程序的机器级表示IV: 数据

教师：郑贵滨
计算机科学与技术学院
哈尔滨工业大学

主要内容

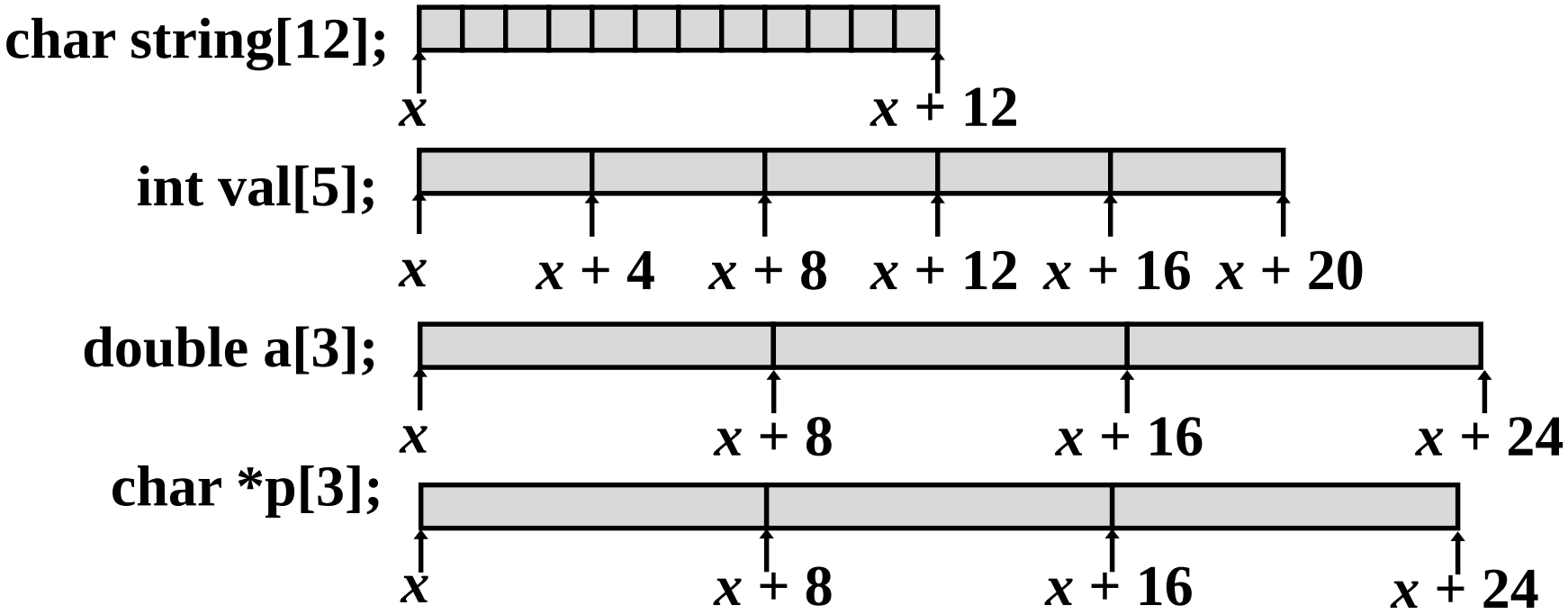
- 数组
  - 一维
  - 多维(嵌套)
  - 多层次
- 结构体
  - 内存分配
  - 访问
  - 对齐
- 浮点数

数组的内存分配

- 基本准则

  T `A[`*L*`];`

  - 数据类型*T*、长度 *L*的数组
  - 在内存中连续分配的*L* * `sizeof`(*T*) 字节

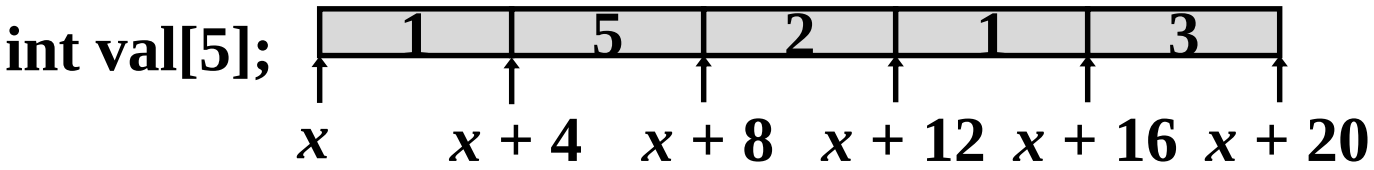


数组的访问

- 基本准则

  T **A**[*L*];

  - 数据类型*T* 、长度 *L*的数组
  - 标识符 **A** 可作为数组元素0的指针(常量): Type *T**

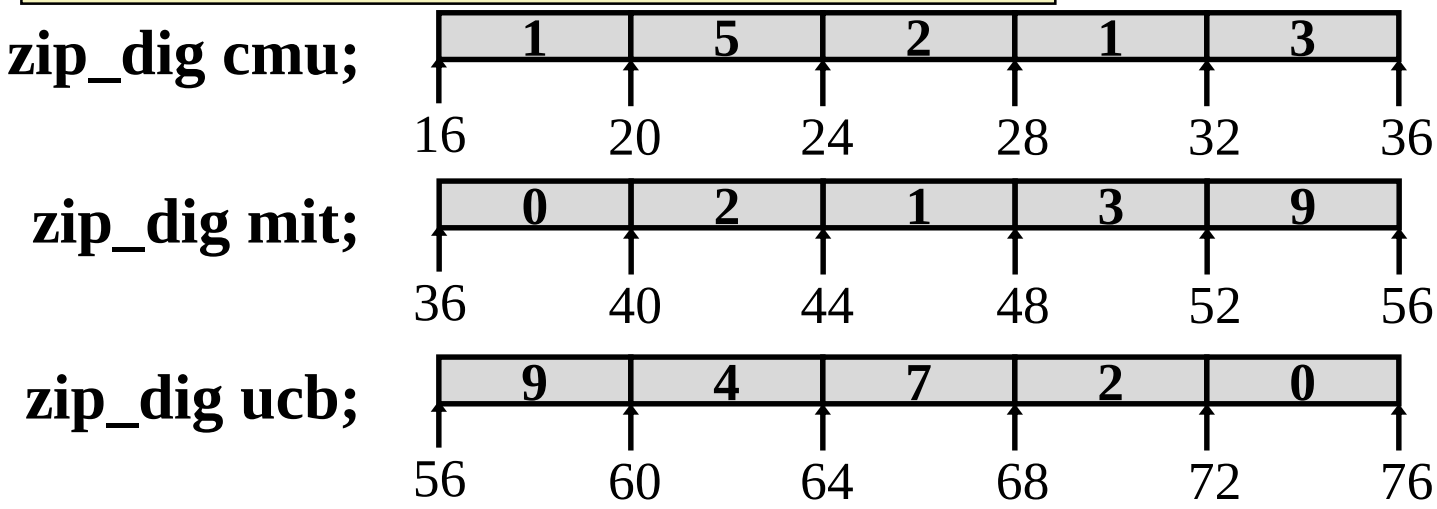


  - 引用形式　类型　数值

val[4]	**int**	3
val	**int ***	*x*
val+1	**int ***	*x* + 4
&val[2]	**int ***	*x* + 8
val[5]	**int**	??
***(val+1)**	**int**	5
val + *i*	**int ***	*x* + 4 *i*

数组例子

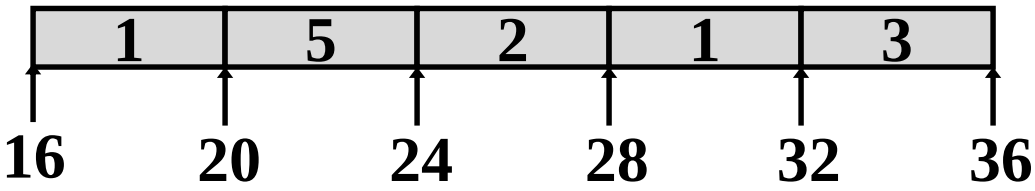
```
#define ZLEN 5
typedef   int    zip_dig[ZLEN];
zip_dig   cmu = { 1, 5, 2, 1, 3 };
zip_dig   mit = { 0, 2, 1, 3, 9 };
zip_dig   ucb = { 9, 4, 7, 2, 0 };
```



- 声明 “zip_dig cmu” 等价于 “int cmu[5]”
- 示例数组申请20个连续的内存字节(sizeof(cmu) or sizeof(zip_dig)), (超大数组不能保证一定如此)

数组访问例子

zip_dig cmu;




```
int get_digit(zip_dig z, int digit)
{
  return z[digit];
}
```

IA32

```
  # %rdi = z
  # %rsi = digit
movl (%rdi,%rsi,4), %eax  # z[digit]
```

- 寄存器 `%rdi` 保存数组的起始地址
- 寄存器 `%rsi` 保存数组元素的下标(索引)
- 期望的数据地址：`%rdi + 4*%rsi`
- 内存寻址形式 `(%rdi,%rsi,4)`

数组和循环的例子

```
void zincr(zip_dig z) {
  size_t i;
  for (i = 0; i < ZLEN; i++)
    z[i]++;
}
```

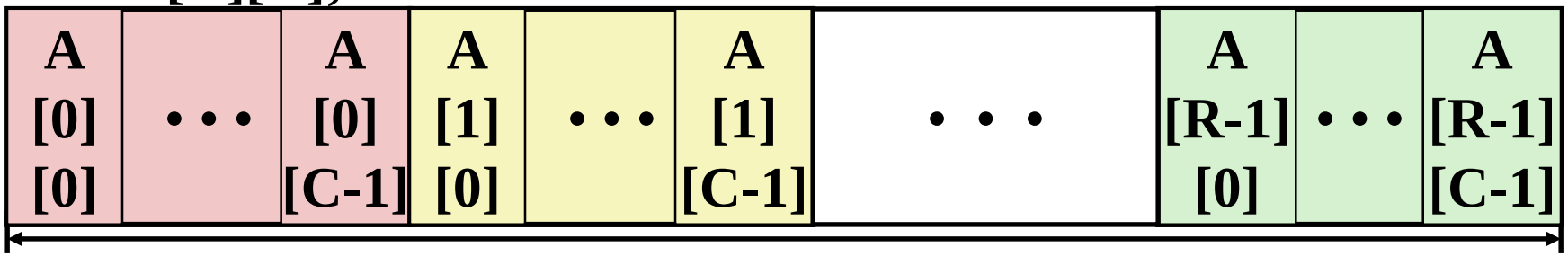
```
  # %rdi = z
  movl    $0, %eax          #   i = 0
  jmp     .L3               #   goto middle
.L4:                        # loop:
  addl    $1, (%rdi,%rax,4) #   z[i]++
  addq    $1, %rax          #   i++
.L3:                        # middle
  cmpq    $4, %rax          #   i:4
  jbe     .L4               #   if <=, goto loop
  rep; ret
```

多维(嵌套) 数组

- 声明
  - ***T A[R][C];***
    - 数据类型*T*的两维数组
    - *R* 行, *C* 列
    - 元素类型 *T*, *K* 字节
- 数组尺寸、sizeof(A)
  - ***R*C*K*** 字节
- 存储：行优先排列

$$\begin{bmatrix} A[0][0] & \cdots & A[0][C-1] \\ \vdots & & \vdots \\ A[R-1][0] & \cdots & A[R-1][C-1] \end{bmatrix}$$

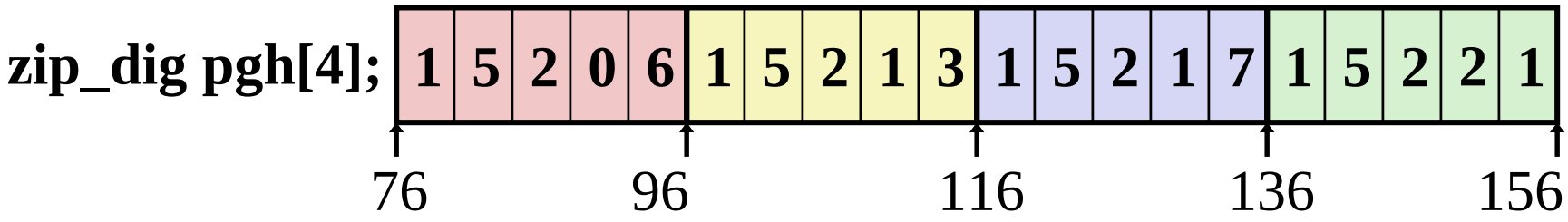
int A[R][C];



嵌套数组例子

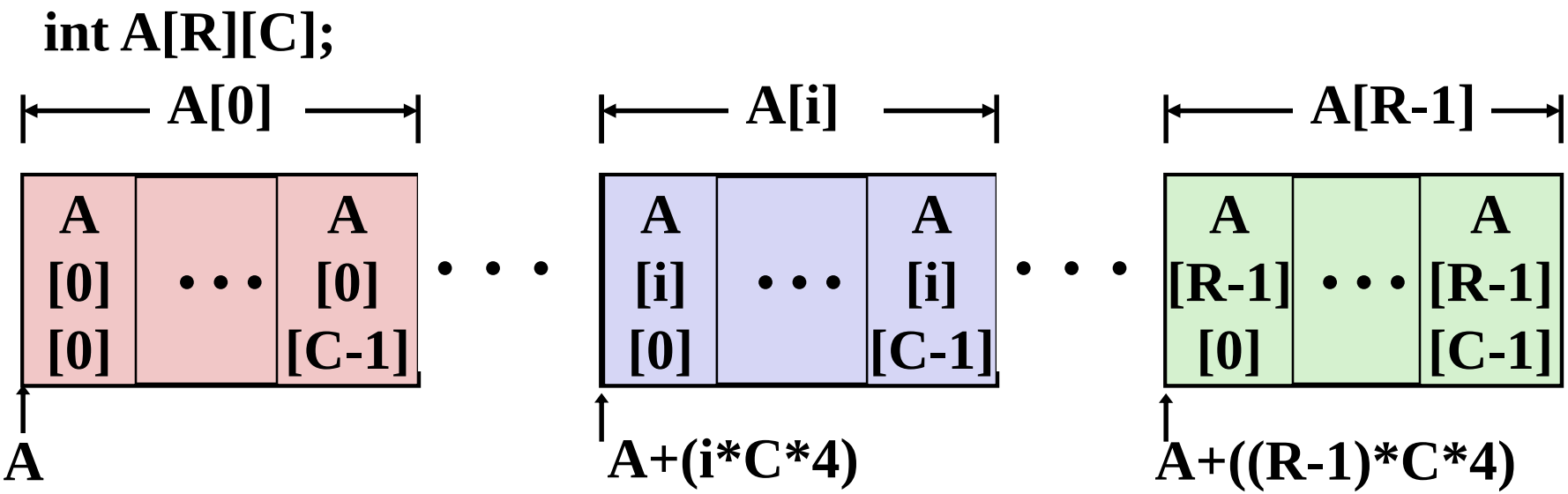
```
#define PCOUNT 4
zip_dig pgh[PCOUNT] =
  {{1, 5, 2, 0, 6},
   {1, 5, 2, 1, 3 },
   {1, 5, 2, 1, 7 },
   {1, 5, 2, 2, 1 }};
```

- “`zip_dig pgh[4]`”等价于“`int pgh[4][5]`”
  - 变量pgh: 有4元素的数组, 占用连续内存
  - 每个元素是一个有5个整数的数组，占用连续内存
- 内存排列：行优先
- 若pgh的起始地位为76，则：

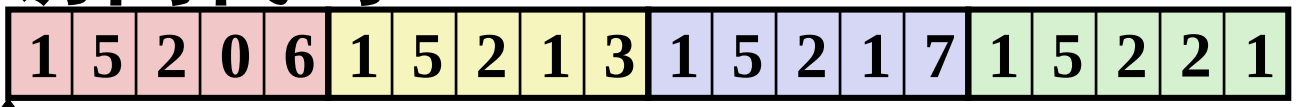


嵌套数组行访问

- 行向量
  - `A[i]` 是*C*个元素的数组
  - 类型*T*的每个元素需要*K*个字节
  - 起始地址 `A` + *i* * (*C* * *K*)



嵌套数组行访问代码



- 行向量 pgh
  - `pgh[index]`：是有5个整数的一维数组
  - 起始地址 `pgh+20*index`

```
int *get_pgh_zip(int index)
{  return pgh[index];}
```

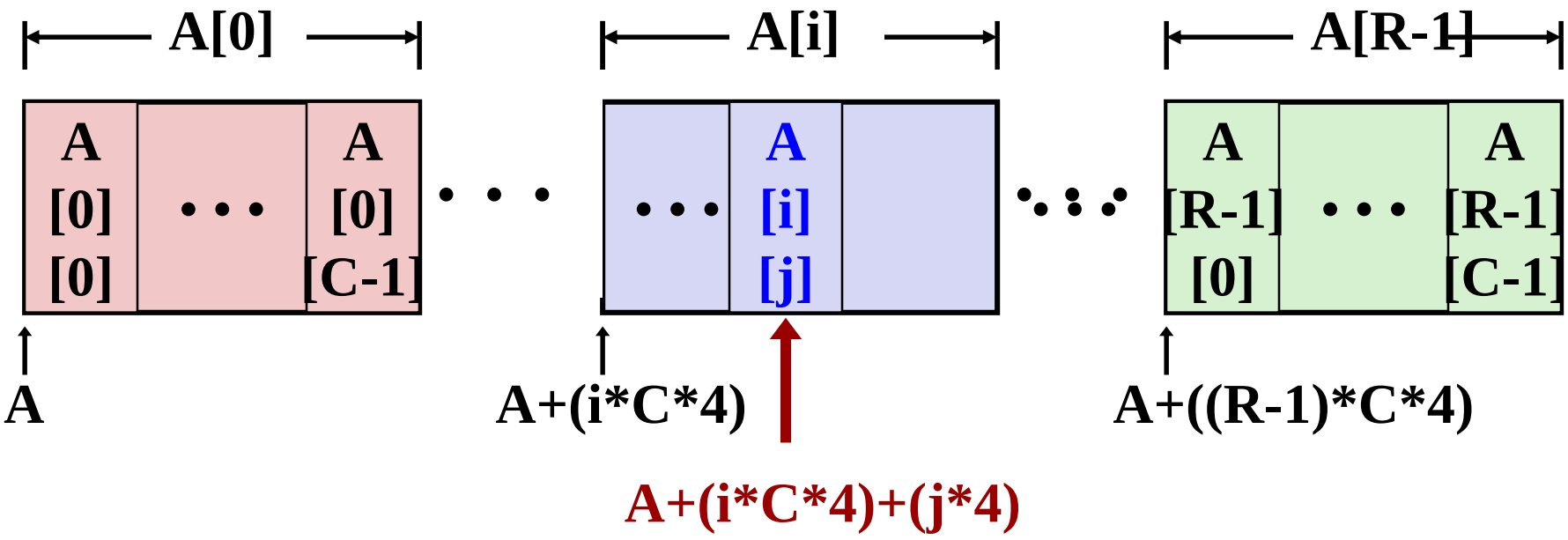
```
# %rdi = index
  leaq (%rdi,%rdi,4),%rax          # 5 * index
  leaq pgh(,%rax,4),%rax  # pgh + (20 * index)
```

- 机器代码
  - 计算和返回地址: `pgh + 4*(index+4*index)`

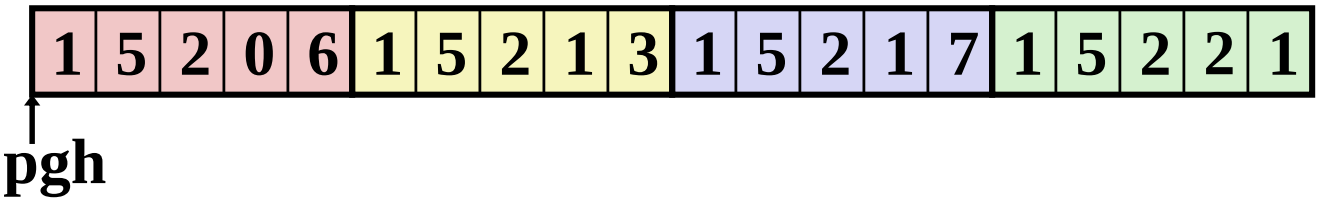
嵌套数组元素访问

- 数组元素
  - `A[i][j]` 类型为*T*的元素, 需要*K*个字节
  - 地址: **A + i * (C * K) + j * K = A + (i * C + j)* K**

int A[R][C];



嵌套数组元素访问代码




```
int get_pgh_digit(int index, int dig)
{  return pgh[index][dig]; }
```

```
leaq    (%rdi,%rdi,4), %rax   # 5*index
addl    %rax, %rsi            # 5*index+dig
movl    pgh(,%rsi,4), %eax    # M[pgh + 4*(5*index+dig)]
```

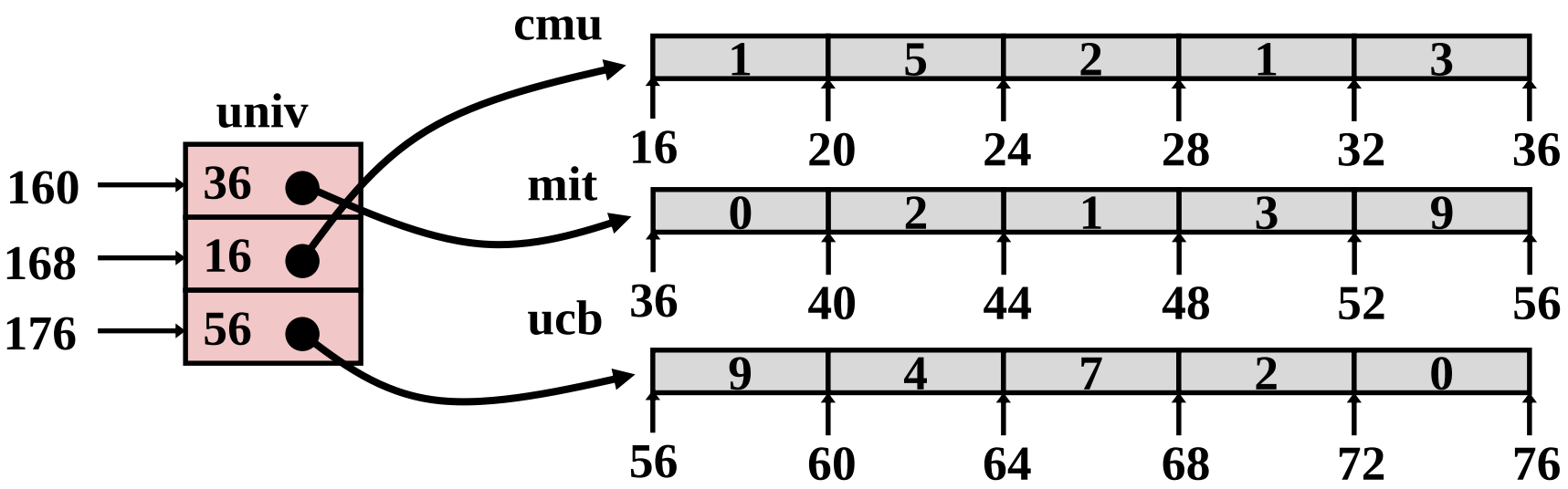
- 数组元素
  - pgh[index][dig] 是 int型
  - 地址: pgh + 20*index + 4*dig
    - = pgh + 4*(5*index + dig)

多层次数组例子

```
zip_dig cmu = { 1, 5, 2, 1, 3 };
zip_dig mit = { 0, 2, 1, 3, 9 };
zip_dig ucb = { 9, 4, 7, 2, 0 };
```

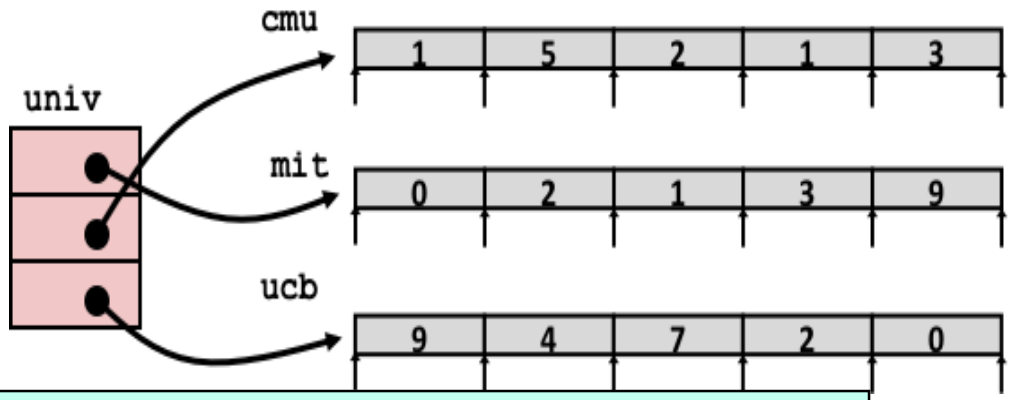
```
#define UCOUNT 3
int *univ[UCOUNT] = {mit, cmu, ucb};
```

- 变量 univ是有3个元素的数组
- 每个元素是指针类型
  - 8 bytes
- 每个指针指向一个整数数组



多层次数组元素的访问

```
int get_univ_digit
  (size_t index, size_t digit){
  return univ[index][digit];
}
```



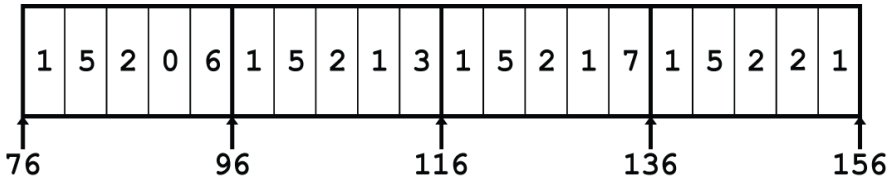

```
salq    $2, %rsi                # 4*digit
addq    univ(,%rdi,8), %rsi     # p = univ[index] + 4*digit
movl    (%rsi), %eax            # return *p
ret
```

- 计算
  - 元素访问 Mem[Mem[univ+8*index]+4*digit]
  - 需要两次内存读
    - 首先，获取行数组的地址
    - 然后，访问数组内的元素

数组元素访问

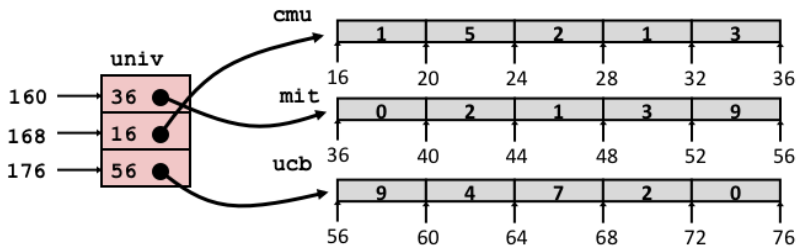
嵌套数组

```
int get_pgh_digit
  (size_t index, size_t digit)
{
  return pgh[index][digit];
}
```



多层次数组

```
int get_univ_digit
  (size_t index, size_t digit)
{
  return univ[index][digit];
}
```



与C相似，但地址的计算方式完全不同:

Mem[pgh+20*index+4*digit]

Mem[Mem[univ+8*index]+4*digit]

N×N 矩阵

- 固定维数
  - 编译的时候有确定的N值

```
#define N 16
typedef int fix_matrix[N][N];
/* 获得元素a[i][j] */
int fix_ele( fix_matrix a, size_t i, size_t j)
{  return a[i][j];  }
```

- 可变维数：显示索引
  - 动态数组的传统实现方法

```
#define IDX(n, i, j) ((i)*(n)+(j))
/* 获得元素a[i][j] */
int vec_ele(size_t n, int *a, size_t i, size_t j)
{  return a[IDX(n,i,j)];}
```

- 可变维数：隐含索引
  - gcc支持

```
/* 获得元素a[i][j] */
int var_ele(size_t n, int a[n][n], size_t i,
size_t j) {
  return a[i][j];}
```

16 X 16 矩阵的访问

- 数组元素 A[i][j]
  - 地址: **A** + i * (C * K) + j * K
  - C = 16, K = 4

```
/* 获得元素a[i][j] */
int fix_ele(fix_matrix a, size_t i, size_t j) {
  return a[i][j];
}
```

```
  # a in %rdi, i in %rsi, j in %rdx
  salq    $6, %rsi                # 64*i
  addq    %rsi, %rdi              # a + 64*i
  movl    (%rdi,%rdx,4), %eax  # M[a + 64*i + 4*j]
  ret
```

n X n 矩阵的访问

- 数组元素A[i][j]
  - 地址: $\mathbf{A} + i * (C * K) + j * K$
  - C = n, K = 4
  - 必须实现整数乘积

```
/* 获得元素a[i][j] */
int var_ele(size_t n, int a[n][n], size_t i, size_t j) {
  return a[i][j];
}
```

```
  # n in %rdi, a in %rsi, i in %rdx, j in %rcx
  imulq   %rdx, %rdi              # n*i
  leaq    (%rsi,%rdi,4), %rax     # a + 4*n*i
  movl    (%rax,%rcx,4), %eax     # a + 4*n*i + 4*j
  ret
```

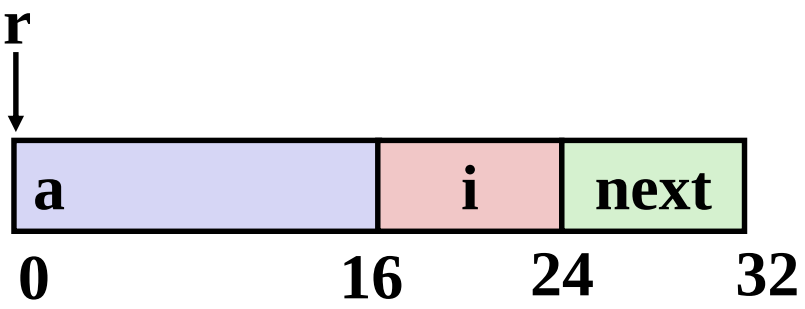
主要内容

- 数组
  - 一维
  - 多维(嵌套)
  - 多层次
- **结构体**
  - 内存分配
  - 访问
  - 对齐
- 浮点数

结构体表示

- 结构体用内存块来表示
  - 足够大，可容纳所有字段
- 字段顺序必须与声明一致
  - 即便其他顺序能使得内存更紧凑——也不行！
- 编译器决定总的尺寸和各字段位置
  - 机器级程序不解读(理解)源代码中的结构体

```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```

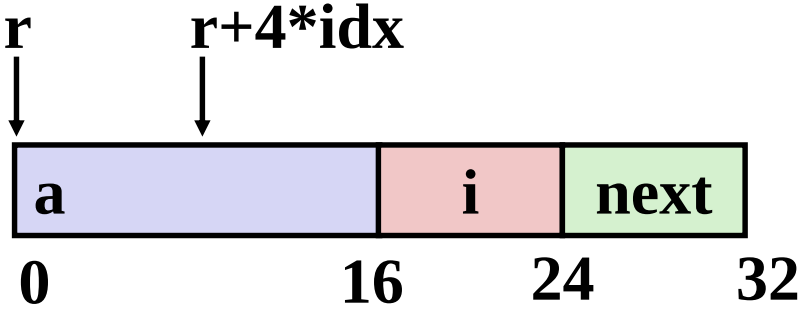


结构体成员地址的生成

```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```

- 计算数组元素的地址
  - 每个结构体成员的偏移量(Offset)是在编译阶段确定的
  - 地址计算形式:
    `r + 4*idx`

```
int *get_ap
 (struct rec *r, size_t idx)
{
  return &r->a[idx];
}
```




```
# r in %rdi, idx in %rsi
leaq  (%rdi,%rsi,4), %rax
ret
```

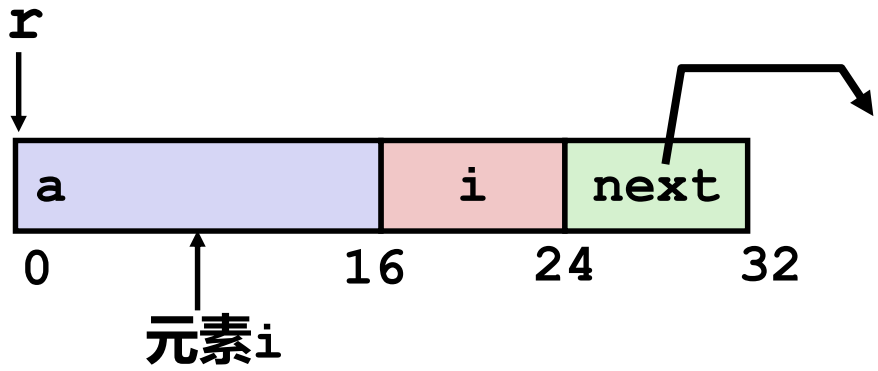
链表

- C代码

```
void set_val
  (struct rec *r, int val){
  while (r) {
    int i = r->i;
    r->a[i] = val;
    r = r->next;
  }
}
```

寄存器	数值
%rdi	r
%rsi	val

```
struct rec {
    int a[4];
    int i;
    struct rec *next;
};
```

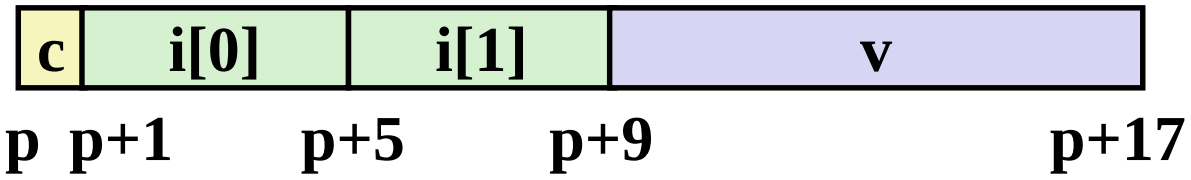



```
.L11:                   # loop:
  movslq  16(%rdi), %rax     #   i = M[r+16]
  movl    %esi, (%rdi,%rax,4) #   M[r+4*i] = val
  movq    24(%rdi), %rdi     #   r = M[r+24]
  testq   %rdi, %rdi         #   Test r
  jne     .L11               #   if !=0 goto loop
```

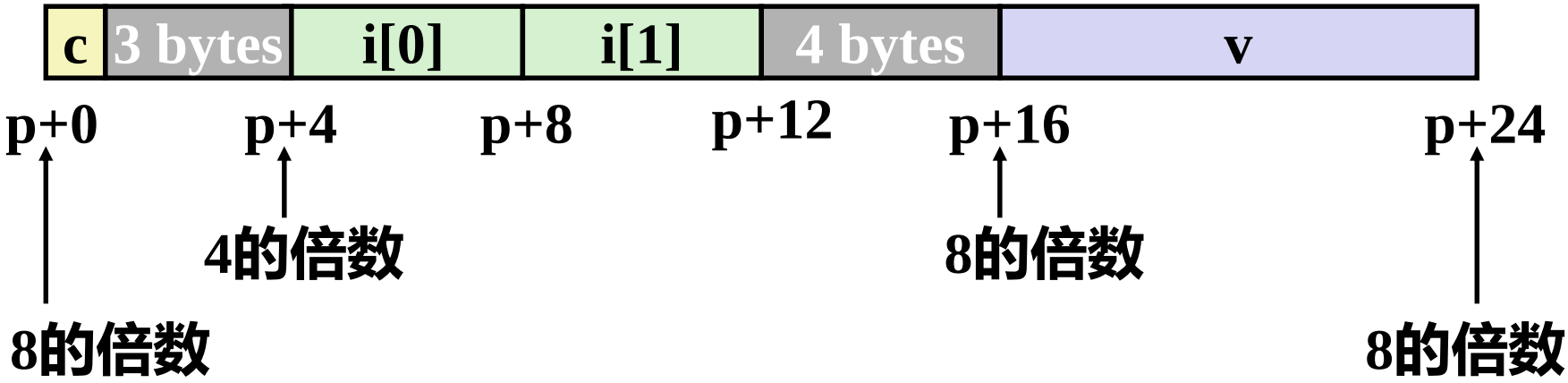
结构体与对齐

```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```

- 未对齐的数据



- 对齐后的数据
  - 基本数据类型需要 *K* 字节
  - 地址必须是*K*的倍数



对齐的准则

- 对齐后的数据
  - 基本数据类型需要*K*字节
  - 地址必须是*K*的倍数
  - 一些机器要求、x86-64机器推荐
- 对齐数据的动机
  - 内存按4字节或8字节(对齐的)块来访问（4/8依赖于系统）
    - 不能高效地装载或存储跨越四字边界的数据
    - 当一个数据跨越2个页面时，虚拟内存比较棘手
- 编译器
  - 在结构体中插入空白，以确保字段的正确对齐

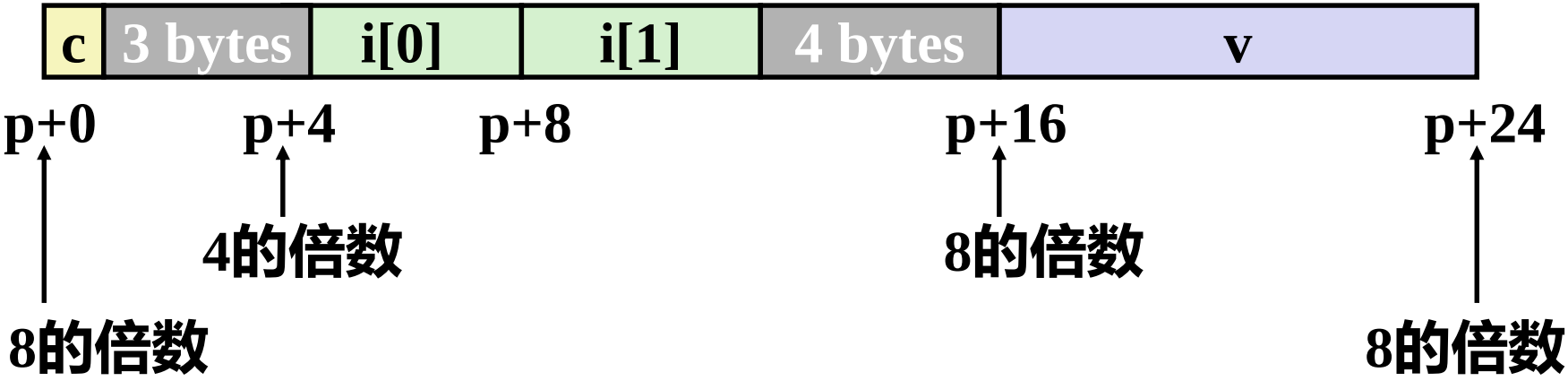
x86-64对齐

- 1字节: **char**, …
  - 对地址无要求
- 2字节: **short**, …
  - 低字节地址必须偶数： ******0_2
- 4字节: **int**, **float**, …
  - 低字节地址必须是4的倍数:******00_2
- 8字节: **double**, long, **char ***, …
  - 低字节地址必须是8的倍数:******000_2
- 16字节: **long double** (GCC on Linux)
  - 低字节地址必须是16的倍数： ******0000_2

结构体的对齐

- **结构体内部**
  - 满足每个元素的对齐要求
- **结构体的整体对齐存放**
  - 结构体的整体对齐要求值K
    - K = 所有元素的最大对齐要求值
  - **起始地址**& **结构体长度**必须是 K的倍数
- **Example: K = 8, 有double型元素**

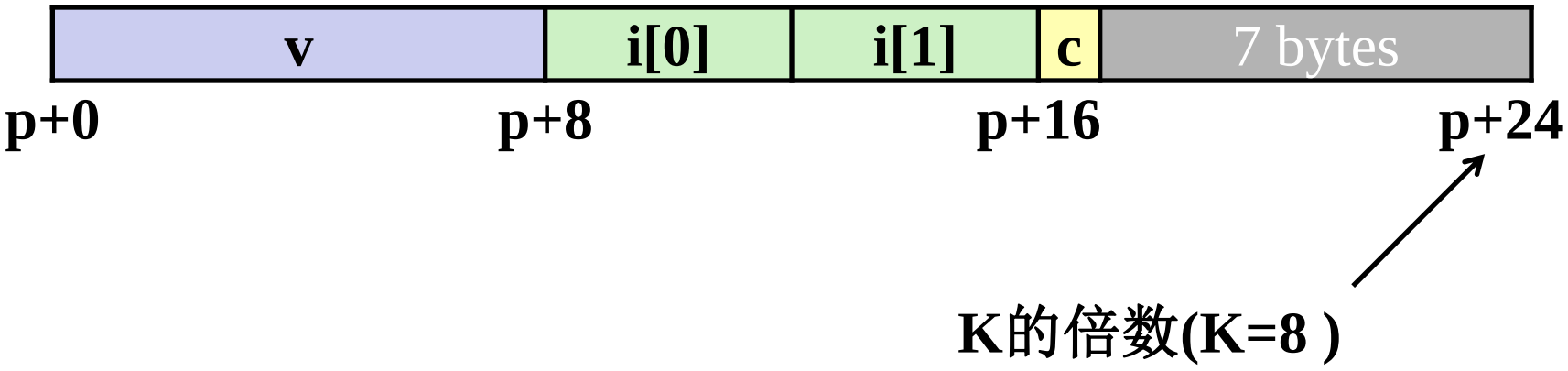
```
struct S1 {
   char c;
   int i[2];
   double v;
} *p;
```



满足整体对齐要求

- 最大对齐要求： K
- 结构体整体大小必须是K的倍数

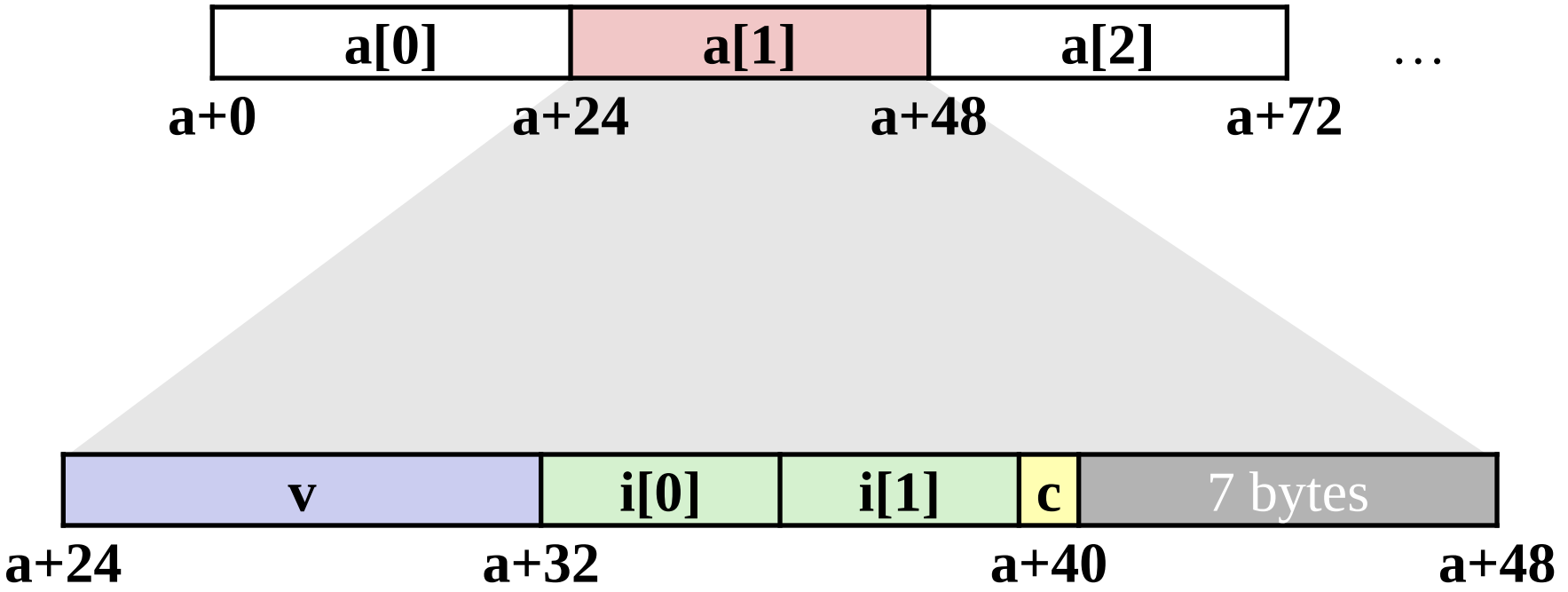
```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} *p;
```



结构体数组

- 结构体整体大小：K的倍数
- 每个元素都满足对齐要求

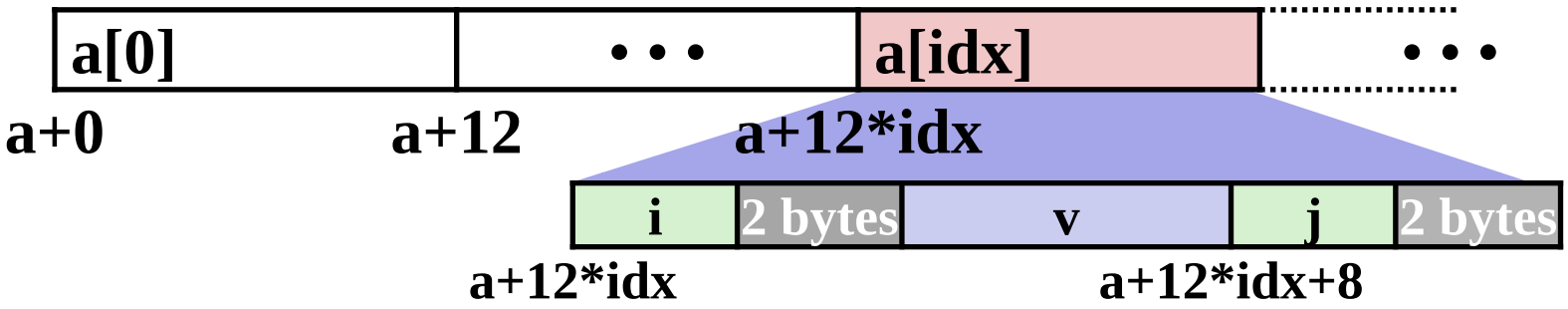
```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} a[10];
```



访问数组元素

```
struct S3 {
        short i;
        float v;
        short j;
        } a[10];
```

- 计算数组元素的offset: 12*idx
  - sizeof(S3), 包括对齐引入的空白
- 字段j在结构体内的offset: 8
- 汇编器给出的offset: a+8
  - **a: 全局变量，链接时确定**



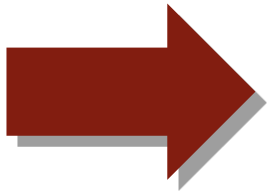

```
short get_j(int idx)
{
  return a[idx].j;
}
```

```
# %rdi = idx
leaq (%rdi,%rdi,2),%rax # 3*idx
movzwl a+8(,%rax,4),%eax
```

空间的节省

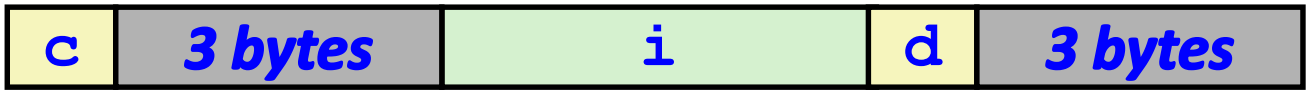
- 大尺寸数据类型在前

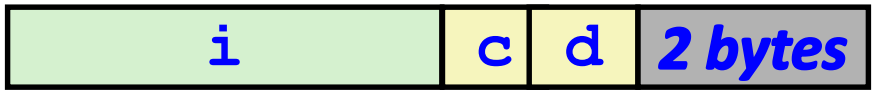
```
struct S4 {
  char c;
  int i;
  char d;
} *p;
```



```
struct S5 {
  int i;
  char c;
  char d;
} *p;
```

- 节省效果 (K=4)





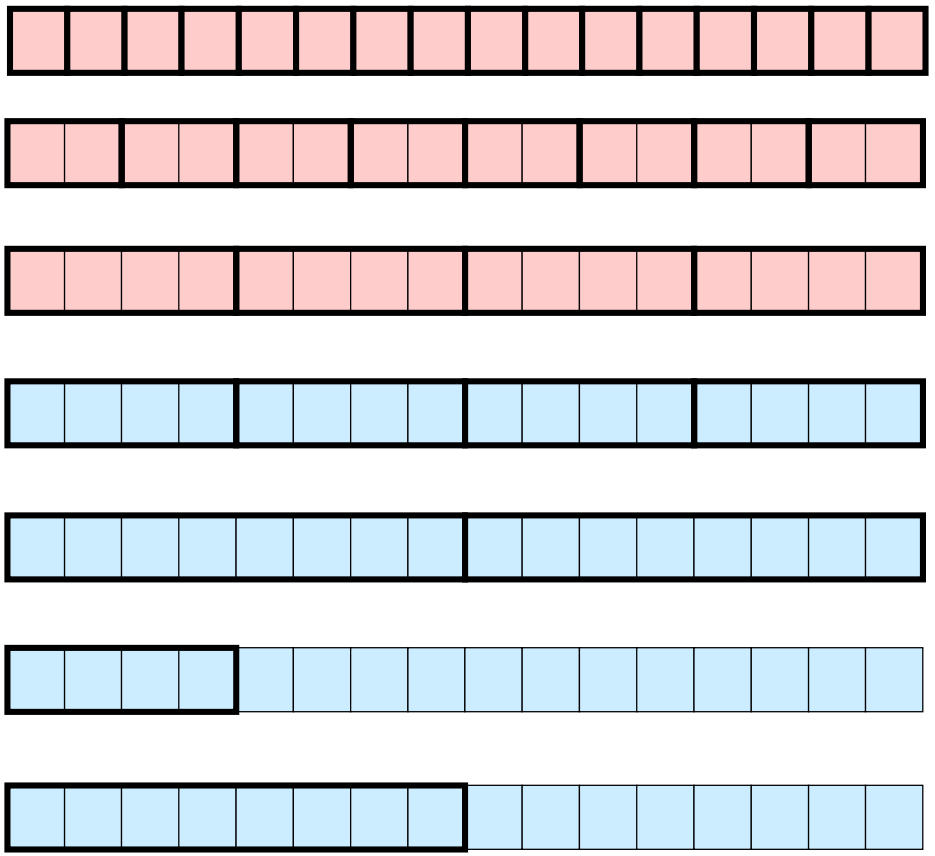
主要内容

- 数组
  - 一维
  - 多维(嵌套)
  - 多层次
- 结构体
  - 内存分配
  - 访问
  - 对齐
- 浮点数

用SSE3编程

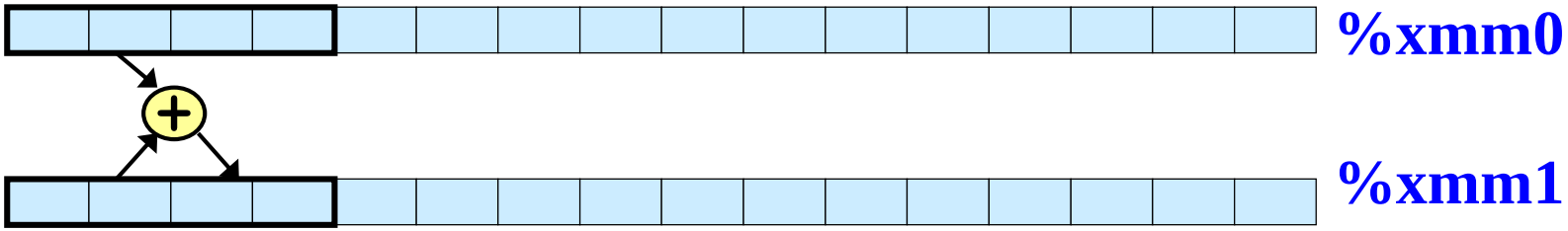
XMM 寄存器

- 共16 个 16字节的寄存器
  - 16个单字整数
  - 8个16位整数
  - 4个32位整数
  - 4个单精度浮点数
  - 2个双精度浮点数
  - 1个单精度浮点数
  - 1个双精度浮点数

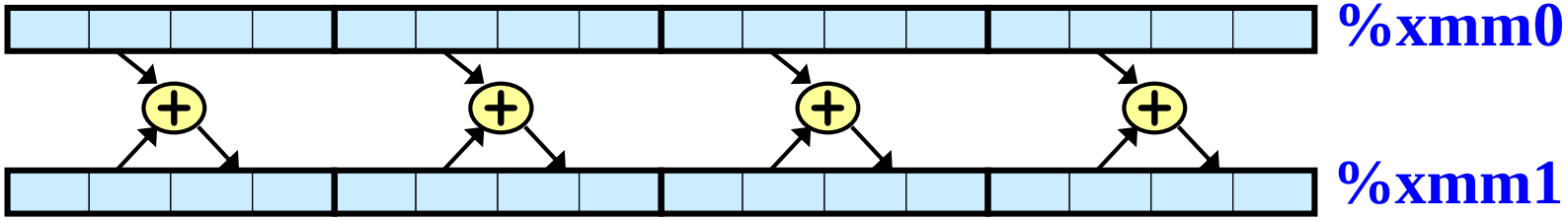


标量和SIMD操作

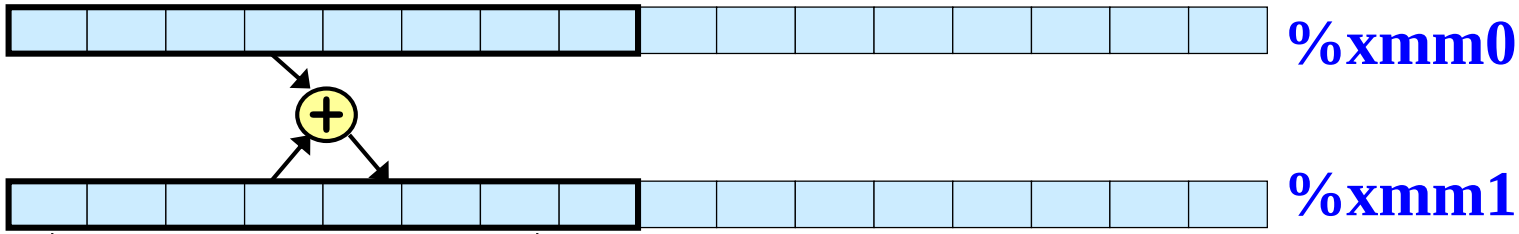
- 标量操作:单精度 addss %xmm0,%xmm1



- SIMD 操作: 单精度 addps %xmm0,%xmm1



- 标量操作:双精度 addsd %xmm0,%xmm1



浮点基础

- 参数传递使用：`%xmm0, %xmm1, ...`
- 返回结果保存：`%xmm0`
- 所有XMM 寄存器都是调用者保存

```
float fadd(float x, float y)
{
   return x + y;
}
```

```
# x in %xmm0, y in %xmm1
addss   %xmm1, %xmm0
ret
```

```
double dadd(double x, double y)
{
   return x + y;
}
```

```
# x in %xmm0, y in %xmm1
addsd   %xmm1, %xmm0
ret
```

浮点数的内存引用

- 单数传递：整数型 (包括指针) 参数用通用寄存器
- 单数传递：浮点型参数用XMM 寄存器
- 使用不同的mov指令在XMM 寄存器之间、或者内存和 XMM 寄存器之间传送数值

```
double dincr(double *p, double v){
    double x = *p;
    *p = x + v;
    return x;
}
```

```
# p in %rdi, v in %xmm0
movapd  %xmm0, %xmm1   # Copy v
movsd   (%rdi), %xmm0  # x = *p
addsd   %xmm0, %xmm1   # t = x + v
movsd   %xmm1, (%rdi)  # *p = t
ret
```

浮点数编程

- 指令多
  - 不同的操作、格式...
- 浮点数比较
  - **`ucomiss`** 和**`ucomisd`**
  - 设置条件码: CF, ZF和PF
- 常量数值的使用
  - 寄存器XMM0 清零:
    `xorpd %xmm0, %xmm0`
  - 其他：从内存载入

总结

- 数组
  - 元素存放在连续的内存区域
  - 使用索引的算术运算，定位单个的元素
- 结构体
  - 元素(字段)存放在单个内存区域
  - 用编译器确定的offsets来访问
  - 可能需要在结构体内/外进行字节填充，以实现对齐
- 组合
  - 结构体和数组可随意嵌套。
- 浮点数
  - 使用XMM 寄存器保存数据、进行计算

理解指针和数组#1

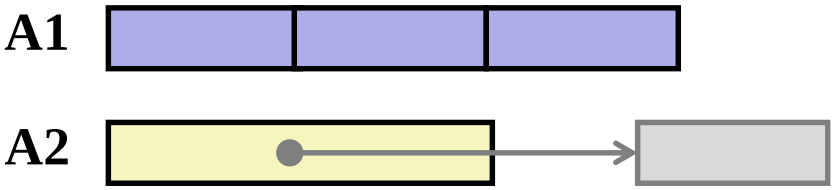
声明	An			*An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
`int A1[3]`						
`int *A2`						

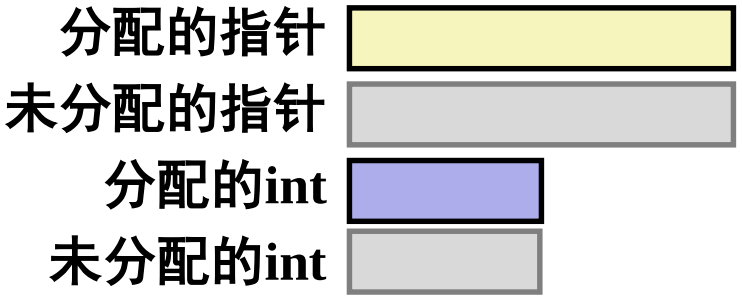
An：表示 对应行、第一列的变量名字

- Cmp: 能通过编译 (Y/N)
- Bad: 可能有错误指针引用(Y/N)
- Size: sizeof()的返回值

理解指针和数组#1

声明	An			*An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
int A1[3]	Y	N	12	Y	N	4
int *A2	Y	N	8	Y	Y	4





- Cmp: 能通过编译 (Y/N)
- Bad: 可能有错误指针引用(Y/N)
- Size: sizeof()的返回值

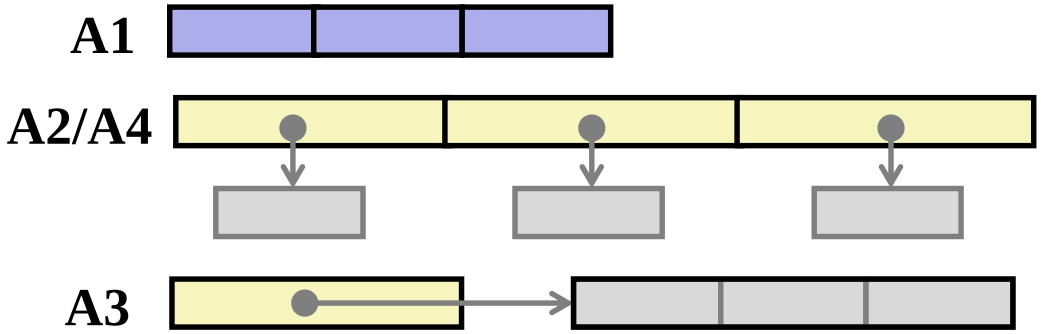
理解指针和数组#2

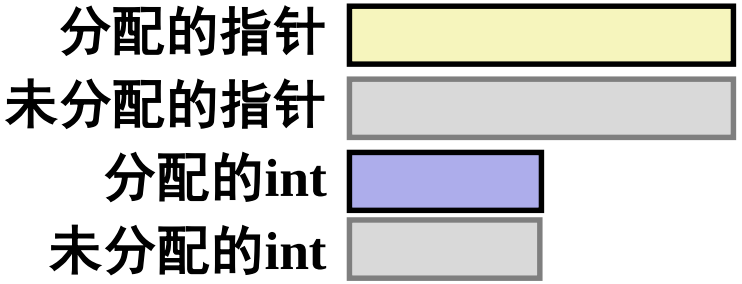
声明	An			*An			**An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
int A1[3]									
int *A2[3]									
int (*A3)[3]									
int (*A4[3])									

- Cmp: 能通过编译 (Y/N)
- Bad: 可能有错误指针引用(Y/N)
- Size: sizeof()的返回值

理解指针和数组#2

声明	An			*An			**An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
int A1[3]	Y	N	12	Y	N	4	N	-	-
int *A2[3]	Y	N	24	Y	N	8	Y	Y	4
int (*A3)[3]	Y	N	8	Y	Y	12	Y	Y	4
int (*A4[3])	Y	N	24	Y	N	8	Y	Y	4



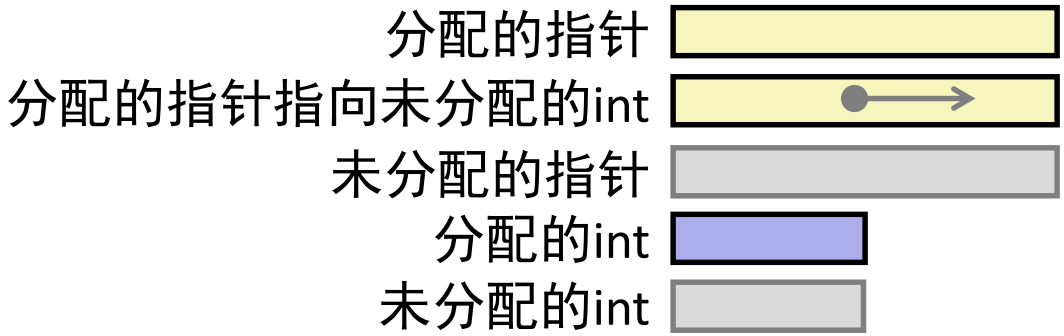


理解指针和数组#3

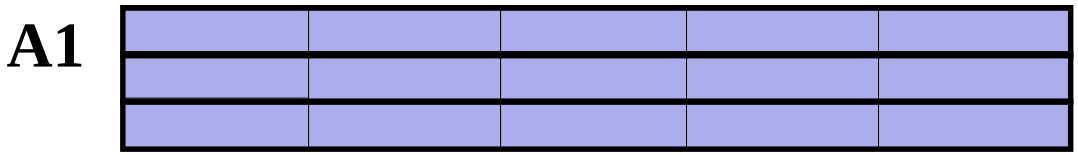
声明	An			*An			**An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
int A1[3][5]									
int *A2[3][5]									
int (*A3)[3][5]									
int *(A4[3][5])									
int (*A5[3])[5]									

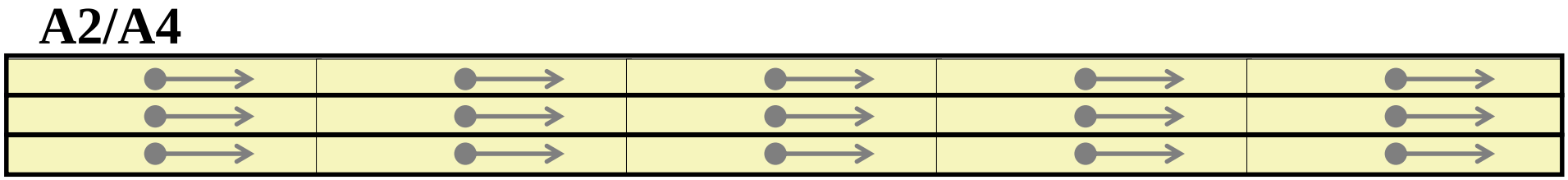
声明	***An		
	Cmp	Bad	Size
int A1[3][5]			
int *A2[3][5]			
int (*A3)[3][5]			
int *(A4[3][5])			
int (*A5[3])[5]			

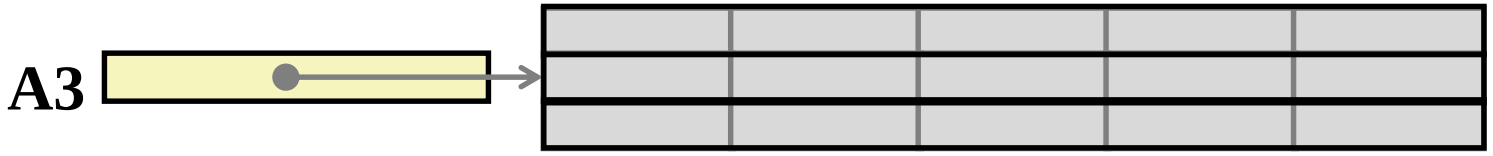
- Cmp: 能通过编译 (Y/N)
- Bad: 可能有错误指针引用(Y/N)
- Size: sizeof()的返回值

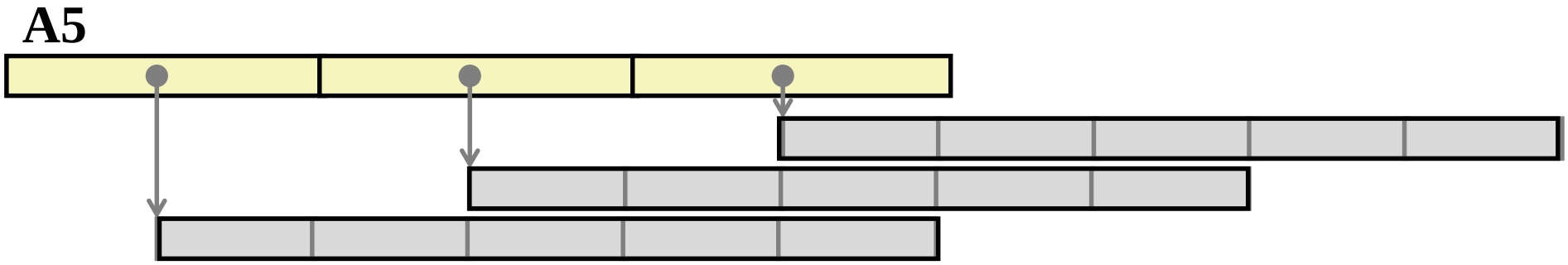


声明
int A1[3][5]
int *A2[3][5]
int (*A3)[3][5]
int *(A4[3][5])
int (*A5[3])[5]









理解指针和数组#3

声明	An			*An			**An		
	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size	Cmp	Bad	Size
int A1[3][5]	Y	N	60	Y	N	20	Y	N	4
int *A2[3][5]	Y	N	120	Y	N	40	Y	N	8
int (*A3)[3][5]	Y	N	8	Y	Y	60	Y	Y	20
int *(A4[3][5])	Y	N	120	Y	N	40	Y	N	8
int (*A5[3])[5]	Y	N	24	Y	N	8	Y	Y	20

- Cmp: 能通过编译 (Y/N)
- Bad: 可能有错误指针引用(Y/N)
- Size: sizeof()的返回值

声明	***An		
	Cmp	Bad	Size
int A1[3][5]	N	-	-
int *A2[3][5]	Y	Y	4
int (*A3)[3][5]	Y	Y	4
int *(A4[3][5])	Y	Y	4
int (*A5[3])[5]	Y	Y	4