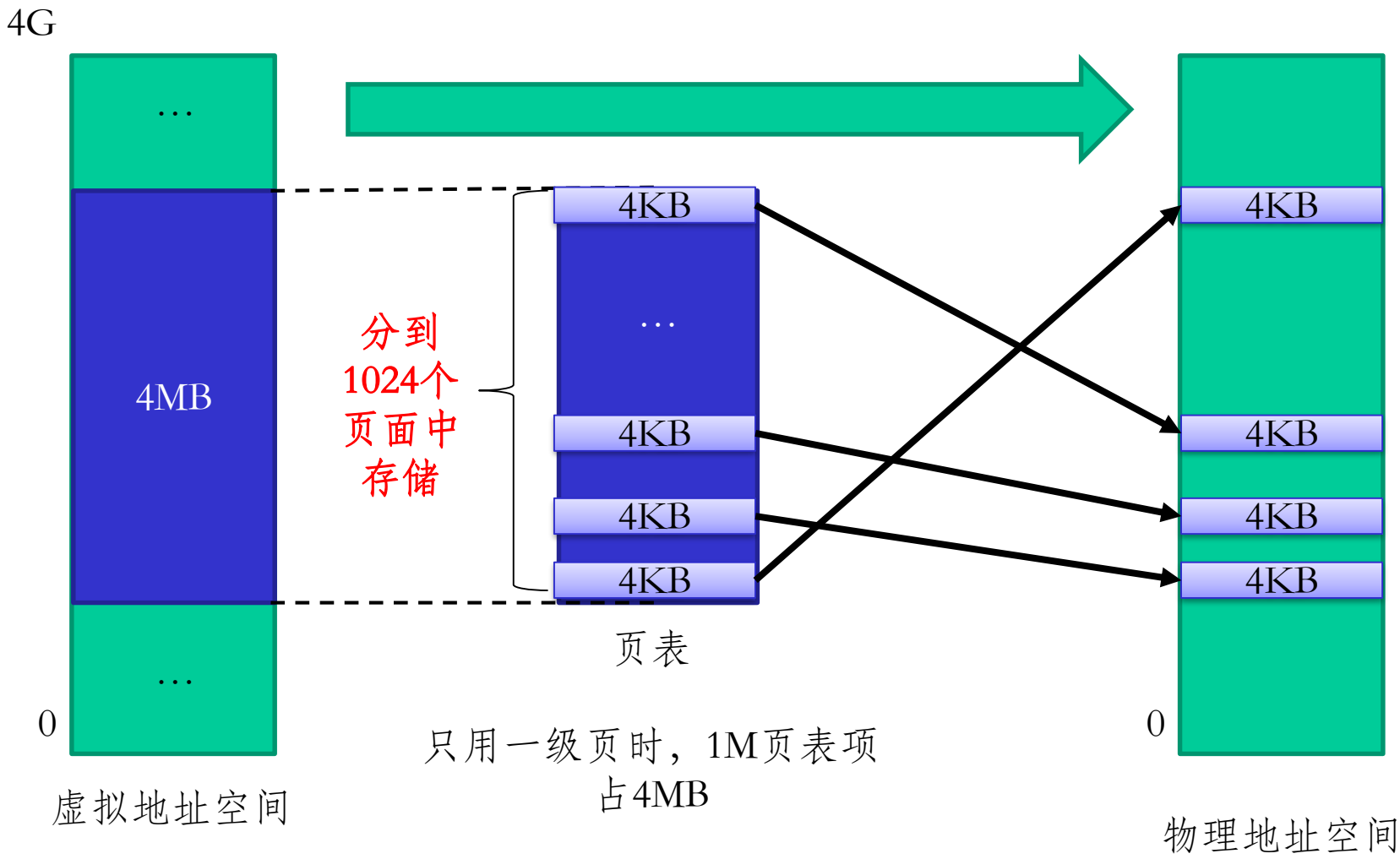
总结：页目录自映射


4G
…
4MB
…
0
分到
1024个
页面中
存储
4KB
页目录
4KB
4KB
4KB
页表
1M页表项
占4MB
4KB
4KB
4KB
4KB
0
虚拟地址空间
物理地址空间

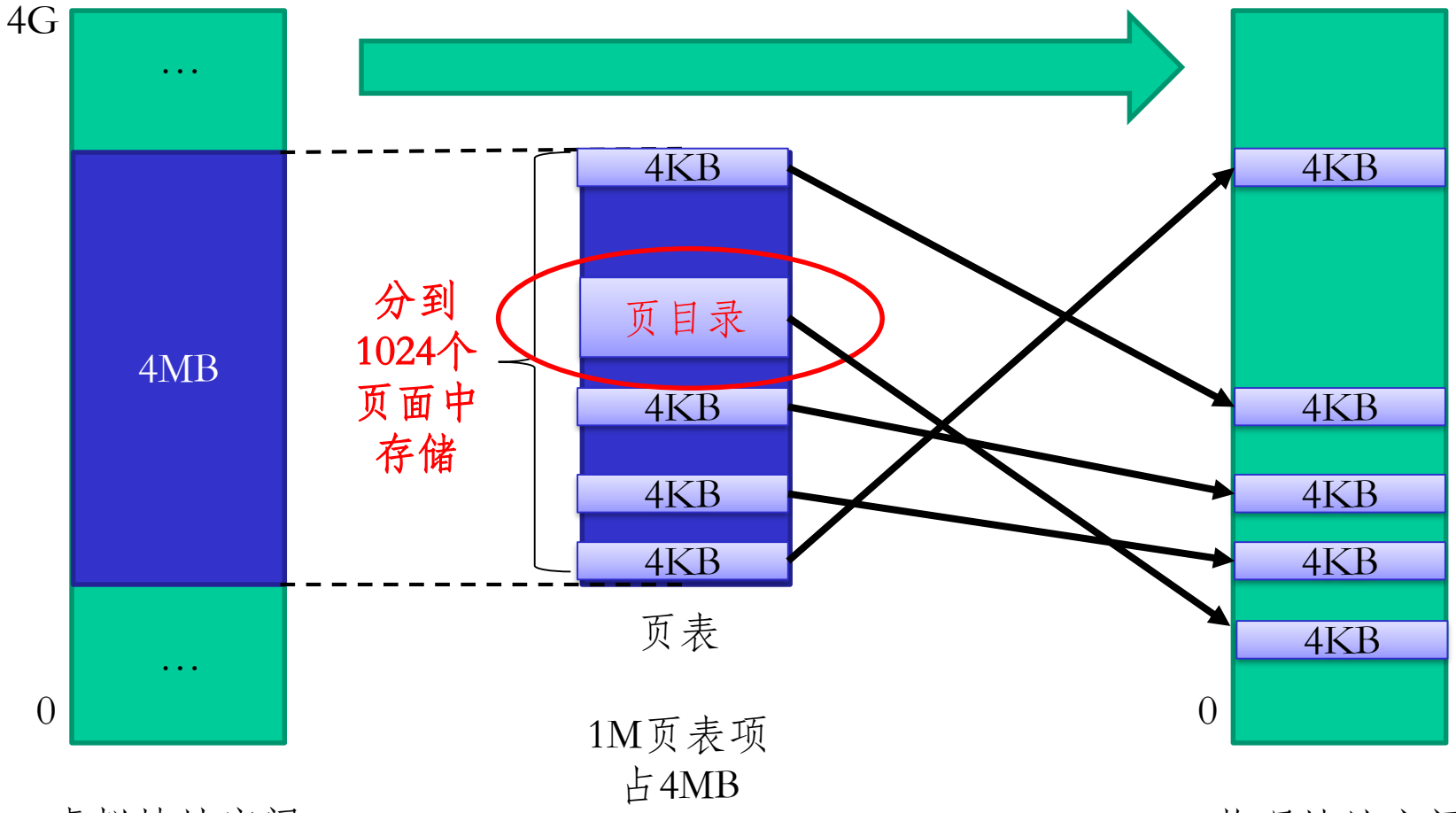
内容提要

- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

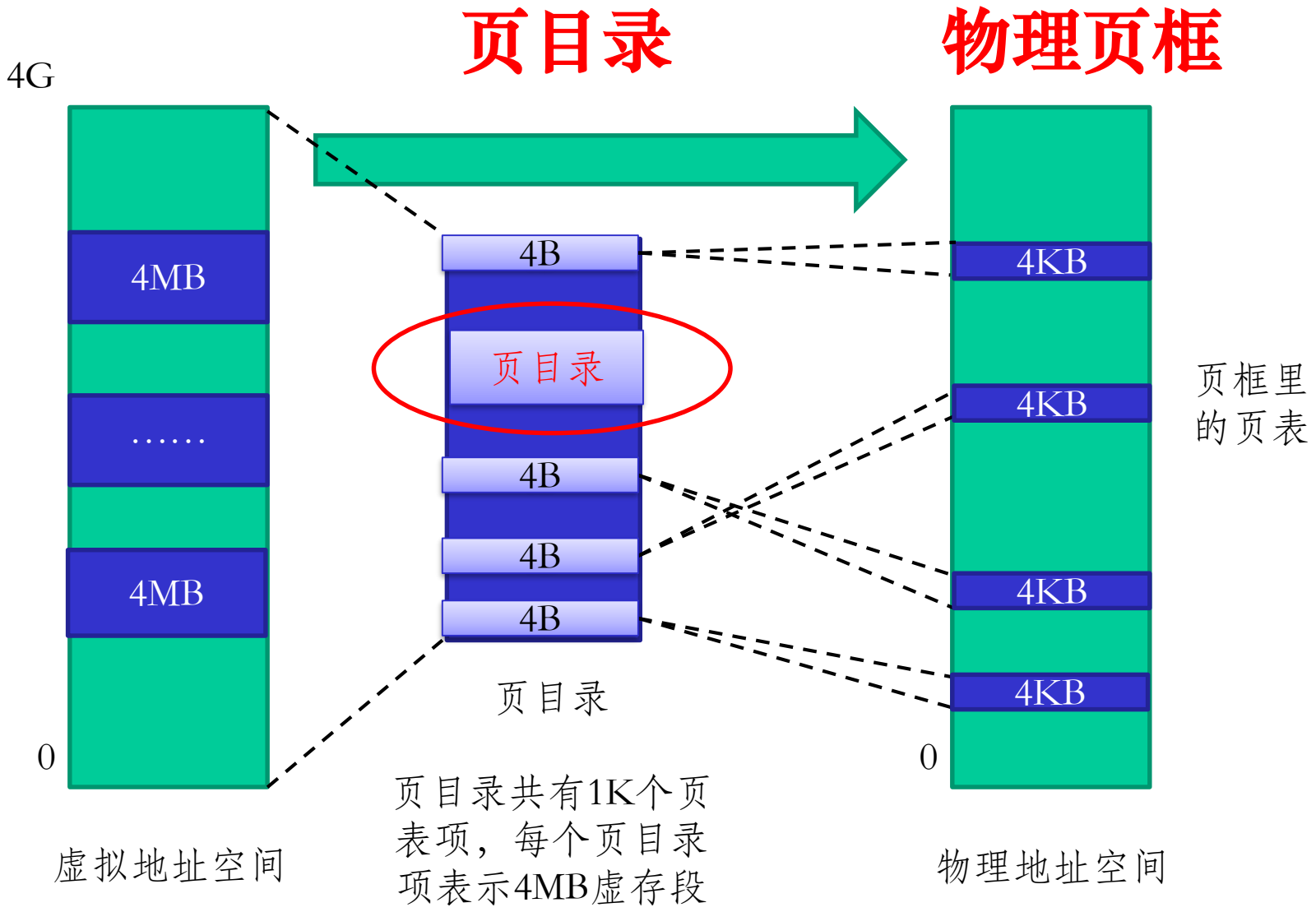
4MB对齐的虚存段可以映射一级页表



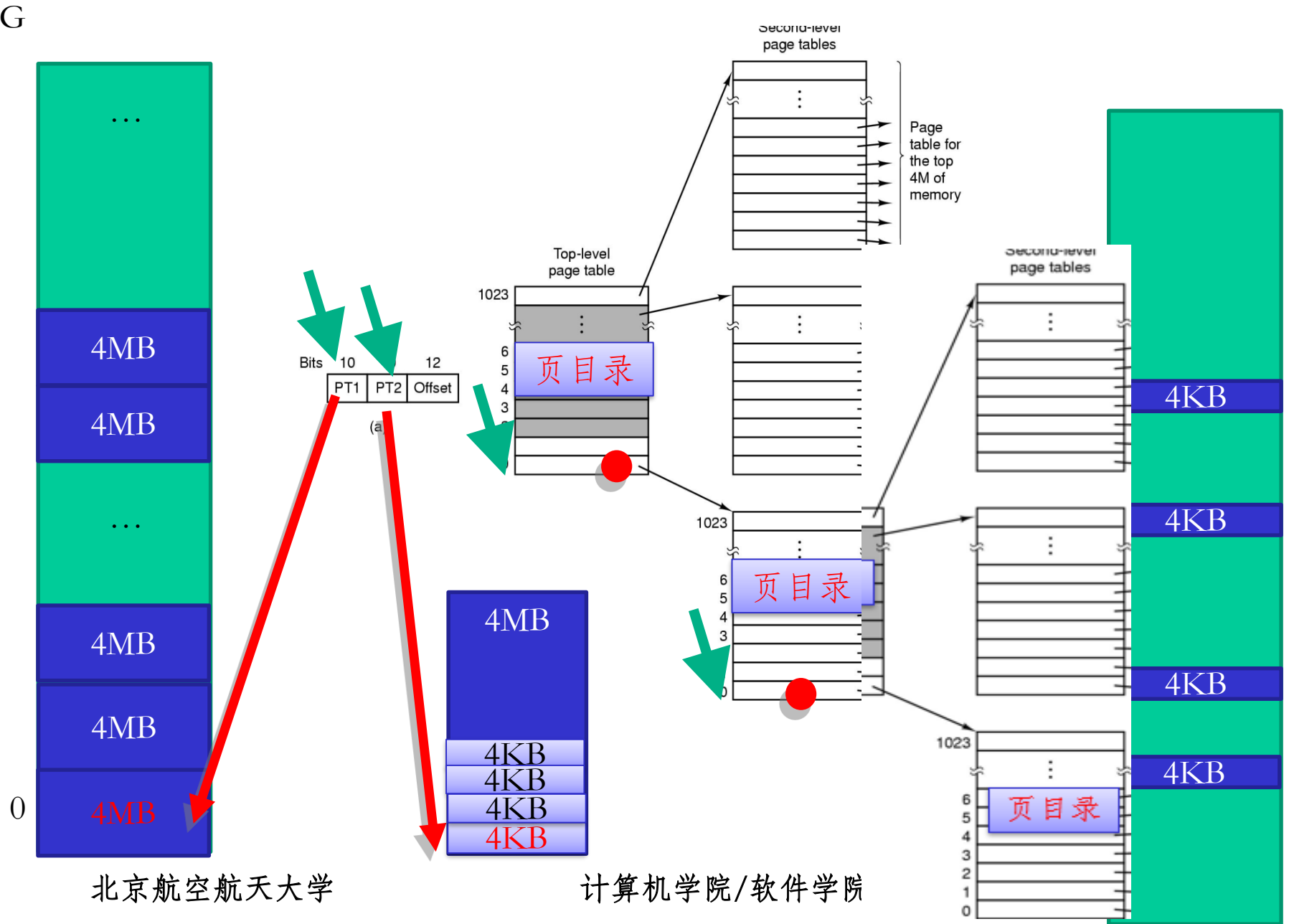
4MB虚存段可映射所有二级页表



用哪个4MB对齐的虚存段?

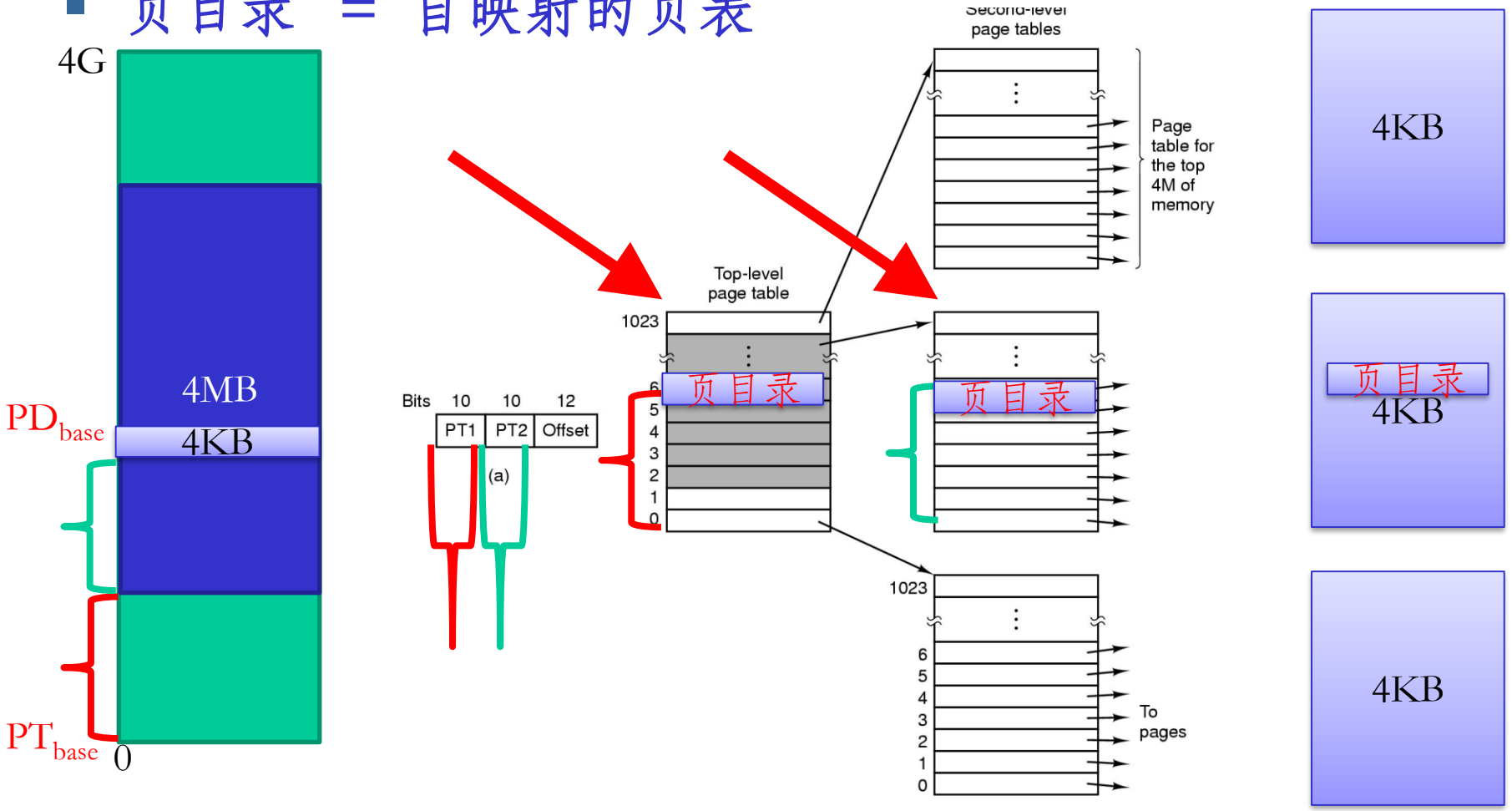


哪个4MB与哪个4KB的关系



PTbase 与 PDbase的关系

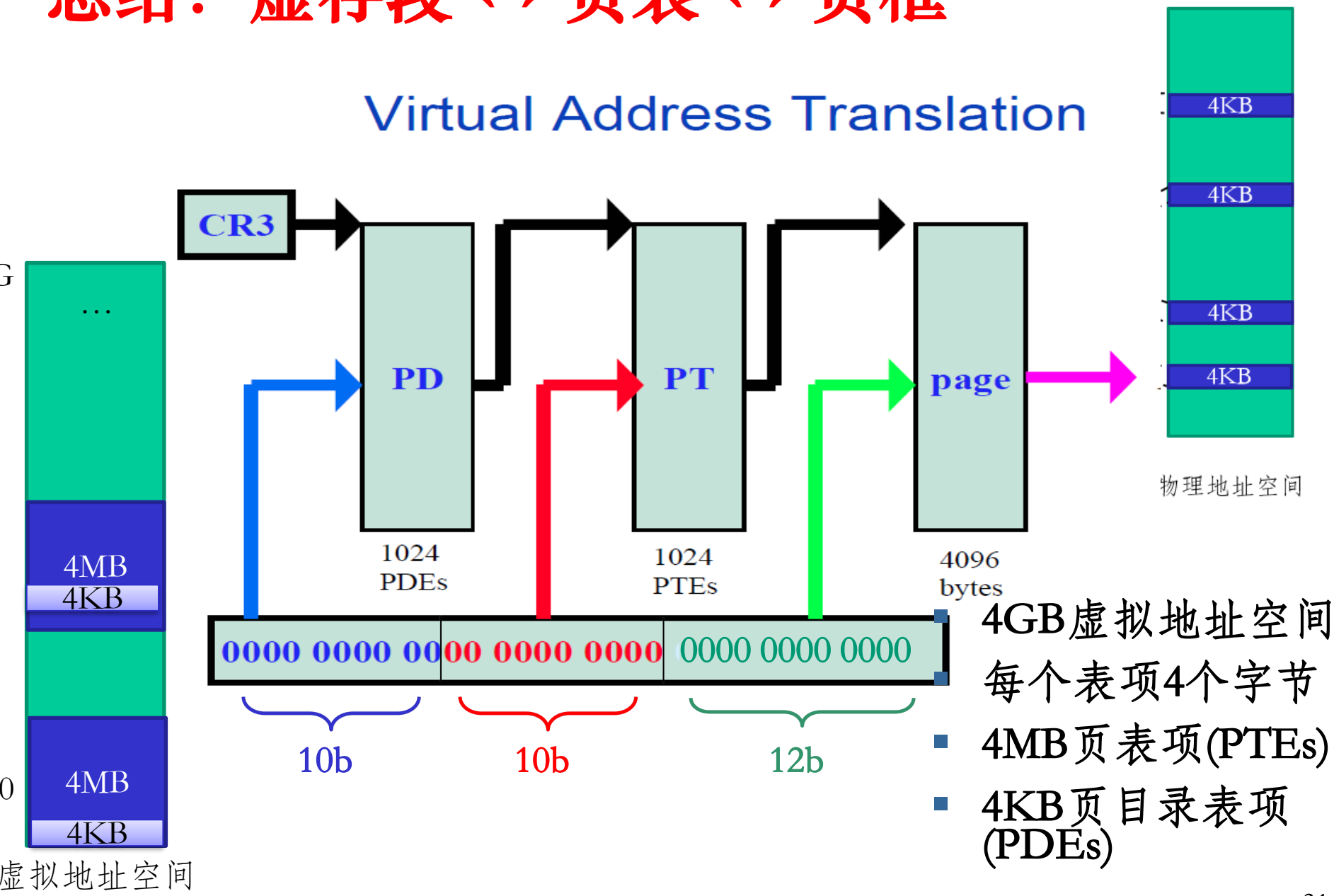
- 选中的4MB在整个虚存的索引 = 对应页目录 自映射项的索引
- 页目录 = 自映射的页表



总结：页目录自映射关键点

- 整个4GB虚拟地址空间中任一个4MB 都行（4MB对齐），OS设计者可规定其所在位置
- 一方面根据页目录的定义：
  - 选中的4MB在整个虚存的索引 = 对应页目录 自映射项的索引
  - 记录这4MB（连续）地址空间到物理地址空间映射关系的，是一个4KB的页目录
- 另一方面根据页表页的定义：
  - 页目录=自映射的页表，表示整个4MB到对应物理页表的映射
  - 记录这4MB（连续）地址空间到物理地址空间映射关系的，是一个4KB的页表页（当然，它属于整个4MB页表的一部分）
  - 所以，页目录和上述页表页内容相同，页目录无需额外分配单独的存储空间

总结：虚存段 ↔ 页表 ↔ 页框



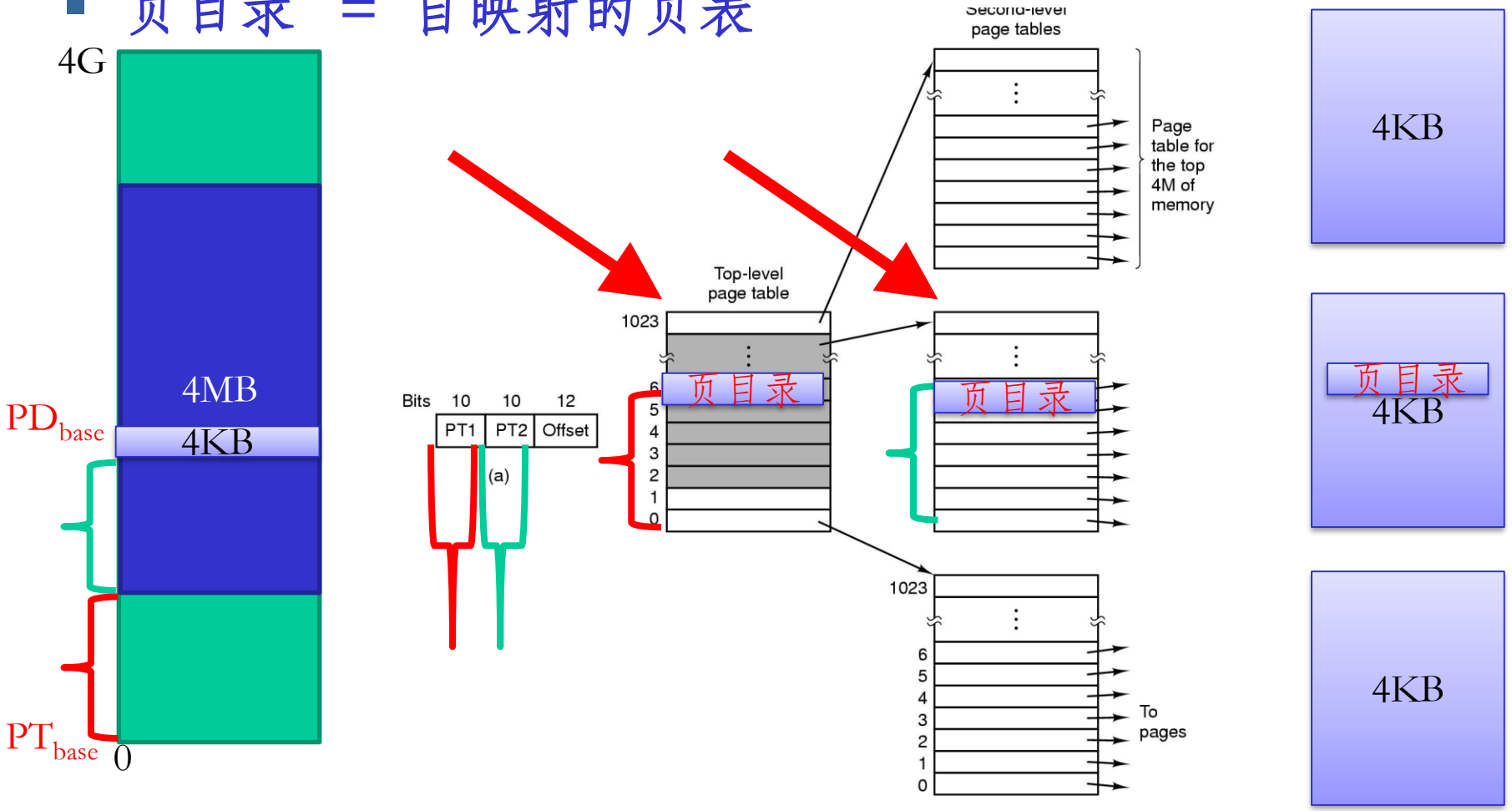
- 4GB虚拟地址空间
- 每个表项4个字节
- 4MB页表项(PTEs)
- 4KB页目录表项(PDEs)

内容提要

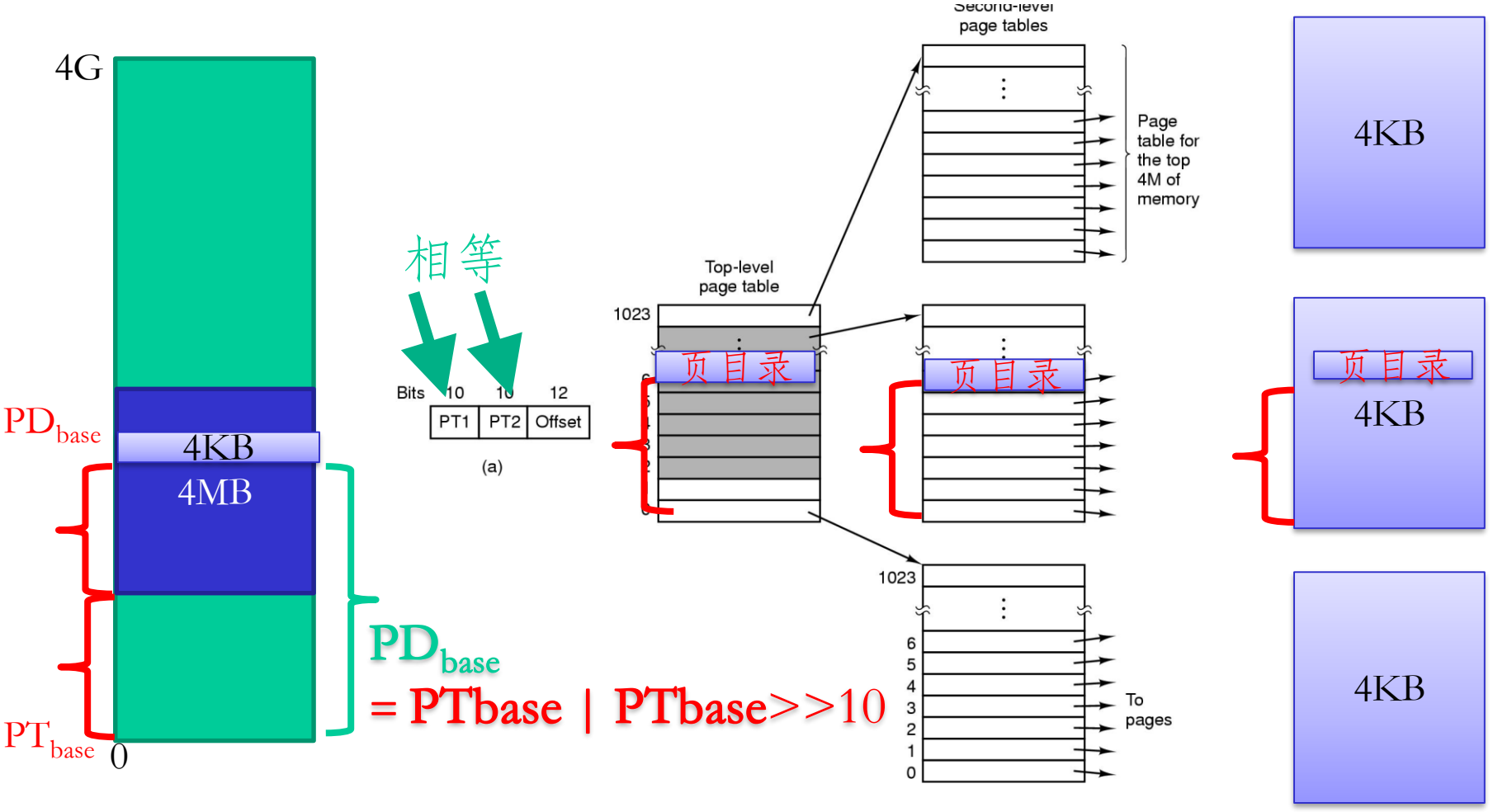
- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

接上节：PTbase 与 PDbase的关系

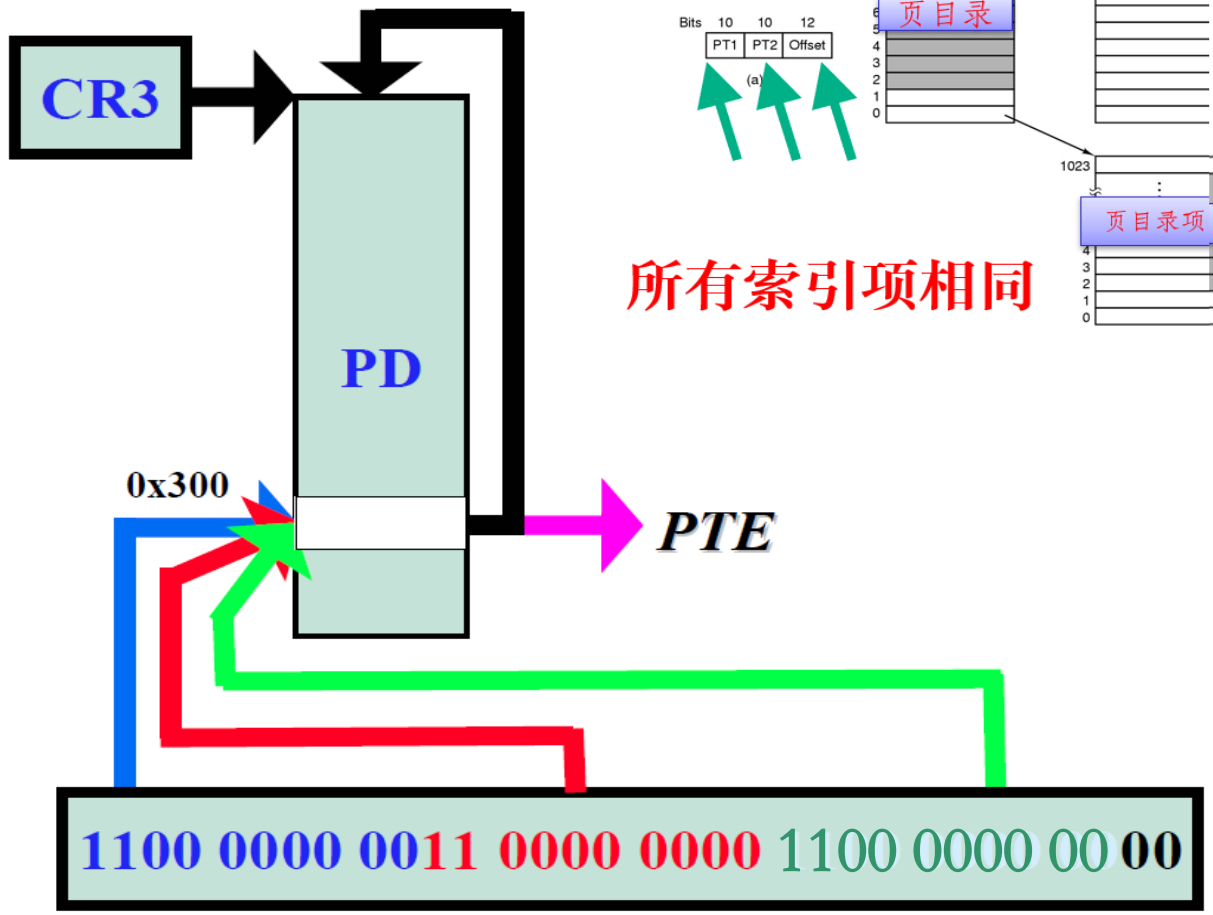
- 选中的4MB在整个虚存的索引 = 对应页目录 自映射项的索引
- 页目录 = 自映射的页表



由PTbase计算出PDbase



$PDE_{self\text{-}mapping}$的作用

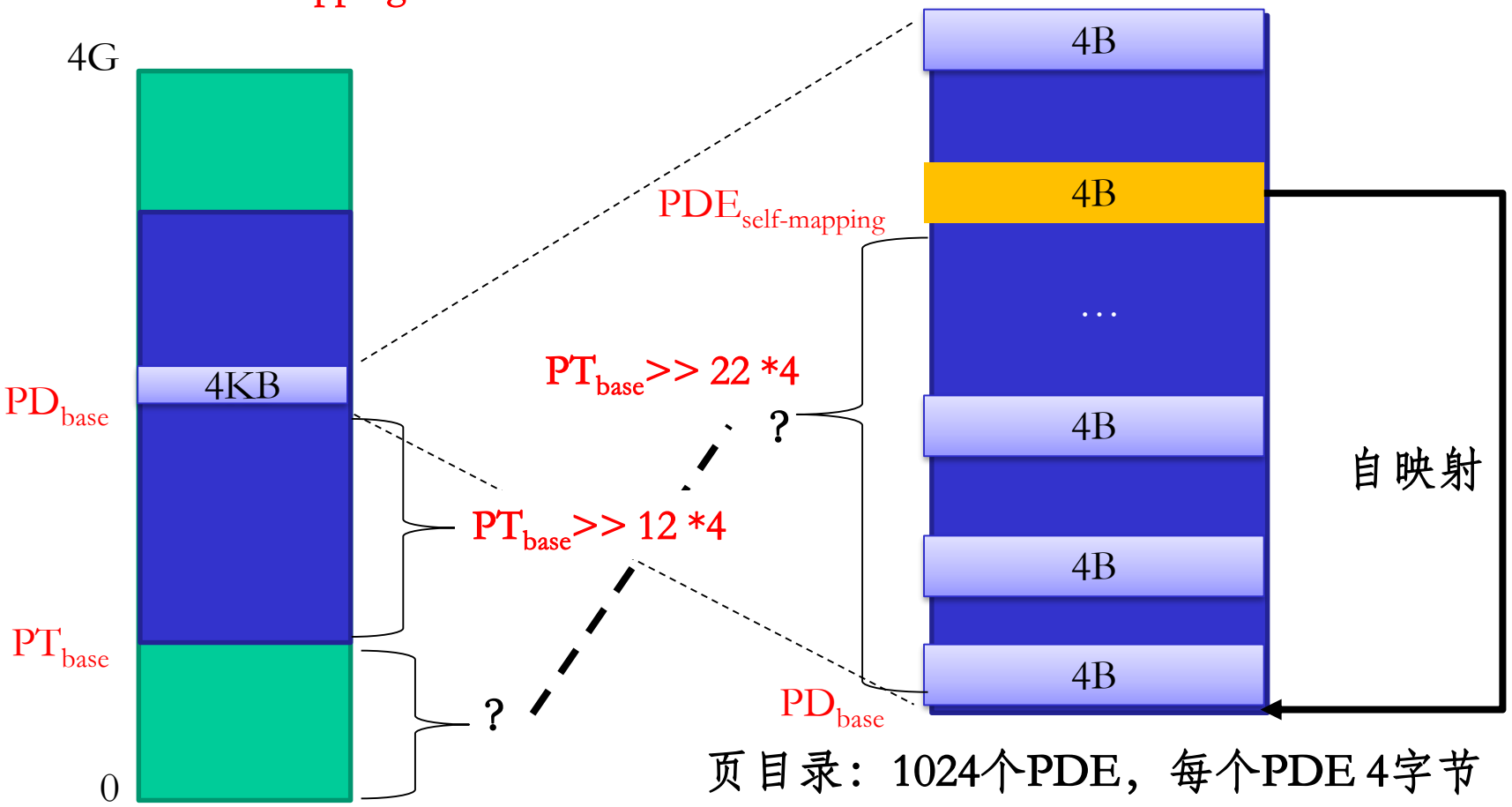


所有索引项相同

$PDE_{self\text{-}mapping}$

$PDE_{self\text{-}mapping}$的计算

- $PDE_{self\text{-}mapping} = PT_{base} | (PT_{base})>>10 | (PT_{base})>>20$



计算方法的说明

1. 给定一个页表基址PT_{base}，该基址需4M对齐，即：

$$PT_{base} = ((PT_{base}) >> 22) << 22;$$

不难看出，PT_{base}的低22位全为0。

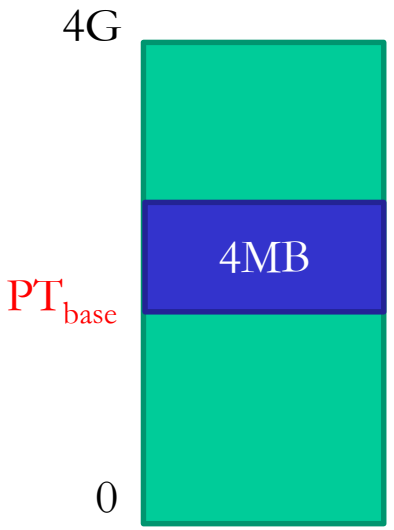
2. 页目录表基址PD_{base}在哪里？

$$PD_{base} = PT_{base} | (PT_{base}) >> 10$$

3. 自映射目录表项$PDE_{self\text{-}mapping}$在哪里？

$$PDE_{self\text{-}mapping} = PT_{base} | (PT_{base}) >> 10 | (PT_{base}) >> 20$$

思考



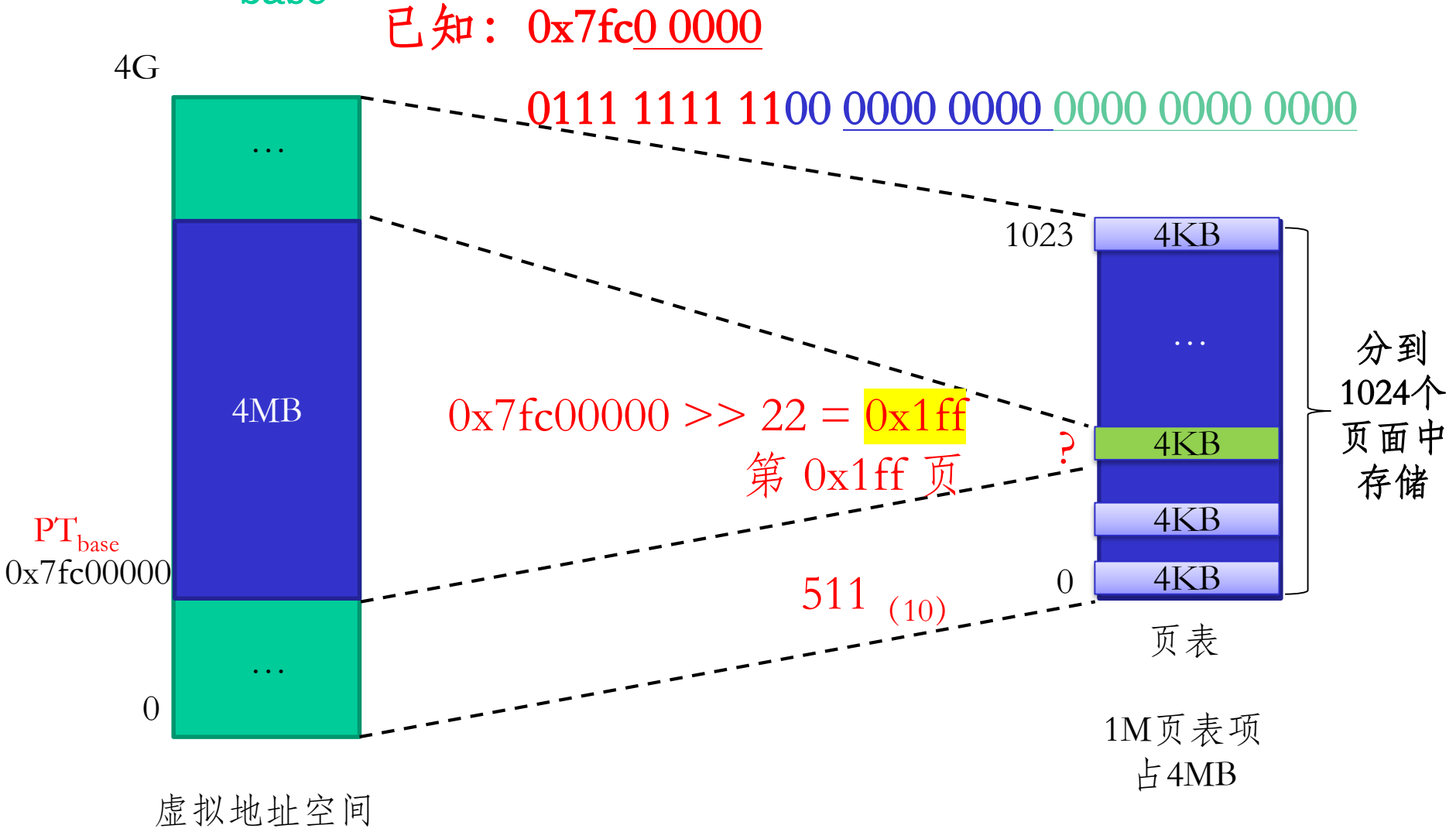
- 是不是一定要4M对齐?
- 如果仅考虑映射关系，不是必须的。
- 采用4M对齐，可使页目录表单独地存在于一个页面（页表）中，从使用方便性的角度，是必须的。
- 采用4M对齐，还可以简化计算，各部分地址可以采取“拼接”的方式。
- 思考：4MB对齐的地址有什么特点？以下哪个地址是4MB对齐的
  - 0x7fc0 0000，0x7fd0 0000，0x8020 0000，0x1000 0000

特别强调

- 只要给定4M对齐的页表基址（虚拟地址），就可以得到所有页表项对应的地址，也就包括页目录表基址和自映射页目录项在页目录表中的位置。因此页目录表基址和自映射页目录项在虚空间中是计算出来的。
- 页表主要供OS使用的，因此页表和页目录表通常放置在OS空间中（如Win的高2G空间）；
- “页目录自映射”的含义是页目录包含在页表当中，是我们采用的映射（或组织）方法的一个特征，是虚拟地址空间内的映射，与虚拟地址到物理地址的映射无关！
- 支持“页目录自映射”可节省4K（虚拟地址）空间

举例1：已知PT_{base}用索引求PD_{base}

已知PT_{base}求页目录索引



用PT_{base}求页目录索引（续）

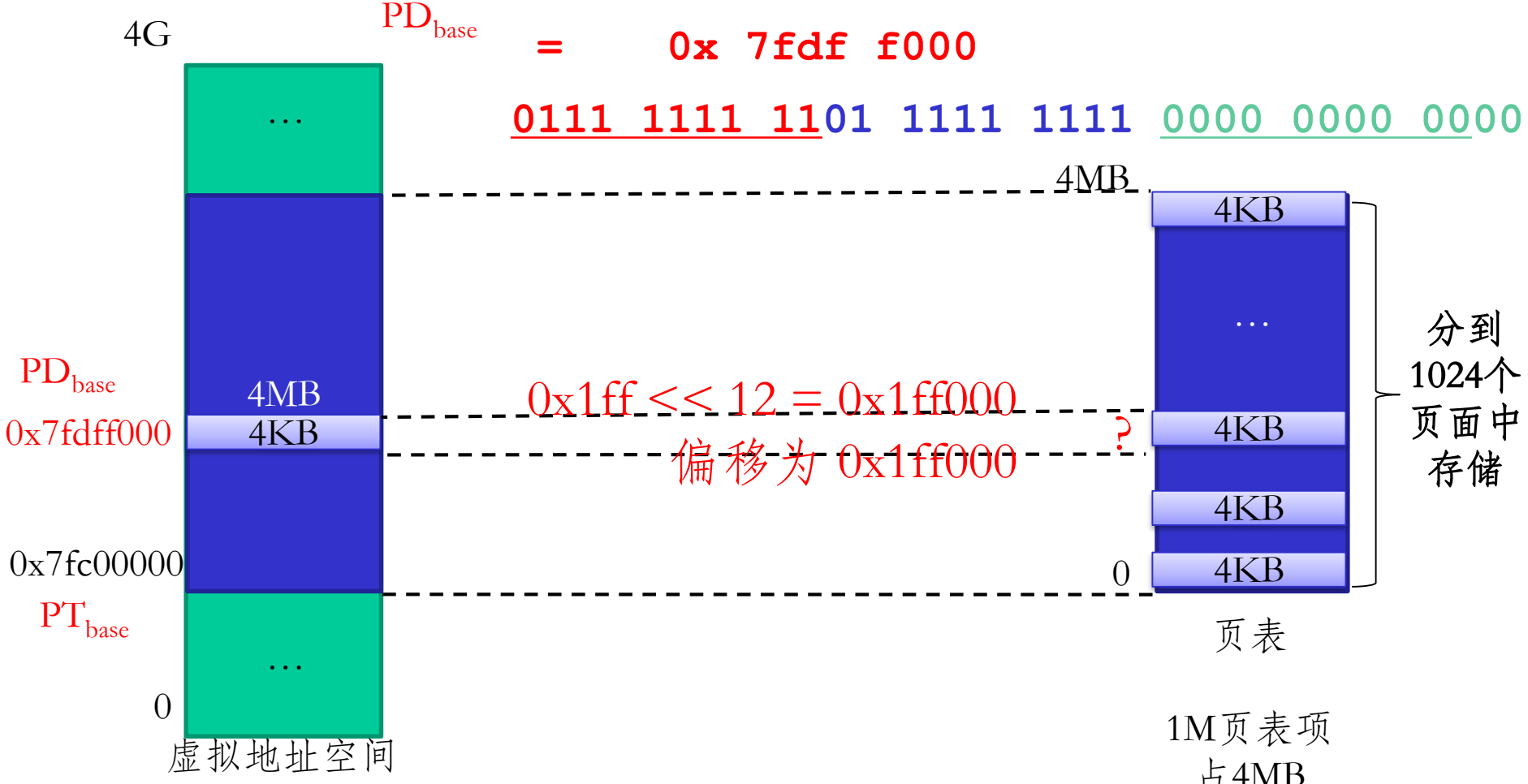
- 给定页表虚拟地址起始位置，例如0x7fc00000
- 可知，从这个地址开始的4MB是存储页表的空间
- 这4MB地址空间是整个4GB地址空间中第（0x7fc00000>>22）个4MB地址空间，因此其逻辑-物理映射关系应该记录在第（0x7fc00000>>22）个页表页中

用PTbase和页目录索引，求PD_{base}

页目录索引=页表索引

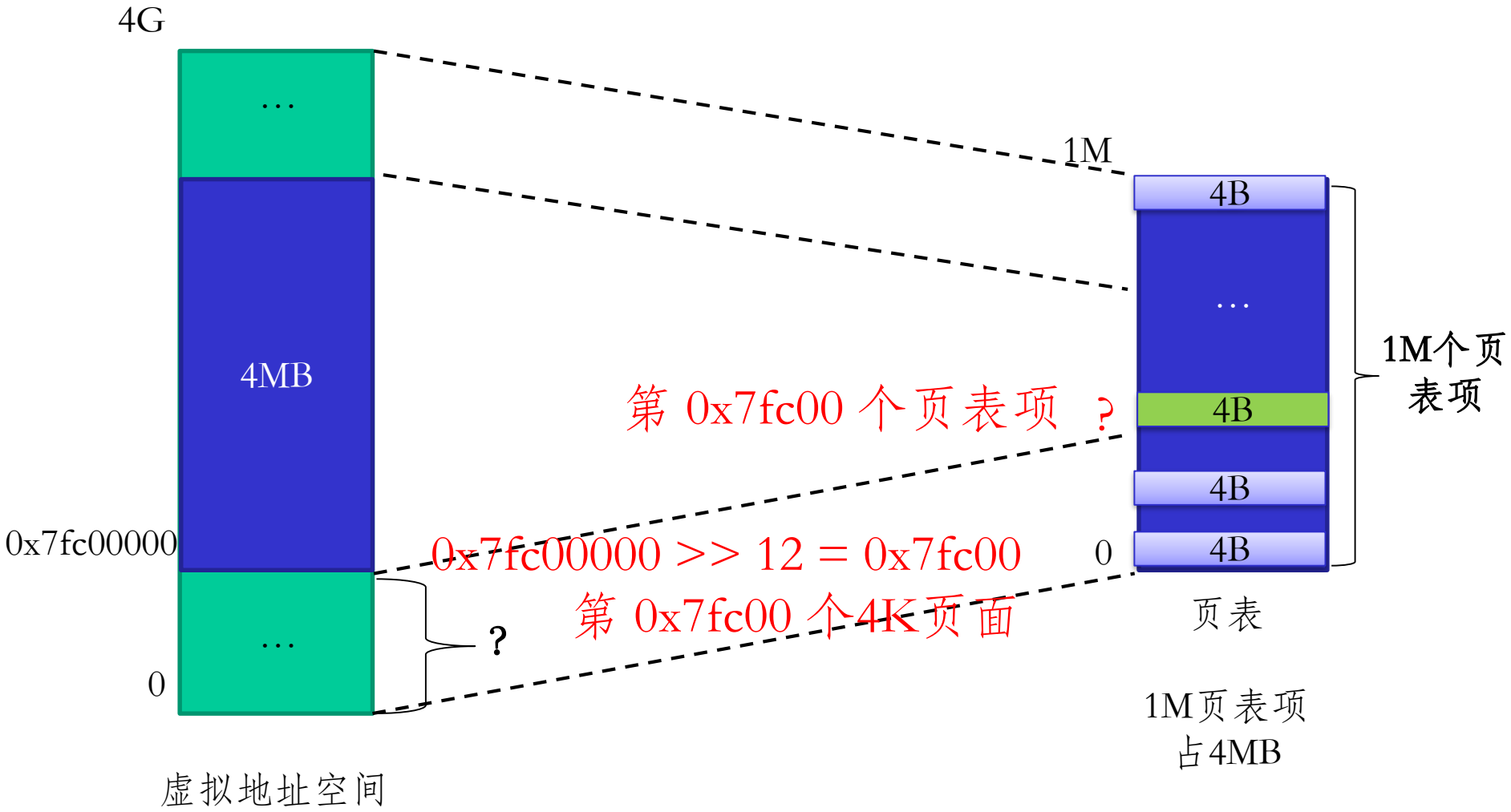
```
  0x 7fc0 0000
+    0x   1f f000
-----------------------------
=    0x 7fdf f000
```

0111 1111 1101 1111 1111 0000 0000 0000

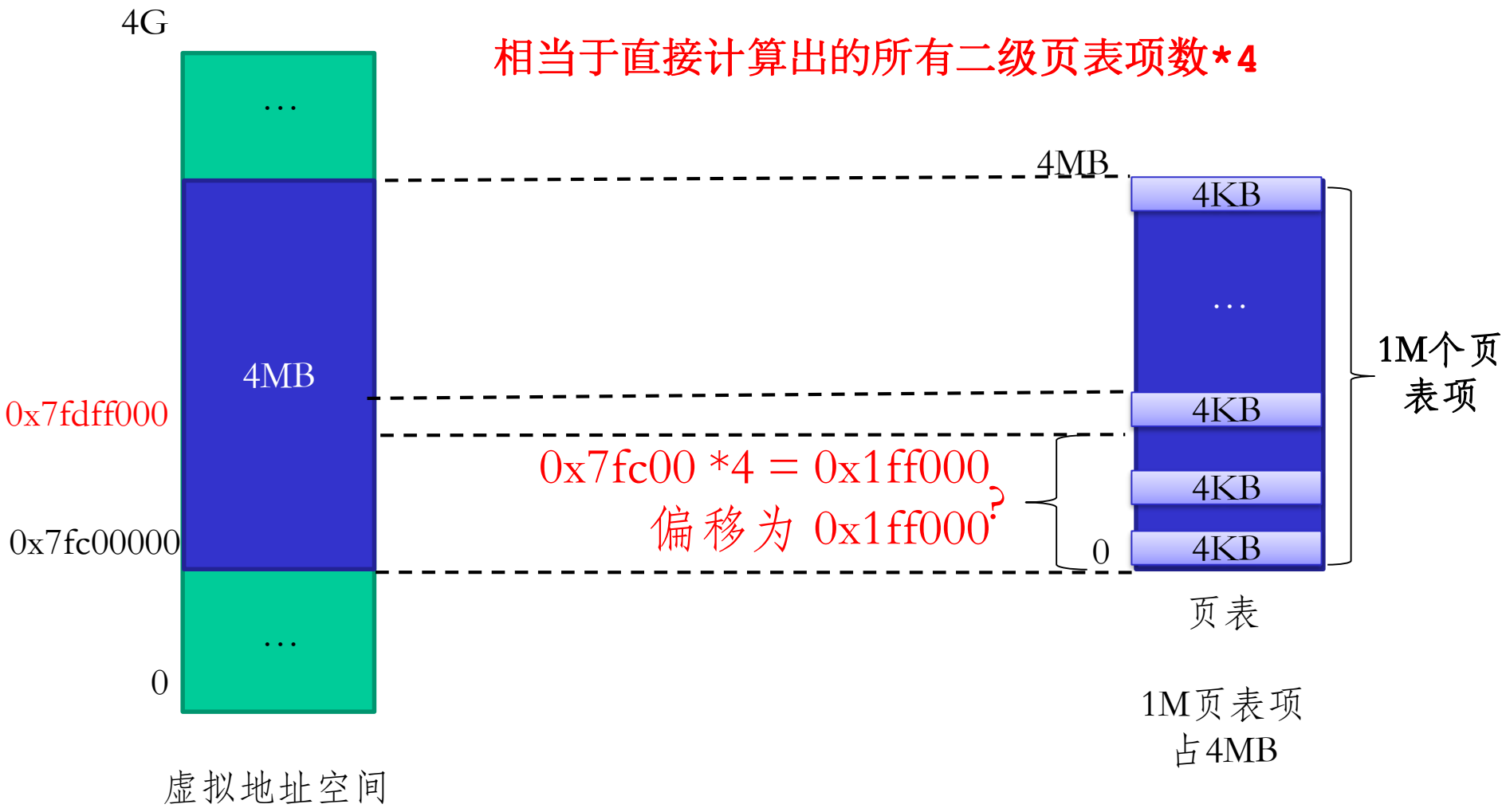


例2：已知PT_{base}用一级页表索引求PD_{base}

已知PT_{base}直接求其在一级页表中的索引



计算出自映射页表所对应的起始虚拟地址



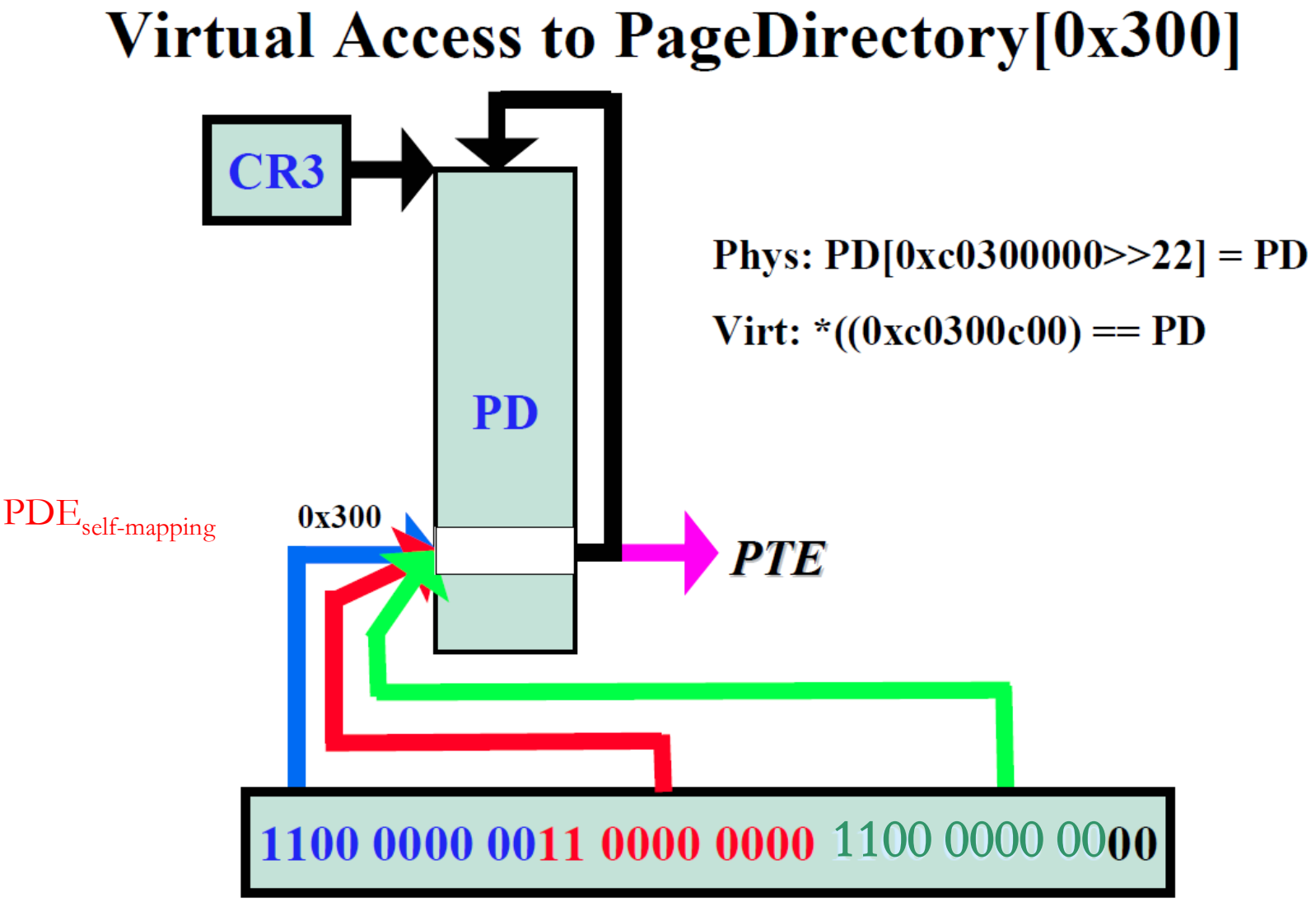
计算出自映射页表所对应的起始虚拟地址

- 计算方式
  - 给定页表虚拟地址起始位置，例如0x7fc00000
  - 将整个4GB地址空间划分为1M个4KB页
  - 上述地址对应于第（0x7fc00000>>12）个4KB页，因此其逻辑-物理映射关系应该记录在第（0x7fc00000>>12）个页表项中
  - 每个页表项4个字节，所以该页表项对于的地址偏移为（0x7fc00000>>12）*4 = 0x1ff000

$PD_{base} \leftrightarrow PT_{base}$

- 简化计算
  - 对于32位地址字长，2级页表，4KB页面大小
  - 给定页表起始地址（虚拟地址，4MB对齐）b
  - 页目录起始地址 = b+(b>>10) = b+b/1024
- 练习：
  - 页表起始地址0x80000000，页目录起始地址=?
  - 0x80000000 + 0x200000 = 0x80200000
- 反过来：如果给定页目录起始地址，求页表起始地址?
  - E.g. 页目录起始地址0xC0300000，页表起始?

Windows的页目录自映射

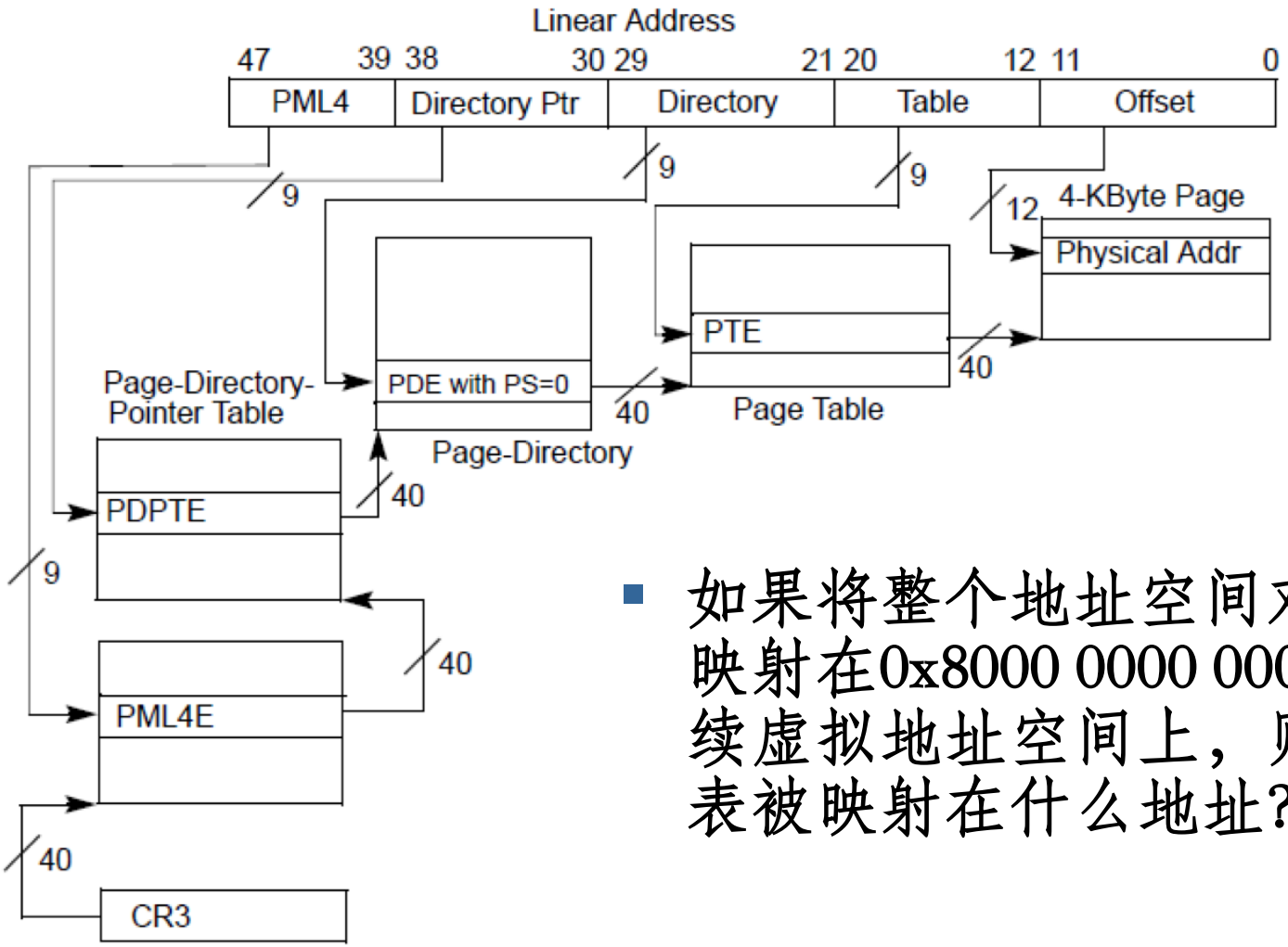


内容提要

- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录

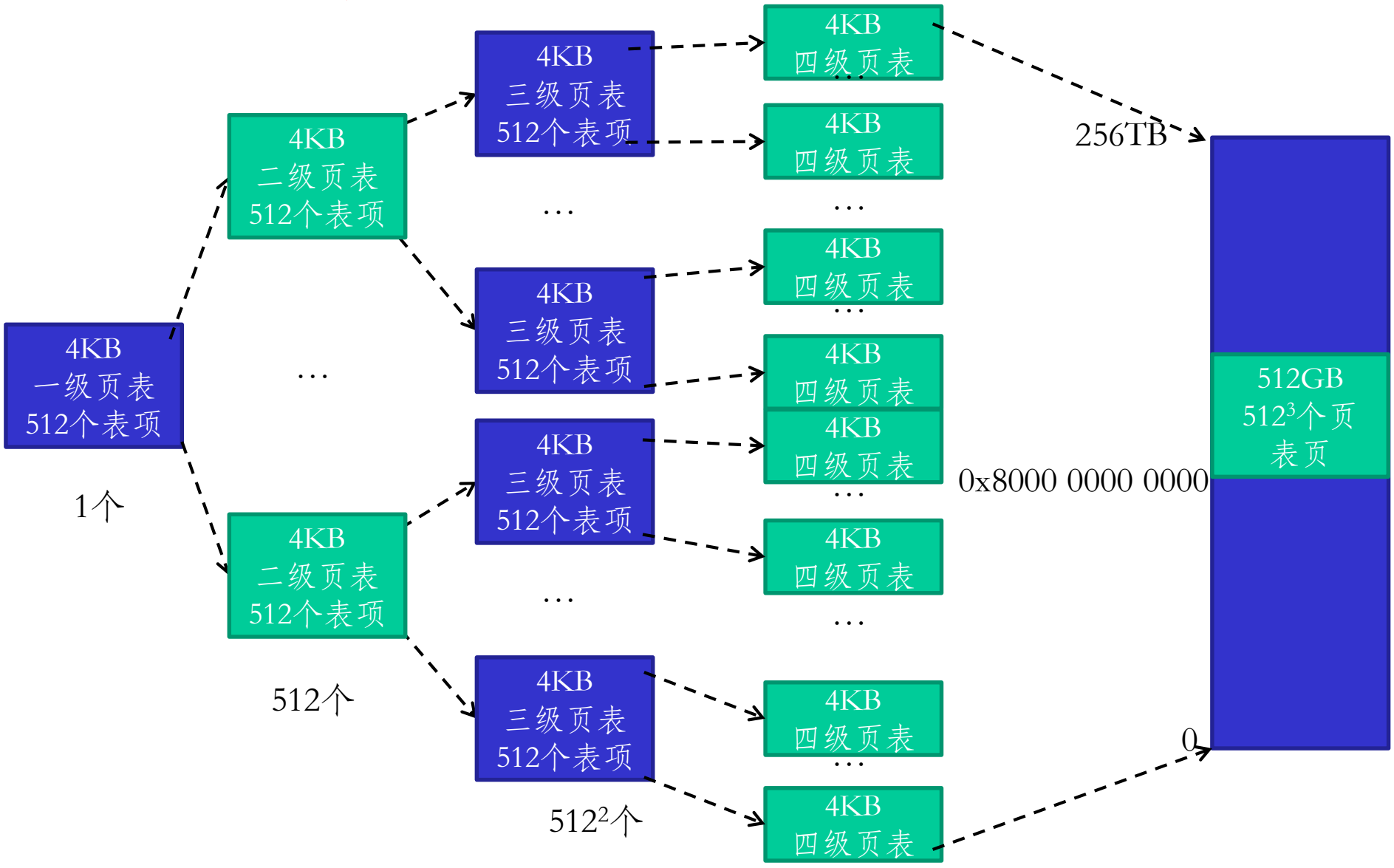
思考：推广到更多级页表情况

- 一个48位页式存储系统，采用4级页表：



- 如果将整个地址空间对应的页表映射在0x8000 0000 0000起始的连续虚拟地址空间上，则第一级页表被映射在什么地址？

思考：推广到更多级页表情况



思考：推广到更多级页表情况

- 整个地址空间大小：256 TB = 2^{48} B
- 页大小4KB，每个页表项占8字节
- 页表数量：共有1个一级页表，512个二级页表，512^2个三级页表，512^3个四级页表
- 512^3个四级页表映射在整个地址空间中一段连续的512GB地址空间上，起始地址是0x8000 0000 0000
- 实际上，512^2个三级页表也是连续的，是四级页表的一个子集；512个二级页表也是连续的，是三级页表的一个子集（当然也是整个四级页表的子集）；1个一级页表是上述二级页表的子集（当然最终也是整个四级页表的子集）。也就是说，那个一级页表是整个512^3个四级页表中的一个。问题是：是哪个？

思考：推广到更多级页表情况

- 因为：页表映射起始地址是0x8000 0000 0000

```
      0x 8000 0000 0000      x
+     0x   40 0000 0000      x >> 9
+     0x       2000 0000     x >> 18
+     0x         10 0000     x >> 27
-----------------------------------
=     0x 8040 2010 0000      页目录基址
```

内容提要

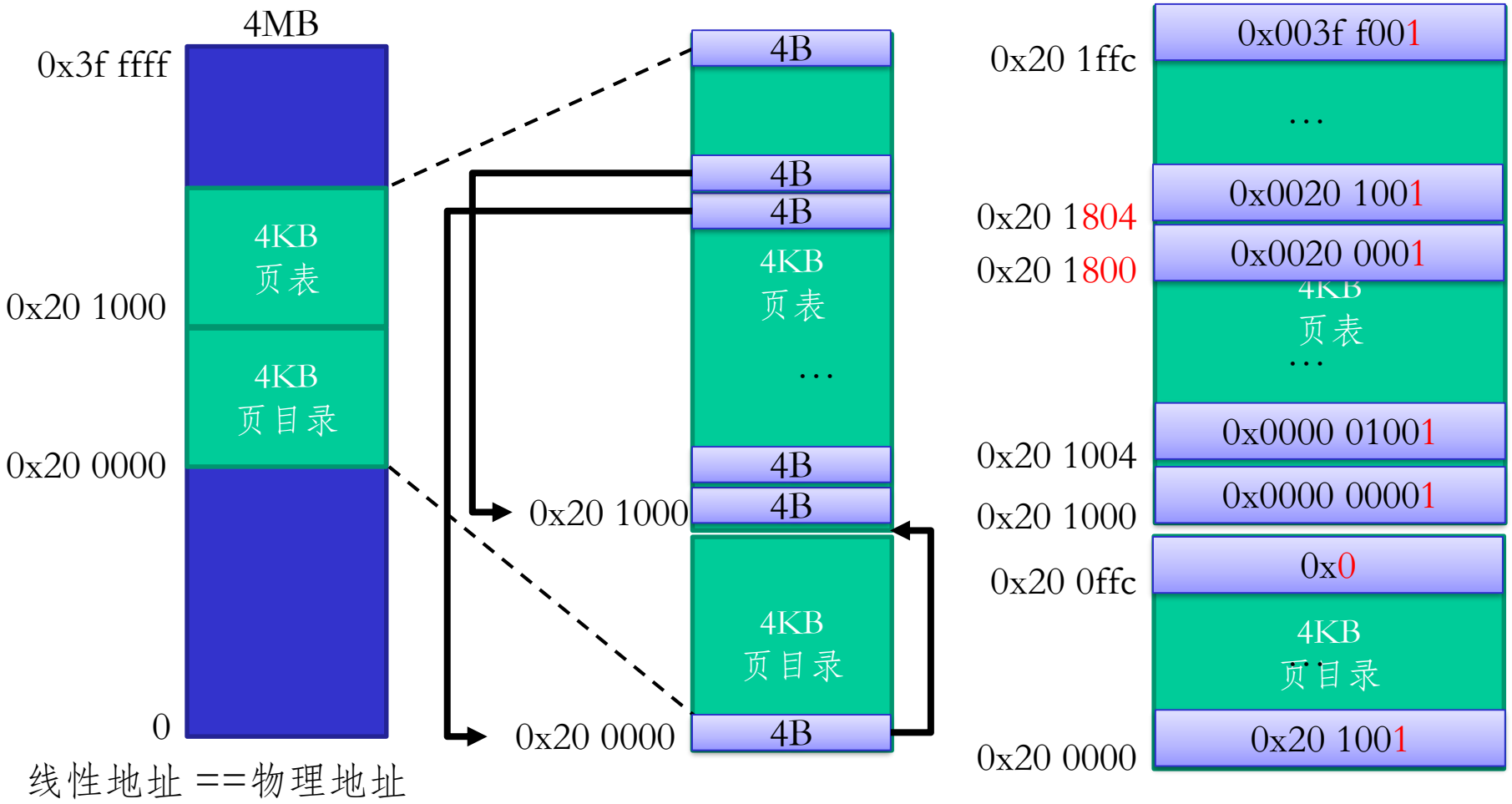
- 3.1 内存管理基础
- 3.2 页式内存管理
- 3.3 段式内存管理
- 3.4 虚拟内存管理
- 3.5 内存管理实例
- 3.6 页目录自映射
  - 页式内存管理的回顾
  - 什么是页目录自映射
  - PTbase和PDbase的关系
  - 页目录自映射的实现
  - 扩展到多级页目录
  - X86初始系统页的建立

X86初始系统页表建立

- X86 CPU引导时处于 实 模式
  - 开启分页（Enable Paging）前，CPU使用物理地址寻址
- 进入保护模式后，可以开启分页
  - 此时CPU将开始使用线性地址寻址。线性地址需要由MMU根据页表翻译成物理地址。
- 问题：怎么实现切换?
- 一个思路：事先构造页表，初始化一部分线性地址空间，使得该空间内的虚拟地址等于物理地址。
  - 例如虚拟地址0x0000 0000～ 0x0040 0000（4MB）直接映射到物理地址0x0000 0000～ 0x0040 0000 （4MB）
  - 页表怎么构造?

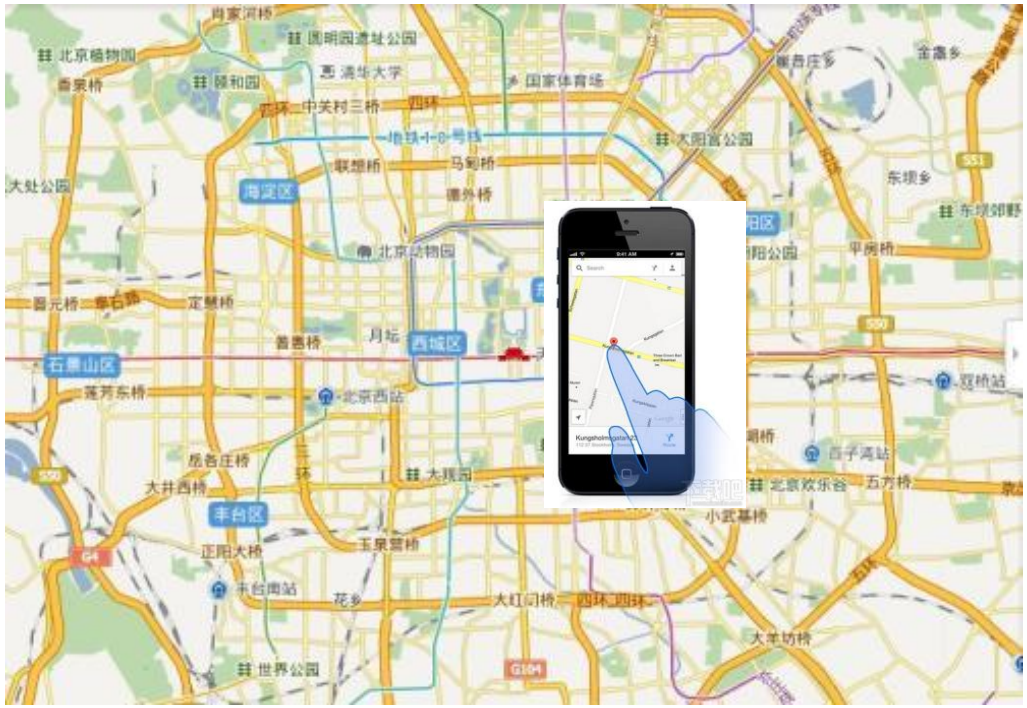
X86初始系统页表建立

- 在0x20 0000地址处分配2个4K页面，存储页目录和页表。启用分页后，如下页表保证线性地址 == 物理地址 （4MB以内）



自映射的数学意义

- 地图的比喻
  - 手持北京地图在北京
  - 必有地图上一点与其表示的地理位置与该点的实际地理位置重合



- 不动点：f(x) = x
  - 压缩映像


2025第8次课堂小测试