Programación a Nivel-Máquina IV: Datos

Estructura de Computadores
Semana 6

Bibliografía:

[BRY16] Cap.3 Computer Systems: A Programmer's Perspective 3rd ed. Bryant, O'Hallaron. Pearson, 2016
Signatura ESIIT/C.1 BRY com

Transparencias del libro CS:APP, Cap.3
Introduction to Computer Systems: a Programmer's Perspective
Autores: Randal E. Bryant y David R. O'Hallaron
http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15213-f15/www/schedule.html

Guía de trabajo autónomo (4h/s)

- **Lectura:** del Cap.3 CS:APP (Bryant/O'Hallaron)
  - Array Allocation and Access
    - § 3.8 pp.291-301
  - Heterogeneous Data Structures
    - § 3.9 pp.301-312

- **Ejercicios:** del Cap.3 CS:APP (Bryant/O'Hallaron)
  - Probl. 3.36 – 3.40 § 3.8, pp.292,294,295,298_2
  - Probl. 3.41 – 3.45 § 3.9, pp.304,305,308,311_2

Bibliografía:

[BRY16] Cap.3 Computer Systems: A Programmer's Perspective 3rd ed. Bryant, O'Hallaron. Pearson, 2016
Signatura ESIIT/C.1 BRY com

Programación Máquina IV: Datos

- **Arrays**†
  - Uni-dimensionales
  - Multi-dimensionales (anidados)
  - Multi-nivel
- **Estructuras**
  - Ubicación
  - Acceso
  - Alineamiento
- **Uniones**

† *Hay autores españoles que distinguen entre "vectores" (1D) y "matrices" (2D)*

Tipos de Datos Básicos

Enteros

- Almacenados y manipulados en registros (enteros) propósito general
- Con/sin signo depende de las instrucciones usadas†

Intel	ASM‡	Bytes	C
byte	**b**	1	**[unsigned] char**
word	**w**	2	**[unsigned] short**
double word	**l**	4	**[unsigned] int**
quad word	**q**	8	**[unsigned] long int** (x86-64)

Punto Flotante

- Almacenados y manipulados en registros punto flotante

Intel	ASM	Bytes	C
Single	**s**	4	**float**
Double	**l**	8	**double**
Extended	**t**	10/12/16	**long double**

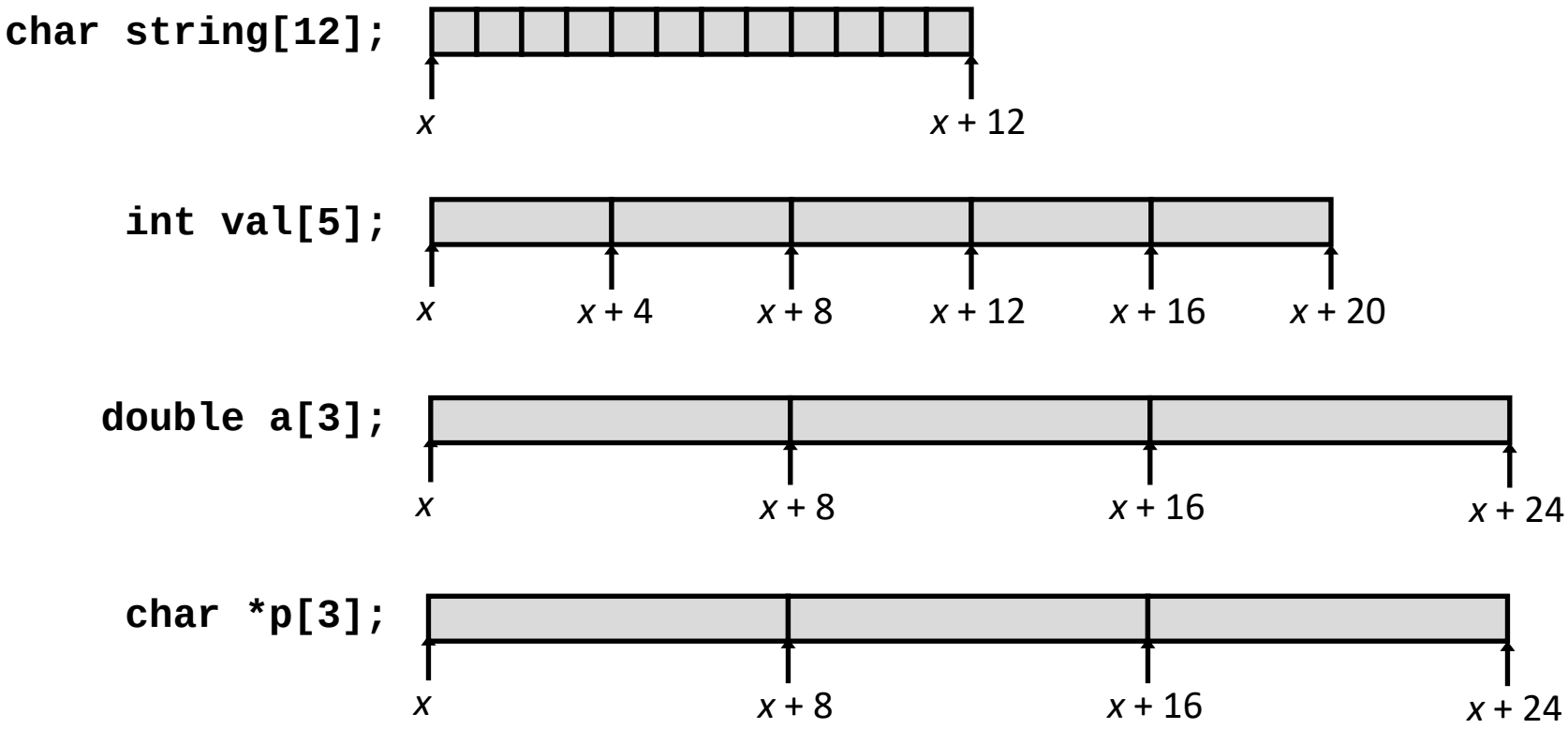
‡ sufijos en sintaxis AT&T Linux
† y del tipo datos indicado en C, de los flags ó "condition codes" consultados en código ASM.

Ubicación† de Arrays

- **Principio Básico**

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

  - Array de tipo *T* y longitud *L*
  - Reservada† región contigua en memoria de *L* * **sizeof(***T***)** bytes



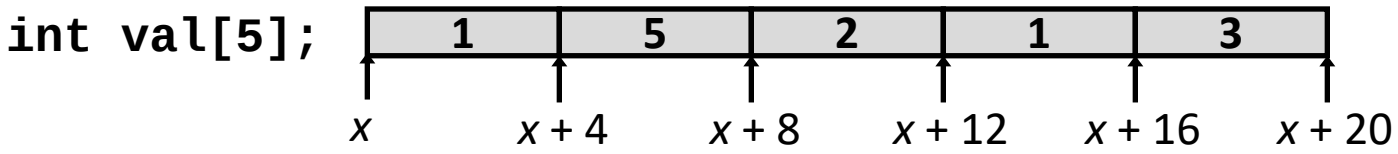
"(de)allocate" = reservar/liberar
† "allocation" = ubicación

Acceso a Arrays

- **Principio Básico**

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

  - Array de tipo *T* y longitud *L*
  - El identificador **A** (Tipo *T**) puede usarse como puntero al elemento 0



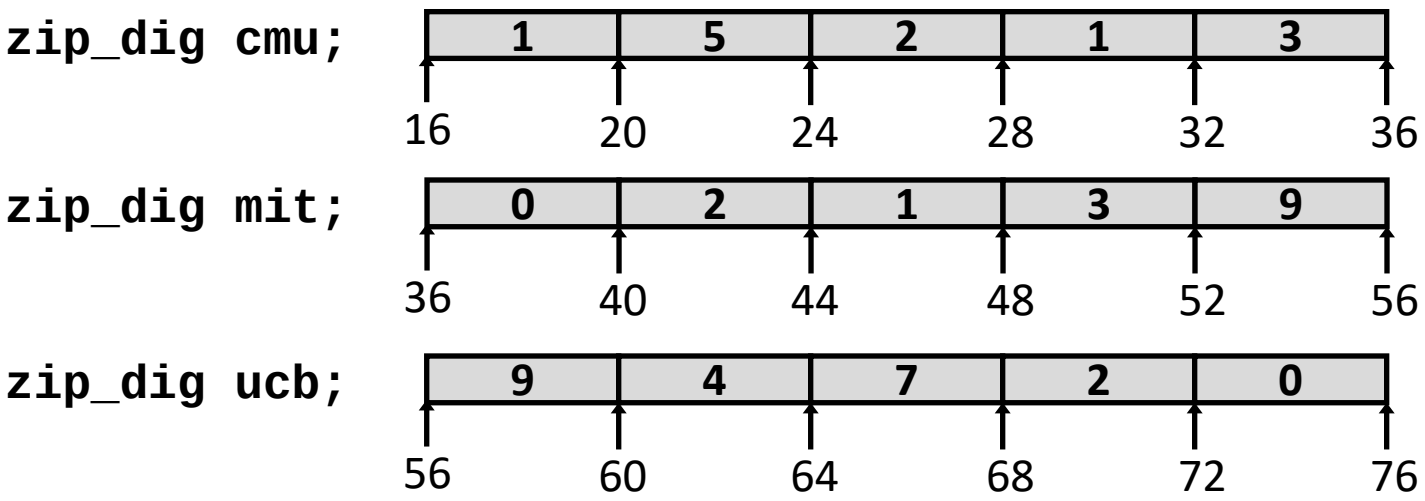
- **Referencia† Tipo Valor**

Referencia	Tipo
`val[4]`	`int`
`val`	`int *`
`val+1`	`int *`
`&val[2]`	`int *`
`val[5]`	`int`
`*(val+1)`	`int`
`val + i`	`int *`

† otros autores usan "(de)reference" en sentido mucho más estricto, para indicar el tipo puntero, o la operación de seguir el puntero.

Ejemplo de Arrays

```
#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 };
```

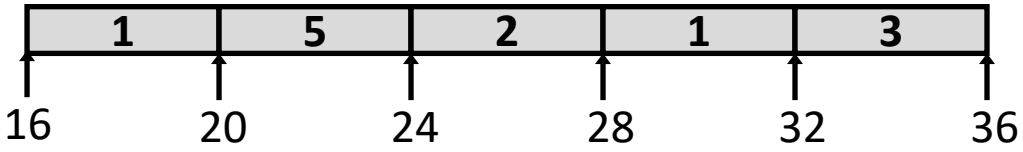


- **Declaración "`zip_dig cmu`" equivalente a "`int cmu[5]`"**
- **Los arrays del ejemplo fueron ubicados en bloques sucesivos de 20 bytes**
  - En general no está garantizado que suceda

† ZIP = "Zone Improvement Plan" especie de código postal en USA

Ejemplo de Acceso a Arrays

```
zip_dig cmu;
```




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

```
get_digit:                      # z en %rdi,
†                               # digit %rsi
   movl (%rdi,%rsi,4), %eax     # z[digit]
   ret
```

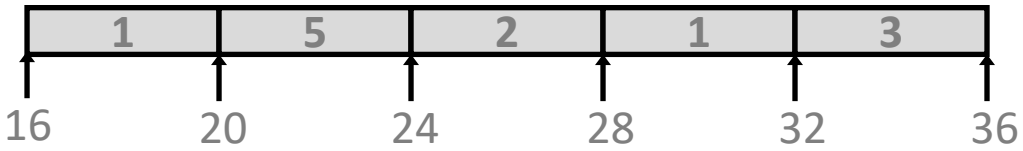
- El registro `%rdi` contiene dirección inicio del array
- El registro `%rsi` contiene el índice al array
- El dígito deseado está en `4*%rdi + %rsi`
- Usar referencia a memoria‡ `(%rdi,%rsi,4)`

† *size_t es usualmente unsigned long int en x86_64*

‡ *"memory reference" en sentido manuales IA-32, "direccionamiento a memoria"*

Ejemplo de Acceso a Arrays

```
zip_dig cmu;
```




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

```
get_digit:                      # z en %rdi,
†  movslq  %esi, %rsi            # digit=%rsi
   movl (%rdi,%rsi,4), %eax     # z[digit]
   ret
```

- El registro `%rdi` contiene dirección inicio del array
- El registro `%rsi` contiene el índice al array
- El dígito deseado está en `4*%rdi + %rsi`
- Usar referencia a memoria‡ `(%rdi,%rsi,4)`

† *"Move with Sign-extend Long to Quad",mnemotécnico MOVSX según Intel*

‡ *"memory reference" en sentido manuales IA-32, "direccionamiento a memoria"*

Ejemplo de Bucle sobre Array

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

```
  # %rdi = z
  movl    $0, %eax
  jmp     .L3
.L4:
  addl    $1, (%rdi,%rax,4)
  addq    $1, %rax
.L3:
  cmpq    $4, %rax
  jbe     .L4
  rep; ret
```

Comprendiendo Arrays y Punteros #1

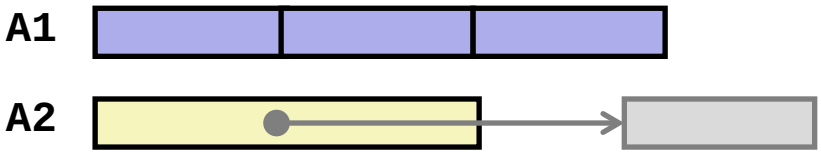
Decl	A1 , A2			*A1 , *A2		
	Comp	Ptr	Size	Comp	Ptr	Size
`int A1[3]`						
`int *A2`						

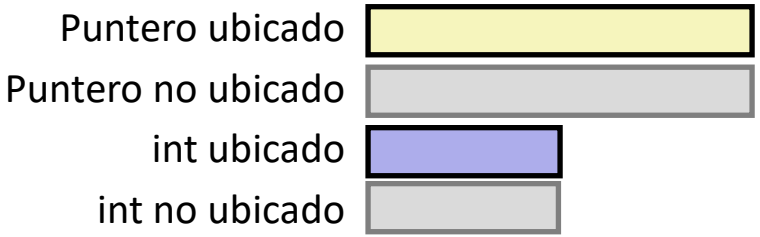
- Comp: Compila (S/N)
- Ptr: Posible error referencia puntero (S/N)
- Size: Valor devuelto por `sizeof`

Comprendiendo Arrays y Punteros #1

Decl	A1 , A2			*A1 , *A2		
	Comp	Ptr	Size	Comp	Ptr	Size
`int A1[3]`	·	·	12	·	·	4
`int *A2`	·	·	8	·	S	4

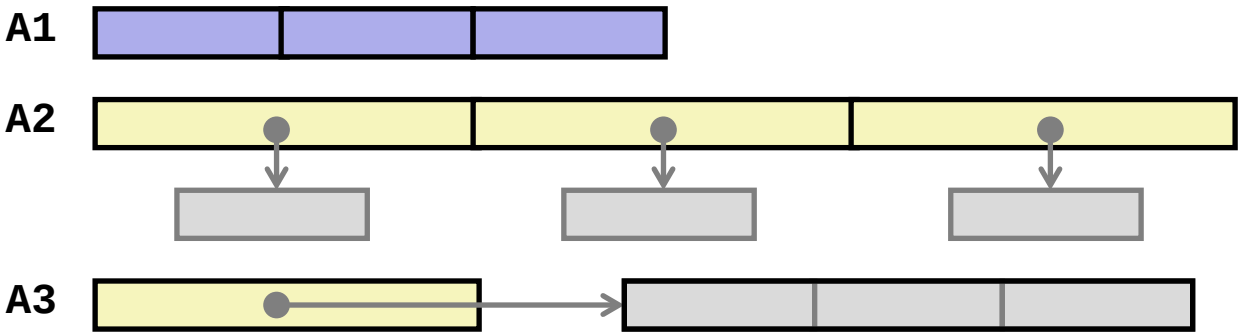
- Comp: Compila (S·/N)
- Ptr: Posible error referencia puntero (S/N·)
- Size: Valor devuelto por `sizeof`

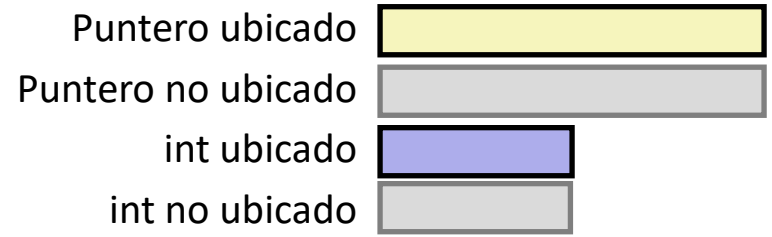




Comprendiendo Arrays y Punteros #2

Decl	An			*An			**An		
	Cmp	Ptr	Size	Cmp	Ptr	Size	Cmp	Ptr	Size
`int A1[3]`									
`int *A2[3]`									
`int (*A3)[3]`					.†	12			

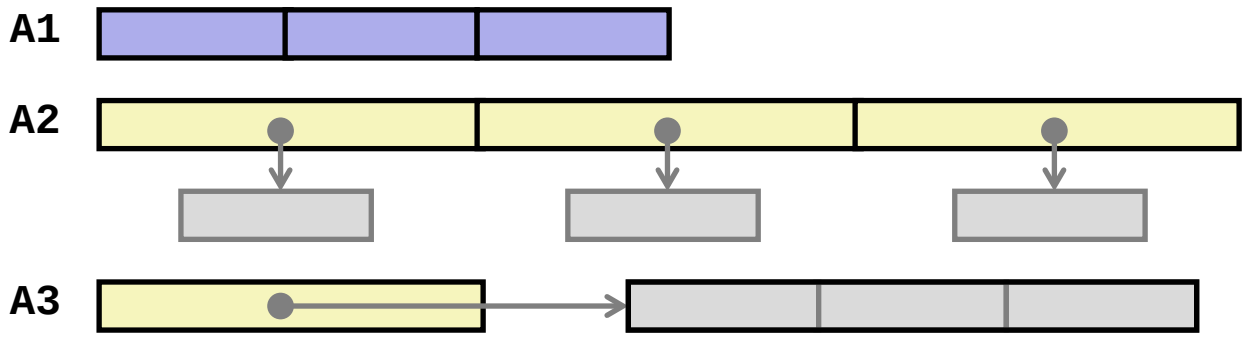


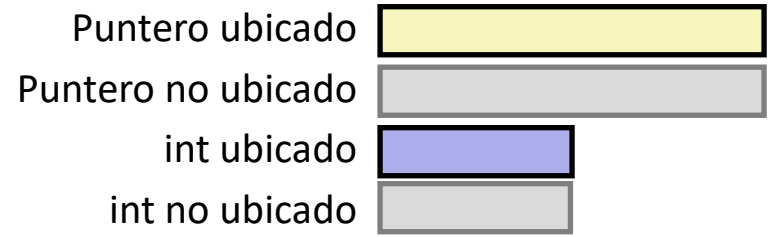


† *gcc traduce igual que como movq A3(%rip), %rax, movq %rax, p/v(%rip).* *void*v=A3; int*p=*A3;*

Comprendiendo Arrays y Punteros #2

Decl	An			*An			**An		
	Cmp	Ptr	Size	Cmp	Ptr	Size	Cmp	Ptr	Size
`int A1[3]`	.	.	12	.	.	4	N	-	-
`int *A2[3]`	.	.	24	.	.	8	.	S	4
`int (*A3)[3]`	.	.	8	.	.†	12	.	S	4





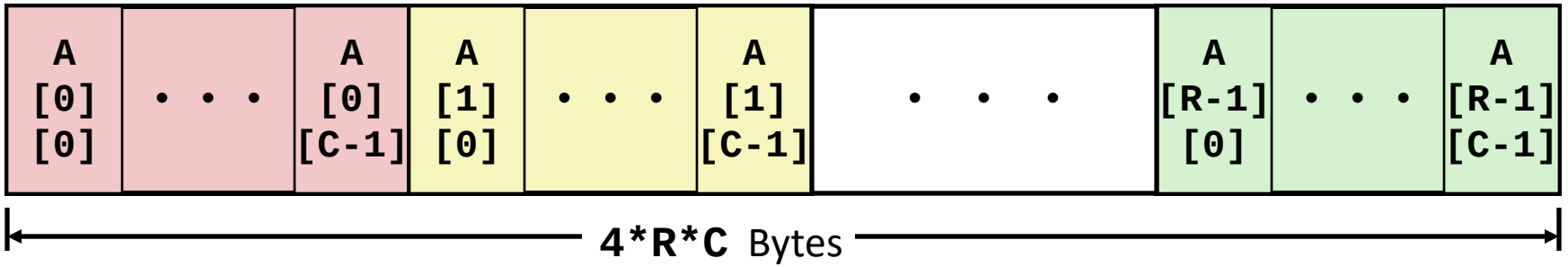
† *gcc traduce igual que como movq A3(%rip), %rax, movq %rax, p/v(%rip).* *void*v=A3; int*p=*A3;*

Arrays Multidimensionales (Anidados)

- **Declaración**
  - *T* **A**[*R*][*C*];
  - Array 2D de (elems. de) tipo *T*
  - *R* filas (rows), *C* columnas
  - Elems. tipo *T* requieren *K* bytes
- **Tamaño Array**
  - *R* * *C* * *K* bytes
- **Disposición**
  - Almacenamiento por filas (row-major-order)†

```
[ A[0][0]   • • •   A[0][C-1]
      •                 •
      •                 •
      •                 •
  A[R-1][0] • • • A[R-1][C-1] ]
```

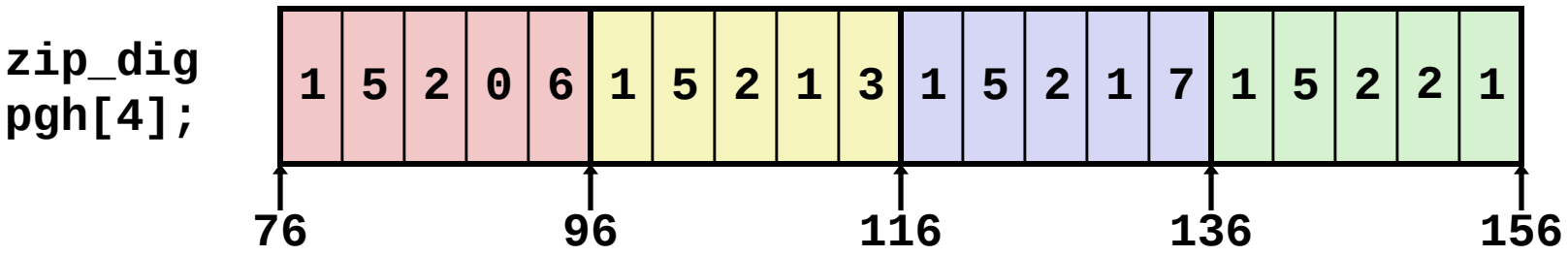
int A[R][C];



† *también existe "column-major order" (FORTRAN, MATLAB…)*

Ejemplo de Array Anidado

```
#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 }};
```



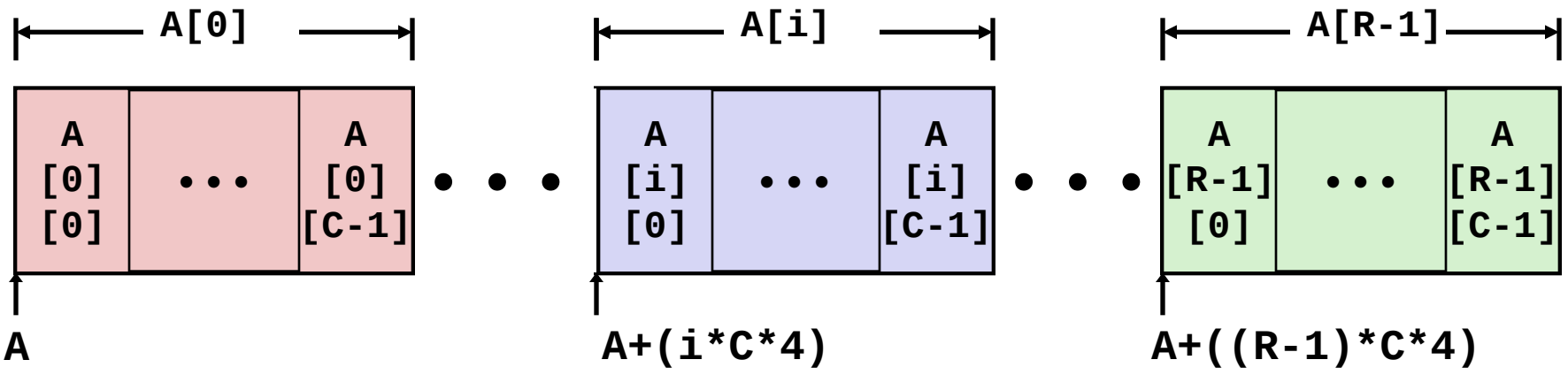
- **"`zip_dig pgh[4]`" equivalente a "`int pgh[4][5]`"**
  - Variable **`pgh`**: array de 4 elementos, ubicados contiguamente
  - Cada elemento es un array de 5 **`int`**'s, ubicados contiguamente
- **Garantizado almacenamiento por filas ("row-major order")**

† *pgh = Pittsburgh PA*

Acceso a Filas en Arrays Anidados

- **Vectores Fila**
  - `A[i]` es un array de *C* elementos
  - Cada elemento de tipo *T* requiere *K* bytes
  - Dirección de comienzo **A + *i* * (*C* * *K*)**

```
int A[R][C];
```



Código Acceso Filas Arrays Anidados

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

```
#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 }};
```

```
get_pgh_zip:
                                    # index en %rdi
   leaq  (%rdi,%rdi,4), %rax        # 5 * index

†  leaq   pgh(,%rax,4), %rax        # pgh + (20 * index)
   ret
```

- **Vector Fila**
  - **`pgh[index]`** es array de 5 **`int`**'s, comienza en **`pgh+20*index`**
- **Código x86-64**
  - Calcula **`pgh + 4*(index+4*index)`**

† *gcc –fno-pie*

Código Acceso Filas Arrays Anidados

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

```
#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 }};
```

```
get_pgh_zip:
   movslq  %edi, %rdi              # index =  %edi
   leaq  (%rdi,%rdi,4), %rdx       # 5 * index
†  leaq  pgh(%rip), %rax           # pgh
   leaq  (%rax,%rdx,4), %rax       # pgh + (20 * index)
   ret
```

- Vector Fila
  - `pgh[index]` es array de 5 `int`'s, comienza en `pgh+20*index`
- Código x86-64
  - Calcula `pgh + 4*(index+4*index)`

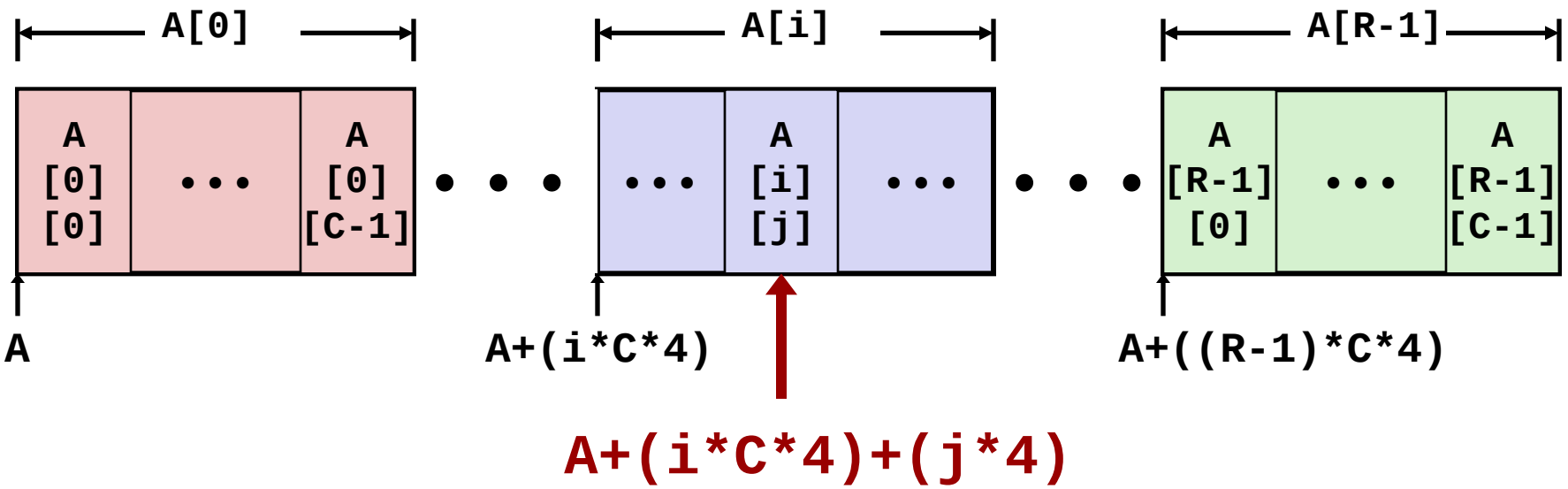
† es direccionamiento relativo a Contador de Programa %rip, existe en x86-64, no en x86. Activado por defecto desde Ubuntu 17.10 #Position-independent_executables

Ver p.ej. https://en.wikipedia.org/wiki/Position-independent_code#

Acceso a Elementos en Arrays Anidados

- **Elementos del Array**
  - **`A[i][j]`** es elemento de tipo *T*, que requiere *K* bytes
  - Dirección **A +** $i * (C * K) + j * K = A + (i * C + j) * K$

```
int A[R][C];
```



Código Acceso Elementos Arrays Anidados

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

```
get_pgh_digit:
                                # digit en %rax
                                # index en %rdi
 leaq   (%rdi,%rdi,4), %rax     # 5*index
 addq   %rax, %rsi              # 5*index+digit

†movl   pgh(,%rsi,4), %eax      # pgh + 4 * (5*index+digit)
 ret
```

- **Elementos del Array**
  - **`pgh[index][dig]`** es **`int`**
  - Dirección: **`pgh + 20*idx + 4*dig = pgh + 4*(5*idx+dig)`**
  - Código x86_64 calcula la dirección **`pgh + 4*((idx+4*idx)+dig)`**

† *gcc –fno-pie*

Código Acceso Elementos Arrays Anidados

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

```
get_pgh_digit:
 movslq %esi, %rax              # digit =  %rax
 movslq %edi, %rdi              # index =  %rdi
 leaq   (%rdi,%rdi,4), %rsi     # 5*index
 addq   %rax, %rsi              # 5*index+digit
 leaq   pgh(%rip), %rax         # pgh
 movl   (%rax,%rsi,4), %eax     # pgh + 4 * (5*index+digit)
 ret
```

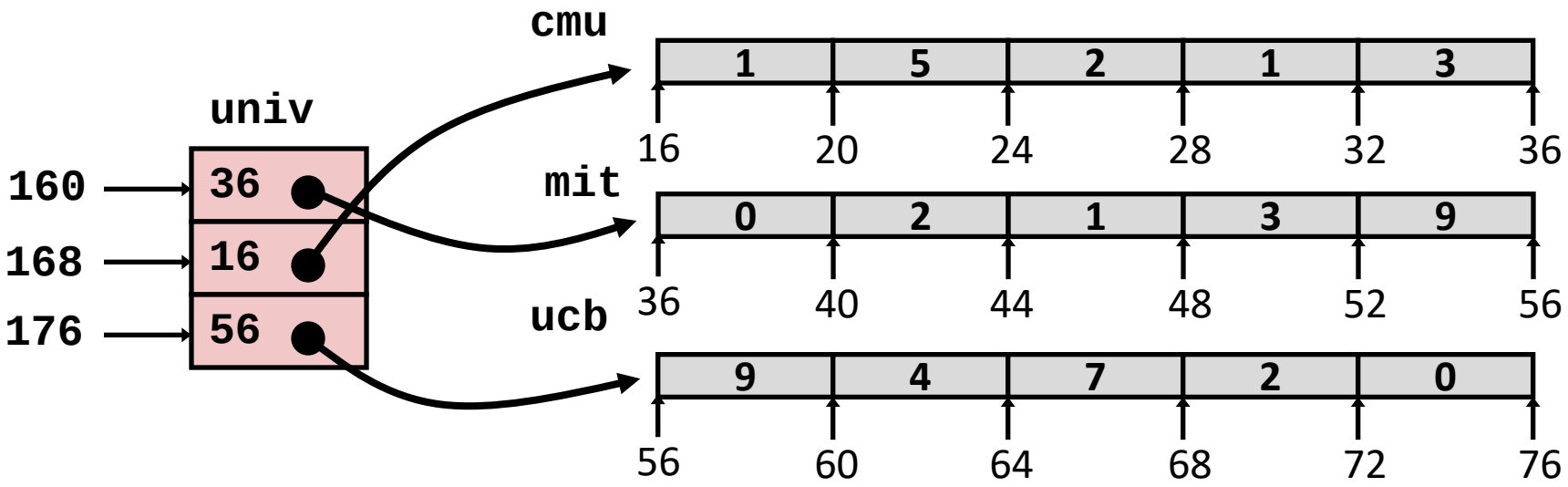
- Elementos del Array
  - `pgh[index][dig]` es `int`
  - Dirección: `pgh + 20*idx + 4*dig` = `pgh + 4*(5*idx+dig)`
  - Código x86_64 calcula la dirección `pgh + 4*((idx+4*idx)+dig)`

Ejemplo de Array Multi-Nivel†

```
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};
```

- Variable `univ` denota un array de 3 elementos
- Cada elemento un puntero
  - 8 bytes
- Cada puntero apunta a un array de `int`'s



† no se suele decir "multinivel", es más usual "array de punteros".

Acceso a Elementos en Array Multi-Nivel

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

```
get_univ_digit:

  movq   univ(,%rdi,8), %rax  # p = *(univ+8*index)
  movl   (%rax,%rsi,4), %eax  # return *(p+4*digit)
  ret
```

- **Cuentas**
  - Acceso a elemento **`Mem[Mem[univ+8*index]+4*digit]`**
  - Debe hacer dos lecturas de memoria
    - Primero obtener puntero al array† fila
    - Entonces acceder elemento dentro del array†

† *se suele decir "vector" (1D) como opuesto a "matriz" (2D)*

Acceso a Elementos en Array Multi-Nivel

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

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

- **Cuentas**
  - Acceso a elemento **`Mem[Mem[univ+8*index]+4*digit]`**
  - Debe hacer dos lecturas de memoria
    - Primero obtener puntero al array† fila
    - Entonces acceder elemento dentro del array†

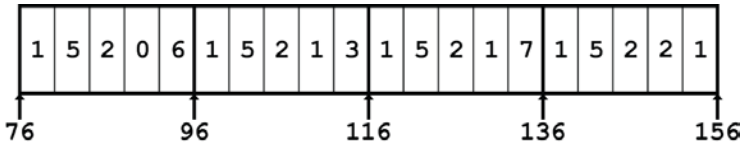
Acceso a Elementos en Arrays

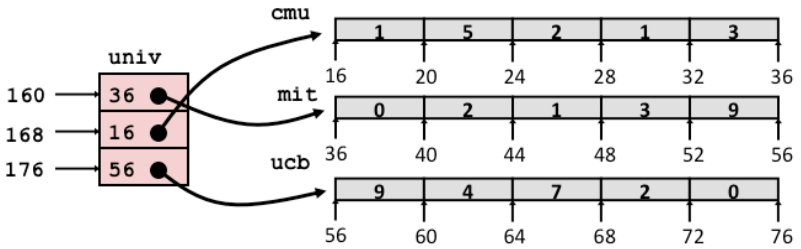
Array anidado

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

Array Multi-nivel

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





Accesos parecen similares en C, pero cuentas muy diferentes:

`Mem[pgh+20*index+4*digit]` **`Mem[Mem[univ+8*index]+4*digit]`**

Código para Matriz N X N

- **Dimensiones fijas**
  - Se conoce valor de N en tiempo de compilación

```
#define N 16
typedef int fix_matrix[N][N];
/* Get element A[i][j] */
int fix_ele(fix_matrix A,
            size_t i, size_t j)
{
  return A[i][j];
}
```

- **Dimensiones variables, indexado explícito**
  - Forma tradicional de implementar arrays dinámicos

```
#define IDX(n, i, j) ((i)*(n)+(j))
/* Get element A[i][j] */
int vec_ele(size_t n, int *A,
            size_t i, size_t j)
{
  return A[IDX(n,i,j)];
}
```

- **Dimensiones variables, indexado implícito**
  - Soportado ahora† por gcc

```
/* Get element A[i][j] */
int var_ele(size_t n, int A[n][n],
            size_t i, size_t j) {
  return A[i][j];
}
```

† *Ver p.ej.: http://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Variable-Length.html*
ISO C99, gcc lo soporta en C90/C89 y C++ desde antes v-2.95 1999

Acceso a Matriz 16 X 16

- **Elementos del Array**
  - `int A[16][16];`
  - Dirección `A + i * (C * K) + j * K`
  - C = 16, K = 4

```
/* Get element A[i][j] */
int fix_ele(fix_matrix A, size_t i, size_t j)
{
  return a[i][j];
}
```

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

Acceso a Matriz n X n

- **Elementos del Array**
  - `int A[n][n];`
  - Dirección `A + i * (C * K) + j * K`
  - C = n, K = 4
  - Hay que realizar multiplicación entera

```
/* Get element A[i][j] */
int var_ele(size_t n, int A[n][n], size_t i, size_t j)
{
  return A[i][j];
}
```

```
  # n en %rdi, a en %rsi, i en %rdx, j en %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
```

Ejemplo: Accesos a un Array

```
#include <stdio.h>
#define ZLEN 5
#define PCOUNT 4
typedef int zip_dig[ZLEN];

int main(int argc, char** argv) {
zip_dig pgh[PCOUNT] =
    {{1, 5, 2, 0, 6},
     {1, 5, 2, 1, 3 },
     {1, 5, 2, 1, 7 },
     {1, 5, 2, 2, 1 }};
    int *linear_zip = (int *) pgh;
    int *zip2 = (int *) pgh[2];
    int result =
        pgh[0][0] +
        linear_zip[7] +
        *(linear_zip + 8) +
        zip2[1];
    printf("result: %d\n", result);
    return 0;
}
```

```
linux> ./array
result: 9
```

Ejemplo: Accesos a un Array

```
#include <stdio.h>
#define ZLEN 5
#define PCOUNT 4
typedef int zip_dig[ZLEN];

int main(int argc, char** argv) {
zip_dig pgh[PCOUNT] =
    {{1, 5, 2, 0, 6},
     {1, 5, 2, 1, 3 },
     {1, 5, 2, 1, 7 },
     {1, 5, 2, 2, 1 }};
    int *linear_zip = (int *) pgh;
    int *zip2 = (int *) pgh[2];
    int result =
        pgh[0][0] +
        linear_zip[7] +
        *(linear_zip + 8) +
        zip2[1];
    printf("result: %d\n", result);
    return 0;
}
```

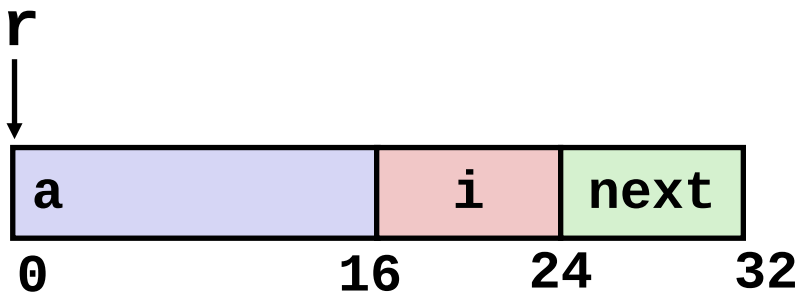
```
linux> ./array
result: 9
```

Programación Máquina IV: Datos

- **Arrays**
  - Uni-dimensionales
  - Multi-dimensionales (anidados)
  - Multi-nivel
- **Estructuras**
  - Ubicación
  - Acceso
  - Alineamiento
- **Uniones**

Representación de Estructuras

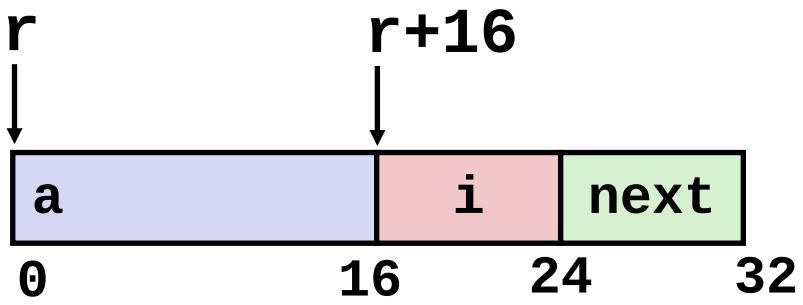
```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```



- **Estructuras representadas como un bloque de memoria**
  - Suficientemente grande como para contener todos los campos
- **Referencia a campos de la estructura mediante sus nombres**
  - Sintaxis struct.field, pointer->field
- **Campos ordenados según la declaración**
  - Incluso si otro orden pudiera producir una representación más compacta
- **Compilador determina posición/tamaño conjunto de los campos**
  - El programa a nivel máquina no entiende las estructuras del código fuente

Acceso a Estructuras

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



- **Accediendo a un Miembro de la Estructura**
  - Puntero indica primer byte de la estructura‡
  - Acceder a los elementos mediante sus desplazamientos†

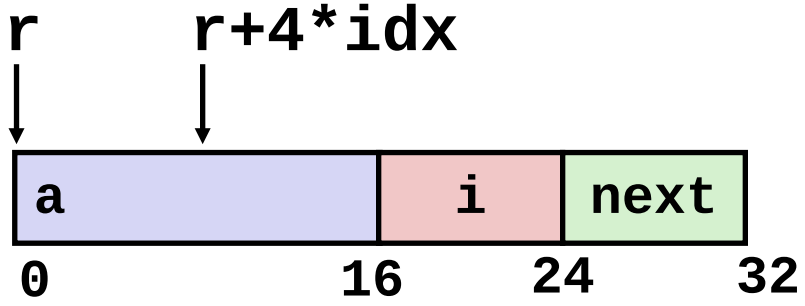
```
void set_i
  (struct rec *r,
      size_t val)
{
‡ r->i = val;
}
```

```
set_i:                  # r en %rdi,
                        # val en %rsi
movq %rsi, 16(%rdi)     # Mem[r+16] = val
ret
```

† "offset"=compensación, "desplazamiento"
‡ ptr->fld es abreviación para (*ptr).fld
Si se declara "struct rec R;", entonces "R.a" es array, "R.a[0]" y "R.i" enteros, "R.n" puntero, y "R.n->a" otra vez array

Generando Puntero a Miembro Estructura

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



- **Generando Puntero a un Elemento del Array**
  - Desplaz.† de cada miembro struct queda determinado en tiempo compilación
  - Se calcula **`r + 4*idx`**

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

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

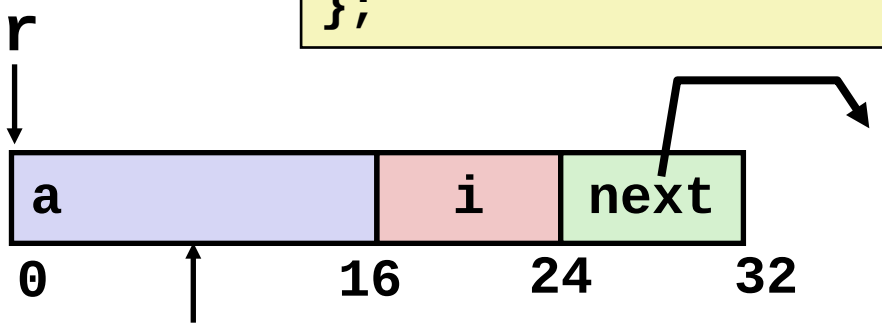
† *"offset"=compensación, "desplazamiento"*
‡ *ptr->fld es abreviación para (*ptr).fld*
Si se declara "struct rec R;", entonces "R.a" es array, "R.a[0]" y "R.i" enteros, "R.n" puntero, y "R.n->a" otra vez array

Siguiendo Lista Encadenada

- Código C

```
struct rec {
    int a[3];
    int i;
    struct rec *next;
};
```

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



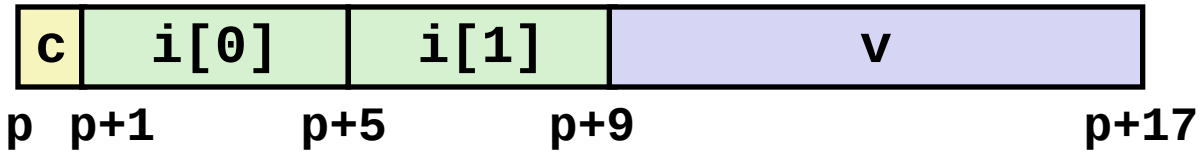
Elemento i

Registro	Valor
%rdi	r
%rsi	val

```
.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
```

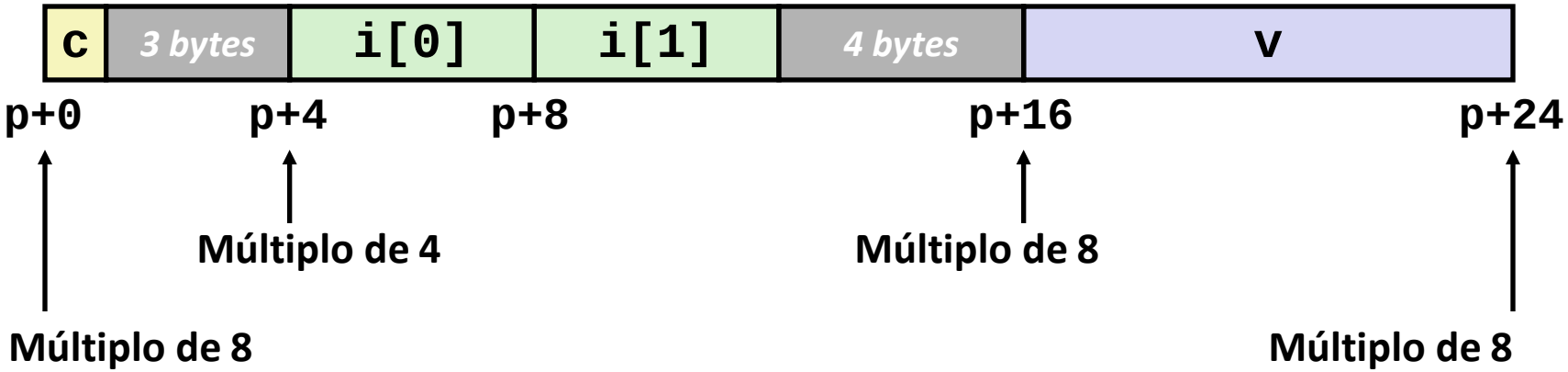
Estructuras y Alineamiento

- **Datos Desalineados**




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

- **Datos Alineados**
  - El tipo de datos primitivo requiere ***K*** bytes
  - La dirección debe ser múltiplo de ***K***



Principios de Alineamiento

- **Datos Alineados**
  - El tipo de datos primitivo requiere ***K*** bytes
  - La dirección debe ser múltiplo de ***K***
  - Requisito en algunas máquinas; recomendado en x86-64

- **Motivación para Alinear los Datos**
  - A la memoria se accede (físicamente) en trozos (alineados) de 4 ú 8 bytes (dependiendo del sistema)
    - Ineficiente cargar o almacenar dato que cruza frontera quad word
    - Mem. virtual muy delicada cuando un dato se extiende a 2 páginas

- **Compilador**
  - Inserta huecos en estructura para asegurar correcto alineamiento campos

Casos Concretos de Alineamiento

	Linux x86		x86-64		Windows MinGW32		MinGW64	
▪ *Tipo de Datos C*	*tam.*	*alin.*	*tam.*	*alin.*	*tam.*	*alin.*	*tam.*	*alin.*
▪ char	1	1	1	1	1	1	1	1
▪ short	2	2	2	2	2	2	2	2
▪ int	4	4	4	4	4	4	4	4
▪ long	4	4	8	8	4	4	**4**	**4**
▪ long long	8	4	8	8	8	**8**	8	8
▪ float	4	4	4	4	4	4	4	4
▪ double	8	4	8	8	8	**8**	8	8
▪ long double	12	4	16	16	12	4	16	16
▪ void *	4	4	8	8	4	4	8	8
▪ *Regla para memorizar*		**4x**		**KB Kx**		**8x**		**KB Kx**
		ahorro M.		**alin.estricto**		sin ahorro estricto-12B		sin long 8B

#Typical_alignment_of_C_structs_on_x86

Casos Concretos de Alineamiento (x86-64)

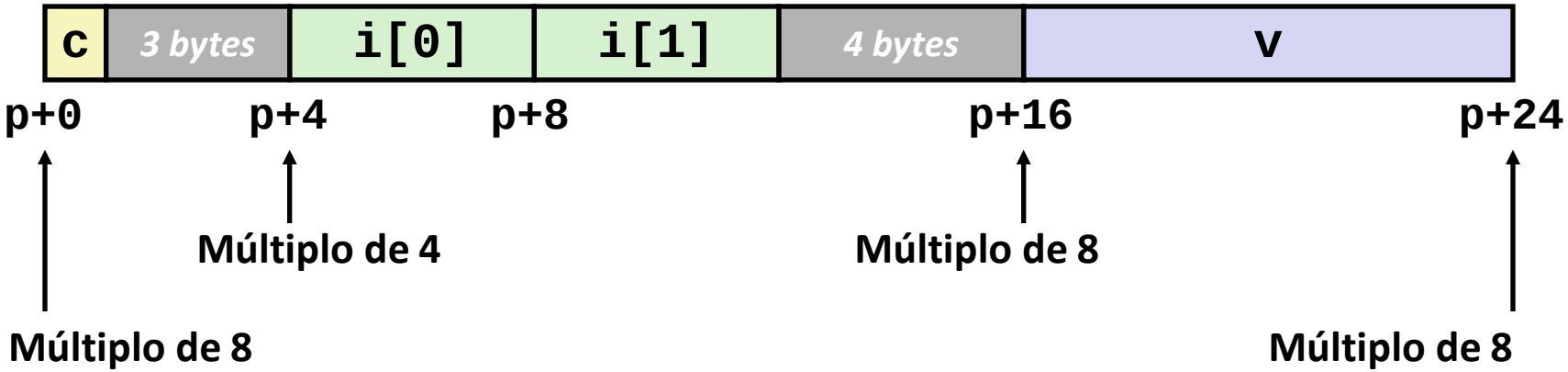
- **1 byte: char, …**
  - sin restricciones en la dirección
- **2 bytes: short, …**
  - el LSb† (bit más bajo) de la dirección debe ser 0_2
- **4 bytes: int, float, …** *(y long en Windows!!!)*
  - los 2 LSb's de la dirección deben ser 00_2
- **8 bytes: double, long, char *, …**
  - los 3 LSb's de la dirección deben ser 000_2
- **16 bytes: long double** (GCC en Linux x86-64)
  - los 4 LSb's de la dirección deben ser 0000_2

† *"least significant bits"*

Cumpliendo Alineamiento en Estructuras

- **Dentro de la estructura:**
  - Deben cumplirse requisitos alinm. de cada elemento
- **Colocación global de la estructura**
  - Cada estructura tiene un requisito de alineamiento **K**
    - **K** = Mayor alineamiento de cualquier elemento
  - Dirección inicial y longitud estructura deben ser múltiplos de **K**
- **Ejemplo:**
  - K = 8, debido al elemento **`double`**

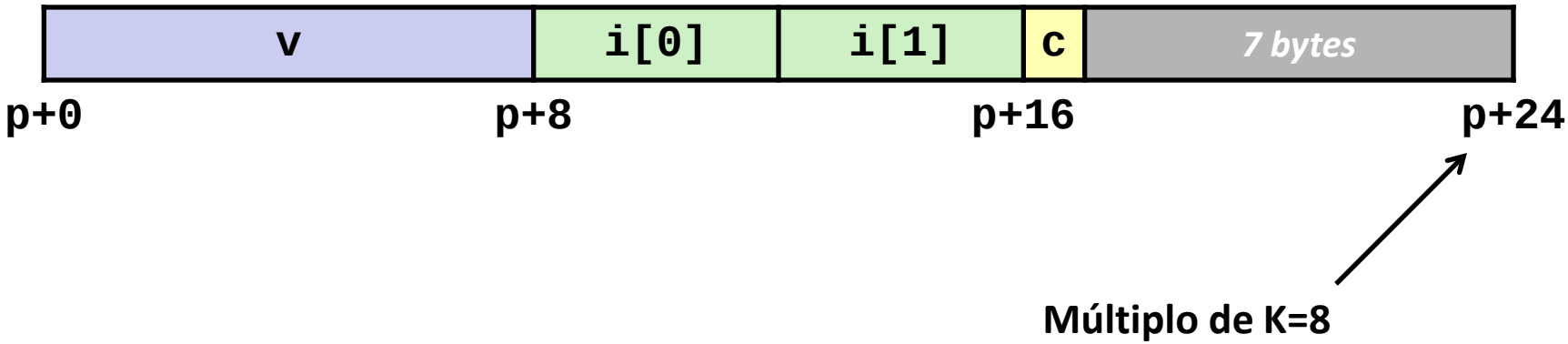
```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```



Cumpliendo Requisito Alineamiento Global

- Si el requisito de alineamto. máximo es K
- La struct debe ocupar glob. múltiplo de K

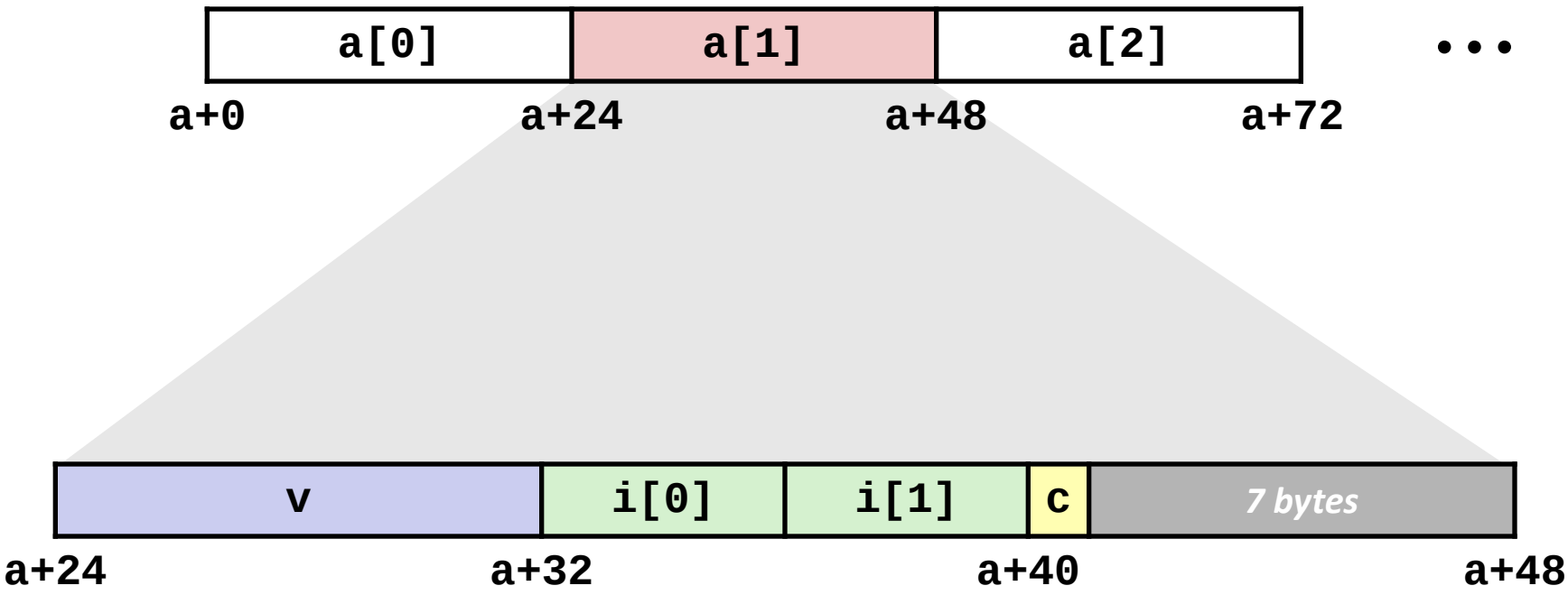
```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} *p;
```



Arrays de Estructuras

- Longitud global estructura[†] múltiplo de K
- Cumplir requisitos alnmto. de cada elemento

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

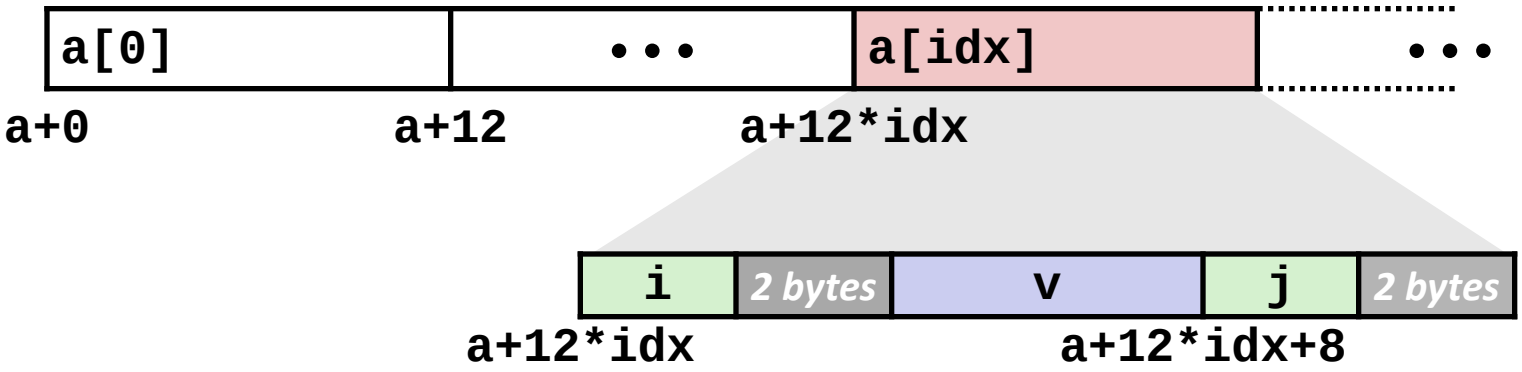


† y por consiguiente del array, al ser nº entero estructuras contiguas

Acceso a Elementos del Array

- **Calcular desplazamiento elem. array: 12i**
  - sizeof(S3)*i, incluyendo espaciadores alineamiento
- **Elemento j @ despl. 8 dentro de estructura**
- **El ensamblador genera desplazamiento a+8**
  - Resuelto durante enlazado (en tiempo de *link*)

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




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

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

† *"Move with Zero-extend Word to Long",mnemotécnico MOVZX según Intel*

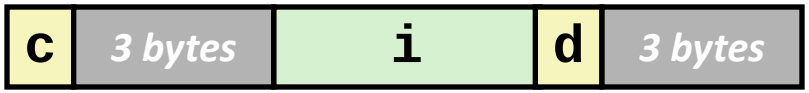
Ahorro de Espacio

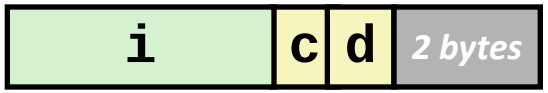
- Poner primero los tipos de datos grandes

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

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

- Efecto (K=4)



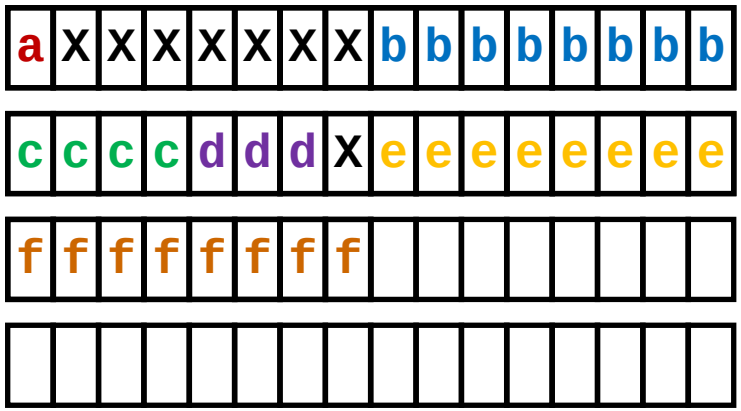


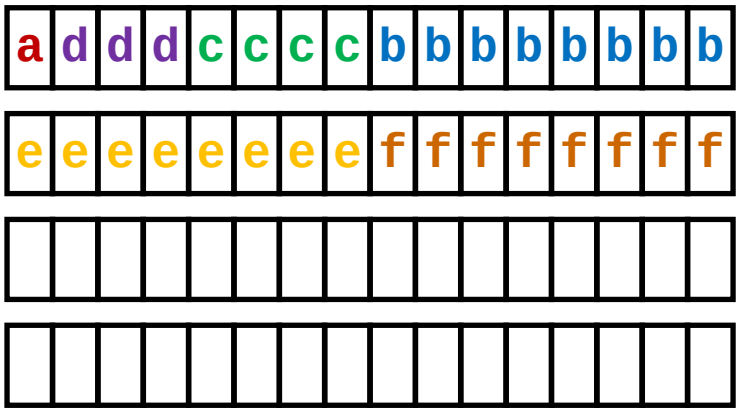
Ejemplo: Ejercicio sobre structs

- Indicar cómo se ubicaría en memoria la siguiente estructura (gcc Linux x86_64), marcando las posiciones ocupadas por cada campo con su nombre, y las de relleno (tanto interno como global) con una X. Repetir el ejercicio reordenando los campos para obtener el máximo ahorro de memoria posible. (ver ~ Ex.Probl.Sep'13)

```
struct foo {
  char a;
  long b;
  float c;
  char d[3];
  int *e;
  short *f;
} mystruct1;
```

```
struct bar {
  char a;
  char d[3];
  float c;
  long b;
  int *e;
  short *f;
} mystruct2;
```





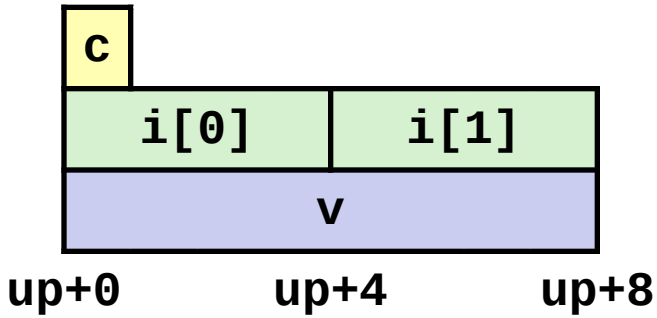
Programación Máquina IV: Datos

- **Arrays**
  - Uni-dimensionales
  - Multi-dimensionales (anidados)
  - Multi-nivel
- **Estructuras**
  - Ubicación
  - Acceso
  - Alineamiento
- **Uniones**

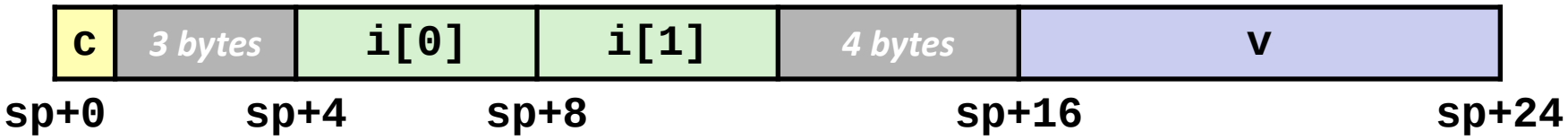
Ubicación† de Uniones

- Reservar† de acuerdo al elemento más grande
- Sólo puede usarse un campo a la vez

```
union U1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *up;
```



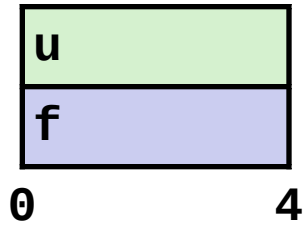

```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *sp;
```



† *"alloc(ation)/(ate)"*

Uso de Uniones para Acceder Patrones Bit

```
typedef union {
  float f;
  unsigned u;
} bit_float_t;
```




```
float bit2float(unsigned u)
{
  bit_float_t arg;
  arg.u = u;
  return arg.f;
}
```

¿Lo mismo que (float) u ?

```
unsigned float2bit(float f)
{
  bit_float_t arg;
  arg.f = f;
  return arg.u;
}
```

¿Lo mismo que (unsigned) f ?

Ordenamiento de Bytes†: un Repaso

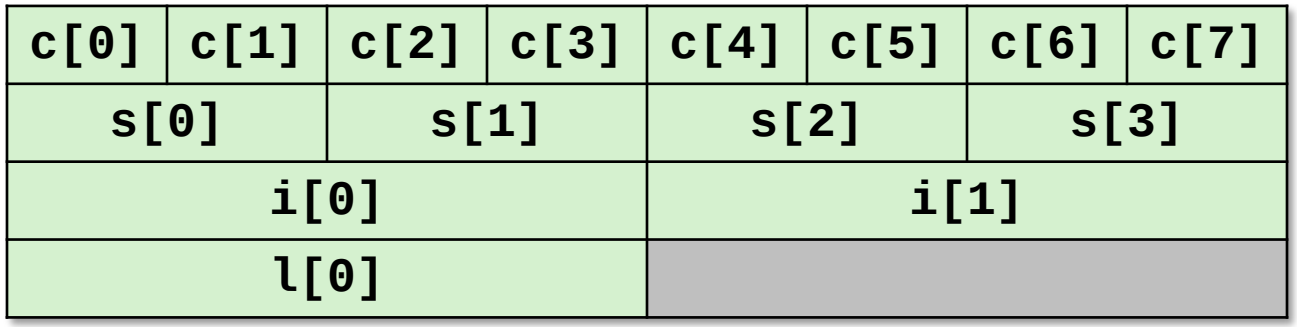
- **Idea**
  - Palabras short/long/quad, almacenadas en mem. como 2/4/8B consecutivos
  - ¿Cuál es el byte más (menos) significativo?
  - Puede causar problemas al intercambiar datos binarios entre máquinas
- **Big Endian‡ (extremo mayor)**
  - El byte más significativo está en la dirección más baja (“viene primero”)
  - Sparc
- **Little Endian‡ (extremo menor)**
  - El byte menos significativo está en la dirección más baja
  - Intel x86, ARM con Android e IOS
- **Bi Endian**
  - Se puede configurar de cualquiera de las dos formas
  - ARM

† “byte ordering” en inglés, se refiere al orden de bytes en palabras, no a ordenar un array de bytes = “sorting”
‡ “big/little endian” = “partidario extremo mayor/menor”, ver libro, §2.1.3, Aside: Origin of "endian"

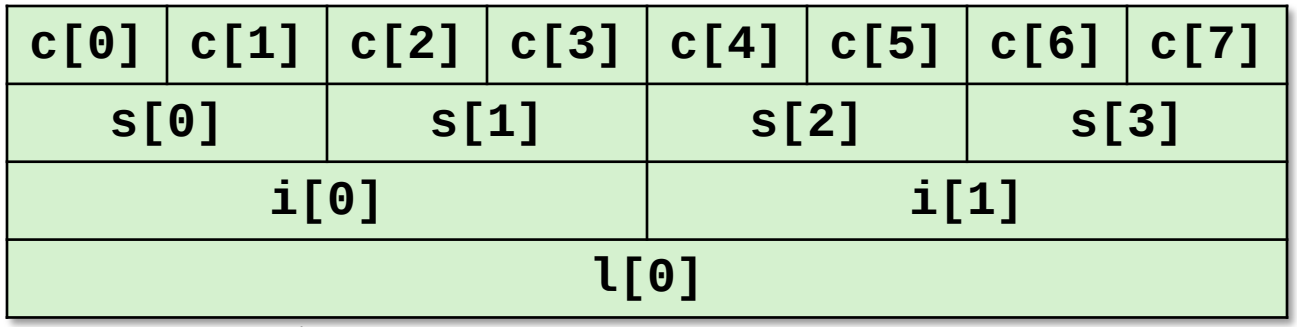
Ejemplo de Ordenamiento de Bytes

```
union {
  unsigned char c[8];
  unsigned short s[4];
  unsigned int i[2];
  unsigned long l[1];
} dw;
```

32-bit



64-bit

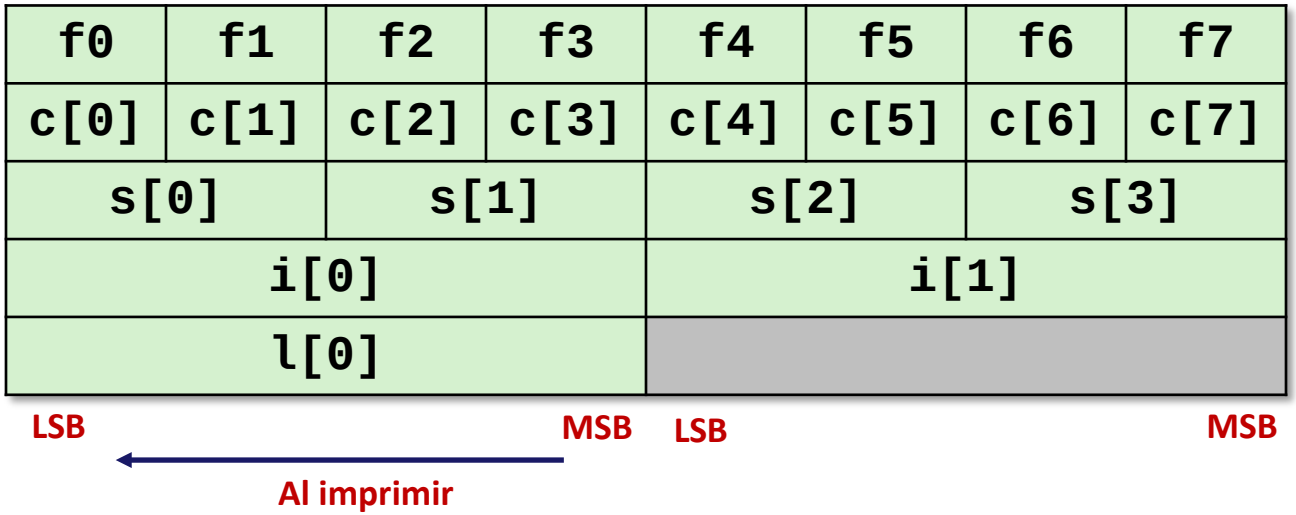


Ejemplo de Ordenamiento de Bytes (Cont).

```
int j;
for (j = 0; j < 8; j++)
    dw.c[j] = 0xf0 + j;

printf("Characters 0-7 ==
[0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x]\n",
    dw.c[0], dw.c[1], dw.c[2], dw.c[3],
    dw.c[4], dw.c[5], dw.c[6], dw.c[7]);

printf("Shorts 0-3 == [0x%x,0x%x,0x%x,0x%x]\n",
    dw.s[0], dw.s[1], dw.s[2], dw.s[3]);

printf("Ints 0-1 == [0x%x,0x%x]\n",
    dw.i[0], dw.i[1]);

printf("Long 0 == [0x%lx]\n",
    dw.l[0]);
```

Ordenamiento de Bytes en IA32

Little Endian

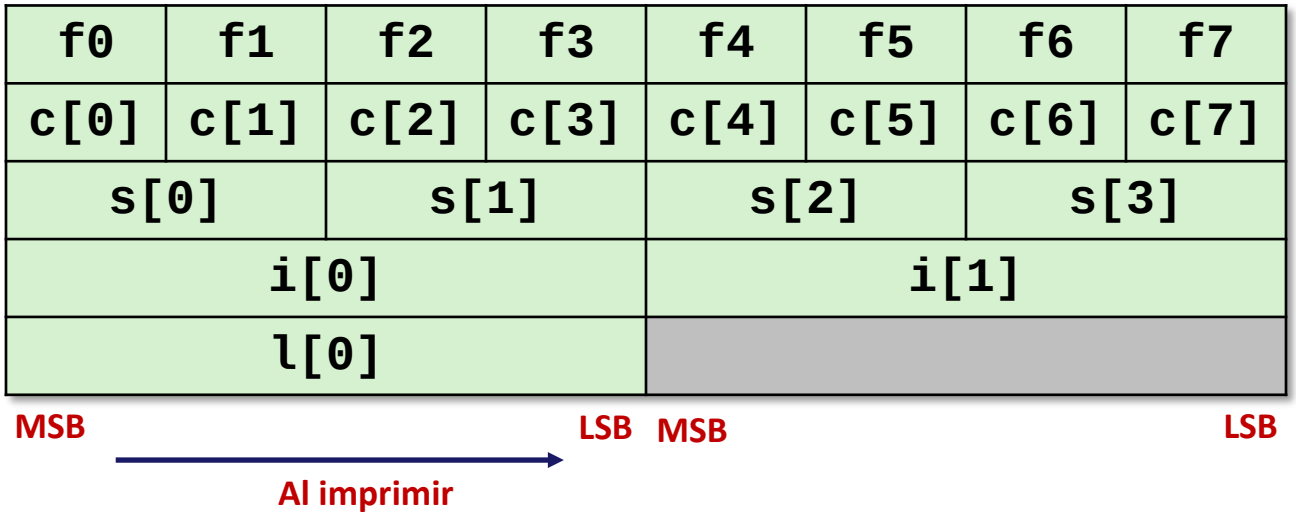


Salida :

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf1f0,0xf3f2,0xf5f4,0xf7f6]
Ints       0-1 == [0xf3f2f1f0,0xf7f6f5f4]
Long       0   == [0xf3f2f1f0]
```

Ordenamiento de Bytes en Sun

Big Endian

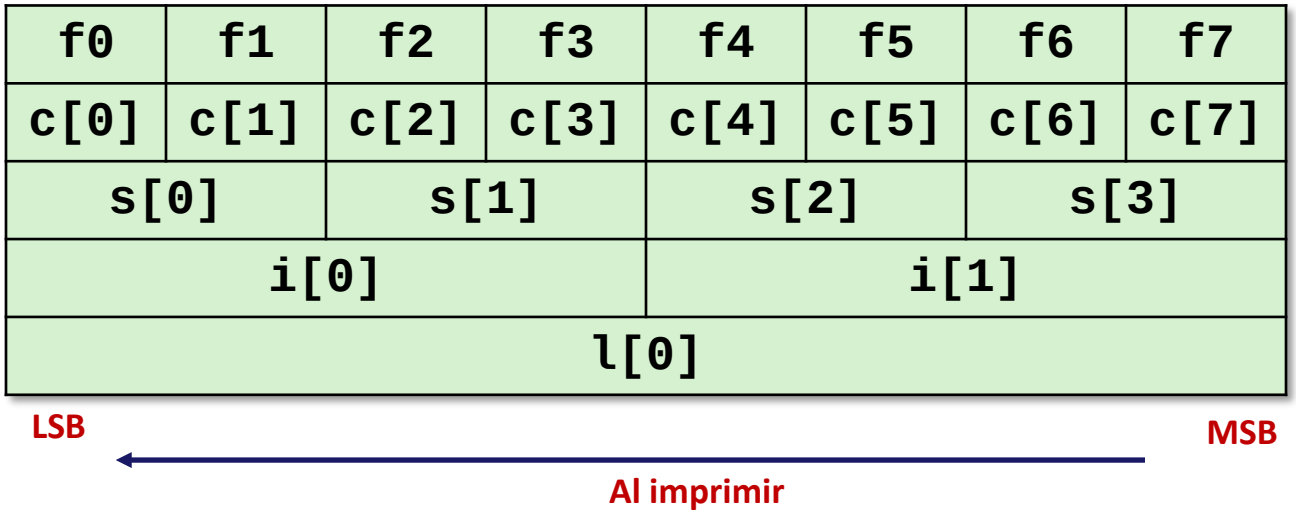


Salida en Sun:

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf0f1,0xf2f3,0xf4f5,0xf6f7]
Ints       0-1 == [0xf0f1f2f3,0xf4f5f6f7]
Long       0   == [0xf0f1f2f3]
```

Ordenamiento de Bytes en x86-64

Little Endian



Salida en x86-64:

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf1f0,0xf3f2,0xf5f4,0xf7f6]
Ints       0-1 == [0xf3f2f1f0,0xf7f6f5f4]
Long       0   == [0xf7f6f5f4f3f2f1f0]
```

Resumen de Tipos Compuestos en C

- **Arrays**
  - Reserva de memoria contigua para almacenar elementos
  - Se usa aritmética de indexación para localizar elementos individuales
  - Puntero al primer elemento
  - Sin chequeo de límites
- **Estructuras**
  - Reserva de una sola región de memoria, campos van en el orden declarado
  - Se accede usando desplazamientos determinados por el compilador
  - Puede requerir relleno interno y externo para cumplir con el alineamiento
- **Combinaciones**
  - Se pueden anidar representación estuctura y array arbitrariamente
  - Relleno externo estructuras garantiza alineamiento en arrays de structs
- **Uniones**
  - Declaraciones superpuestas
  - Forma de soslayar el sistema de promoción de tipos en C

Guía de trabajo autónomo (4h/s)

- **Estudio:** del Cap.3 CS:APP (Bryant/O'Hallaron)
  - Array Allocation and Access
    - § 3.8 pp.291-301
  - Heterogeneous Data Structures
    - § 3.9 pp.301-312

- **Ejercicios:** del Cap.3 CS:APP (Bryant/O'Hallaron)
  - Probl. 3.36 – 3.40 § 3.8, pp.292,294,295,298_2
  - Probl. 3.41 – 3.45 § 3.9, pp.304,305,308,311_2

Bibliografía:

[BRY16] Cap.3 Computer Systems: A Programmer's Perspective 3rd ed. Bryant, O'Hallaron. Pearson, 2016
Signatura ESIIT/C.1 BRY com