Puntatori

> *"The name of the song is called "Haddocks' Eyes".*
> *"Oh, that's the name of the song, is it?" Alice said, trying to feel interested.*
> *"No, you don't understand," the Knight said, looking a little vexed.*
> *"That's what the name is called. The name really is 'The Aged Aged Man.' "*
> *"Then I ought to have said 'That's what the song is called' ?" Alice corrected herself.*
> *"No, you oughtn't: that's quite another thing! The song is called 'Ways and Means,' but that is only what it's called, you know!"*
> *"Well, what is the song, then?" said Alice, who was by this time completely bewildered.*
> *"I was coming to that," the Knight said. "The song really is 'A-sitting On A Gate,' and the tune's my own invention."*
>
> Lewis Caroll. Through the Looking Glass.

Carrol sottolinea la distinzione tra le cose, i nomi delle cose e i nomi dei nomi delle cose.

Puntatori

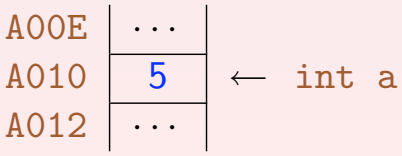
L'astrazione offerta dai puntatori cattura la distinzione tra una cosa e il suo nome:

COSA	*NOME*
pagina web dipartimento	`http://www.di.unipi.it/`
indirizzo e-mail	`chiara@di.unipi.it`
numero ufficio	322*DO*
studente	445654
`int a`	*&a*

Cosa è una variabile?

Quando si dichiara una variabile, ad es. `int a;` si rende noto il nome e il tipo della variabile. Il compilatore

- alloca l'opportuno numero di byte di memoria per contenere il valore associato alla variabile (ad es. `4`).
- aggiunge il simbolo `a` alla tavola dei simboli e l'indirizzo del blocco di memoria ad esso associato (ad es. `A010` che è un indirizzo esadecimale)
- Se poi troviamo l'assegnamento `a = 5;` ci aspettiamo che al momento dell'esecuzione il valore `5` venga memorizzato nella locazione di memoria assegnata alla variabile `a`
- Per ottenere l'indirizzo di `a` basta usare l'operatore di inidirizzamento `&a`.



Cosa è una variabile?

Alla variabile `a` si associa quindi:

- il valore della locazione di memoria, ovvero l'indirizzo `A010` e
- il valore dell'intero che vi viene memorizzato, ovvero `5`.
- Nell'espressione `a = 5;` con `a` ci riferiamo alla locazione di memoria associata alla variabile (lvalue): il valore `5` viene copiato all'indirizzo `A010`.
- nell'espressione `b = a;` (dove `b` è ancora un intero) `a` si riferisce al valore (rvalue o object): il valore associato ad `a` viene copiato all'indirizzo di `b`

È ragionevole avere anche variabili apposite che memorizzino indirizzi e che dipendano dal tipo di variabili memorizzate a quegli indirizzi.

Puntatori

- Proprietà della variabile `a` nell'esempio:

  nome: `a`
  tipo: `int`
  valore: `5`
  indirizzo: `A010` (che è fissato una volta per tutte)
- In C è possibile denotare e quindi manipolare gli indirizzi di memoria in cui sono memorizzate le variabili.
- Abbiamo già visto nella `scanf`, l'operatore indirizzo "`&`", che applicato ad una variabile, denota l'indirizzo della cella di memoria in cui è memorizzata (nell'es. `&a` ha valore `0xA010`).
- Le variabili di tipo puntatore o puntatori servono per memorizzare gli indirizzi delle variabili.

Tipo di dato: Puntatore

Un puntatore è una variabile che contiene l'indirizzo in memoria di un'altra variabile (del tipo dichiarato)

Esempio: dichiarazione **int** `*pi;`

- La variabile `pi` è di tipo puntatore a intero
- È una variabile come tutte le altre, con le seguenti proprietà:

  nome: `pi`
  tipo: puntatore ad intero (ovvero, indirizzo di un intero)
  valore: inizialmente casuale
  indirizzo: fissato una volta per tutte
- Più in generale:
  Sintassi `tipo *variabile;`
- Al solito, più variabili dello stesso tipo possono essere dichiarate sulla stessa linea

  `tipo *variabile`$_1$`, ..., *variabile`$_n$`;`

Esempio:

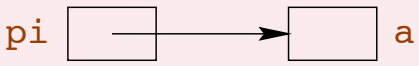
```
int *pi1, *pi2, i, *pi3, j;
float *pf1, f, *pf2;
```

- Abbiamo dichiarato:

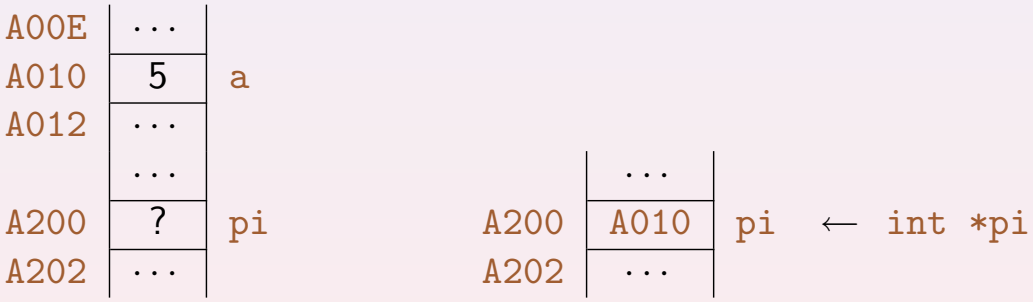
  `pi1`, `pi2`, `pi3` di tipo puntatore ad `int`
  `i`, `j` di tipo `int`
  `pf1`, `pf2` di tipo puntatore a `float`
  `f` di tipo `float`

- Una variabile puntatore può essere inizializzata usando l'operatore di indirizzo.

  Esempio: `pi = &a;`
  - il valore di `pi` viene inizializzato all'indirizzo della variabile `a`
  - si dice che `pi` punta ad `a` o che `a` è l'oggetto puntato da `pi`
  - lo rappresenteremo spesso come nel seguito:



Prima `p=&a` Dopo



Operatore di dereferenziamento "*"

- Si può accedere al contenuto della cella di memoria puntata, attraverso l'operatore "`*`".
- `*` fa riferimento all'oggetto puntato, mentre `&` all'indirizzo.
- può essere utilizzato per l'assegnamento **Esempio:**

```
int *pi;   /* dich.  di puntatore ad intero */
int a = 5, b;   /* dich.  variabili intere */

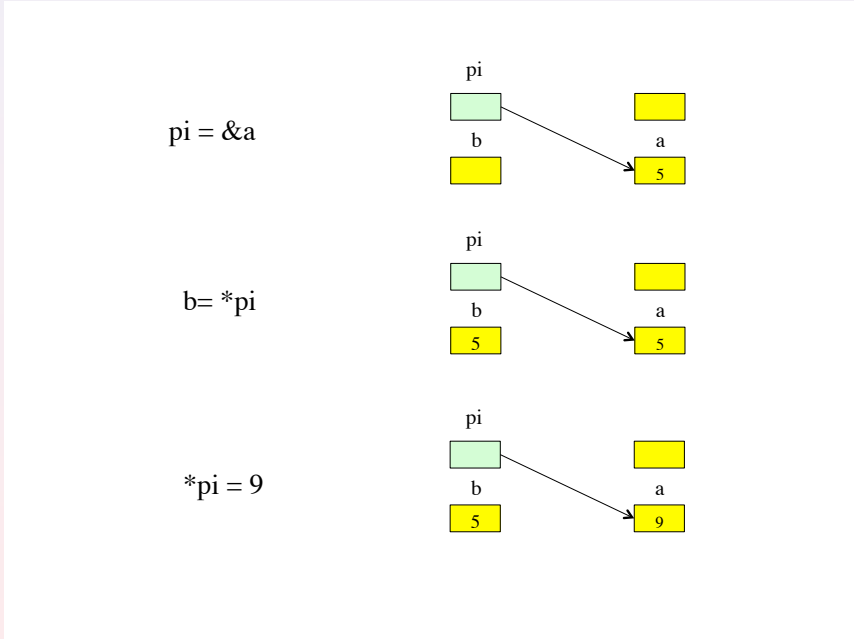
pi = &a;   /* pi punta ad a ==> *pi sta per a */
b = *pi;  /* assegna a b il valore della var.puntata
          da pi, ovvero il valore di a:  5 */
*pi = 9; /* assegna 9 alla variabile puntata da pi,
          ovvero ad a */
```

- Non confondere le due occorrenze di "`*`":
  - "`*`" in una dichiarazione serve per dichiarare una variabile di tipo puntatore, ad es. `int *pi;`
  - "`*`" in un'espressione è l'operatore di dereferenziamento, ad es. `b = *pi;`

Operatori di dereferenziamento "*" e di indirizzo "&"

- hanno priorità più elevata degli operatori binari, ad es. in `y =*pi +2`, prima si incrementa l'oggetto puntato da `pi` e poi si assegna il risultato a `y`.
- "`*`" è associativo a destra
  Es.: `**p` è equivalente a `*(*p)`
- "`&`" può essere applicato solo ad una variabile;
  `&a` non è una variabile $\Longrightarrow$ "`&`" non è associativo
- "`*`" e "`&`" sono uno l'inverso dell'altro
  - data la dichiarazione `int a;`
    `*&a` è un modo alternativo per denotare `a` (sono entrambi variabili)
  - data la dichiarazione `int *pi;`
    `&*pi` ha valore (un indirizzo) uguale al valore di `pi`
    però:
    - `pi` è una variabile
    - `&*pi` non lo è (ad es., non può essere usato a sinistra di "=")

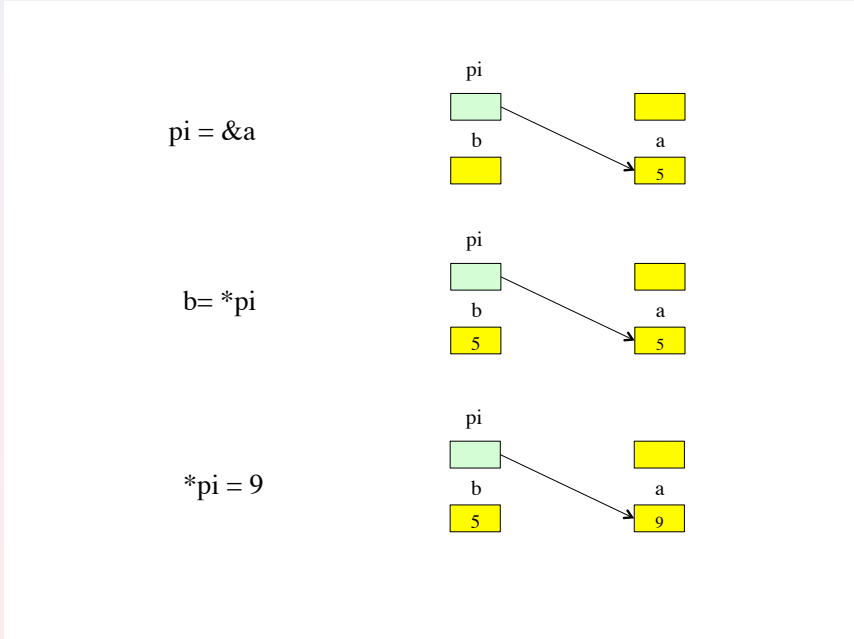
Operatori di dereferenziamento "*" e di indirizzo "&"



Ricapitolando

- se `a` è un intero, allora `&a` è un puntatore a `a` (indirizzo di memoria di `a`)
- `pi` è un puntatore a un intero, allora `*pi` è l'intero e può apparire dovunque possa apparire l'intero corrispondente `a`. Ad es.:
  `*pi = *pi +1`

Operatori di dereferenziamento "*" e di indirizzo "&"



Stampa di puntatori

- I puntatori si possono stampare con `printf` e specificatore di formato "%p" (stampa in formato esadecimale).

Esempio:

A00E	...	
A010	5	a
A012	A010	pi
	...	

```
int a = 5, *pi;
pi = &a;
printf("ind. di a = %p\n", &a);  /* stampa 0xA010 */
printf("val. di pi = %p\n", pi);  /* stampa 0xA010 */
printf("val. di &*pi = %p\n", &*pi); /*stampa 0xA010 */
printf("val. di a = %d\n", a);  /* stampa 5 */
printf("val. di *pi = %d\n", *pi);  /* stampa 5 */
printf("val. di *&a = %d\n", *&a);  /* stampa 5 */
```

- Si può usare `%p` anche con `scanf`, ma ha poco senso leggere un indirizzo.

Esempio: Scambio del valore di due variabili.

```
int a = 10, b = 20, temp;
temp = a;
a = b;
b = temp;
```

Tramite puntatori:

```
int a = 10, b = 20, temp;
int *pa, *pb;

pa = &a;   /* *pa diventa un alias per a */
pb = &b;   /* *pb diventa un alias per b */

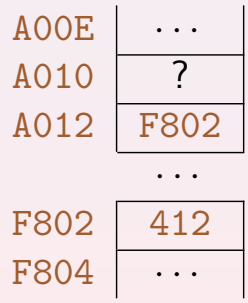
temp = *pa;
*pa = *pb;
*pb = temp;
```


Inizializzazione di variabili puntatore

- I puntatori (come tutte le altre variabili) devono essere inizializzati prima di poter essere usati.

  $\Longrightarrow$ È un errore dereferenziare una variabile puntatore non inizializzata.

  Esempio: `int a, *pi;`



  `a = *pi;` $\Longrightarrow$ ad `a` viene assegnato il valore 412

  `*pi = 500;` $\Longrightarrow$ scrive 500 nella cella di indirizzo `F802`

- Non sappiamo a cosa corrisponde questa cella di memoria!!!
  $\Longrightarrow$ la memoria può venire corrotta

Tipo di variabili puntatore

- Il tipo di una variabile puntatore è "puntatore a `tipo`". Il suo valore è un indirizzo.
- I tipi puntatore sono indirizzi e non interi.

```
int a, *pi;
a = pi;
```

- Compilando si ottiene un avvertimento o *warning*: "assignment makes integer from pointer without a cast"
- Due variabili di tipo puntatore a tipi diversi sono incompatibili.

```
int x, *pi; float *pf;
```

`x = pi;`	assegnazione `int*` a `int` warning: "assignment makes integer from pointer ..."
`pf = x;`	assegnazione `int` a `float*` warning: "assignment makes pointer from integer ..."
`pi = pf;`	assegnazione `float*` a `int*` warning: "assignment from incompatibile pointer type"

- Perché il C distingue tra puntatori di tipo diverso?
- Se tutti i tipi puntatore fossero identici non sarebbe possibile determinare a tempo di compilazione il tipo di `*p`.

Esempio:

```
puntatore p;
int i; char c; float f;
```

- Potrei scrivere:

```
p = &c;
p = &i;
p = &f;
```

- Il tipo di `*p` verrebbe a dipendere dall'ultima assegnazione che è stata fatta (nota solo a tempo di esecuzione).
- Ad esempio, quale sarebbe il significato di `/` in `i/*p`: divisione intera o reale?

Possibili rischi con i puntatori: aliasing

```
*pi = 3;
*qi = 7;
pi = qi;
*qi = 5;
```

- Adesso il valore `*qi` puntato da `qi` è 5, ma come effetto collaterale 5 è anche il valore `*pi` puntato da `pi`.
- Il problema è una conseguenza dell'*aliasing*, ovvero del fatto che uno stesso oggetto venga chiamato in due modi diversi.
-

Funzione `sizeof` con puntatori

- La funzione `sizeof` restituisce l'occupazione in memoria in byte di una variabile (anche di tipo puntatore) o di un tipo.
- I puntatori occupano lo spazio di un indirizzo.
- L'oggetto puntato ha invece la dimensione del tipo puntato.

```
char *pc;
int *pi;
double *pd;
printf("%d %d %d ", sizeof(pc), sizeof(pi), sizeof(pd));
printf("%d %d %d\n", sizeof(char *), sizeof(int *),
                     sizeof(double *));
printf("%d %d %d ", sizeof(*pc), sizeof(*pi), sizeof(*pd));
printf("%d %d %d\n", sizeof(char), sizeof(int),
                     sizeof(double));
```

```
4 4 4   4 4 4
1 2 8   1 2 8
```

Operazioni con puntatori

Sui puntatori si possono effettuare diverse operazioni:

- di dereferenziamento

  Esempio:

  ```
  int *p, i;
  ...
  i = *p;
  ```

  Il valore della variabile intera `i` è ora lo stesso del valore dell'intero puntato da `p`.

- di assegnamento

  Esempio:

  ```
  int *p, *q;
  ...
  p = q;
  ```

  - N.B. `p` e `q` devono essere dello stesso tipo (altrimenti bisogna usare l'operatore di cast).

  Dopo l'assegnamento precedente, `p` punta allo stesso intero a cui punta `q`.

- di confronto

  Esempio:

  ```
  if (p == q) ...
  ```

  I due puntatori hanno lo stesso valore.

  Esempio:

  ```
  if (p > q) ...
  ```

  Ha senso? Con quello che abbiamo visto finora no. Vedremo che ci sono situazioni in cui ha senso.

Aritmetica dei puntatori

Sui puntatori si possono anche effettuare operazioni aritmetiche, con opportune limitazioni

- somma o sottrazione di un intero
- sottrazione di un puntatore da un altro

Somma e sottrazione di un intero

Se `p` è un puntatore a `tipo` e il suo valore è un certo indirizzo `ind`, il significato di `p+1` è il primo indirizzo utile dopo `ind` per l'accesso e la corretta memorizzazione di una variabile di tipo `tipo`.

Esempio:

```
int *p, *q;
....
q = p+1;
```

Se il valore di `p` è l'indirizzo `100`, il valore di `q` dopo l'assegnamento è `104` (assumendo che un intero occupi 4 byte).

- Il valore calcolato in corrispondenza di un'operazione del tipo `p+i` dipende dal tipo T di `p` (analog. per `p-i`):

  Op. Logica: p = p+1 Op. Algebrica: p = p +`sizeof(T)`

  Esempio:

  ```
  int *pi;
  *pi = 15;
  pi=pi+1;
  ```
  $\Longrightarrow$ `pi` punta al prossimo `int` (4 byte dopo)

  Esempio:

  ```
  double *pd;
  *pd = 12.2;
  pd = pd+3;
  ```
  $\Longrightarrow$ `pd` punta a 3 `double` dopo (24 byte dopo)

  Esempio:

  ```
  char *pc;
  *pc = 'A';
  pc = pc - 5;
  ```
  $\Longrightarrow$ `pc` punta a 5 `char` prima (5 byte prima)
- Possiamo anche scrivere: `pi++;` `pd+=3;` `pc-=5;`
- Questa operazione ci servirà per i puntatori ad array.

Puntatore a puntatore

- Le variabili di tipo puntatore sono variabili come tutte le altre: in particolare hanno un indirizzo che può costituire il valore di un'altra variabile di tipo puntatore a puntatore.

Esempio:

```
int *pi, **ppi, x=10;
pi = &x;
ppi = &pi;
printf("pi = %p ppi = %p *ppi = %p\n", pi, ppi, *ppi);
printf("*pi = %d **ppi = %d x = %d\n", *pi, **ppi, x);
```

```
pi = 0x22ef34   ppi = 0x22ef3c   *ppi = 0x22ef34
*pi = 10        **ppi = 10        x = 10
```


Esempi

```
int a, b, *p, *q;
a=10;
b=20;
p = &a;
q = &b;
*q = a + b;
a = a + *q;
q = p;
*q = a + b;
printf("a=%d b=%d *p=%d *q=%d", a,b,*p,*q);
```

Quali sono i valori stampati dal programma?

Esempi (contd.)

```
int *p, **q;
int a=10, b=20;
q = &p;
p = &a;
*p = 50;
**q = 100;
*q = &b;
*p = 50;
a = a+b;
printf("a=%d   b=%d  *p=%d  **q=%d\n", a, b, *p, **q);
```

Quali sono i valori stampati dal programma?

Relazione tra vettori e puntatori

- In generale non sappiamo cosa contengono le celle di memoria adiacenti ad una data cella.
- L'unico caso in cui sappiamo quali sono le locazioni di memoria successive e cosa contengono è quando utilizziamo dei vettori.
- In C il nome di un vettore `vet` è in realtà un puntatore alla prima locazione dell'array `vet[0]`. *(Infatti non posso assegnare un array ad un altro)*

  int `vet[10];` $\Longrightarrow$ `vet` e `&vet[0]` hanno lo stesso valore (un indirizzo), basta provare a stamparli
- Un puntatore può puntare il primo elemento di un vettore.

  ```
  int vet[5];
  int *pi;
  pi = vet;      è equivalente a   pi = &vet[0];
  ```

Accesso agli elementi di un vettore

Esempio:

```
int vet[5];
int *pi = vet;
*(pi + 3) = 28;
```

- `pi+3` punta all'elemento di indice 3 del vettore (il quarto elemento).
- 3 viene detto offset (o scostamento) del puntatore.
- N.B. Servono le `()` perchè `*` ha priorità maggiore di `+`. Che cosa denota `*pi + 3` ?
- Osservazione:

`&vet[3]`	equivale a	`pi+3`	equivale a	`vet+3`
`*&vet[3]`	equivale a	`*(pi+3)`	equivale a	`*(vet+3)`

- Inoltre, `*&vet[3]` equivale a `vet[3]`
  - In C, `vet[3]` è solo un modo alternativo di scrivere `*(vet+3)`.
- Notazioni per gli elementi di un vettore:
  - `vet[3]` $\Longrightarrow$ notazione con puntatore e indice
  - `*(vet+3)` $\Longrightarrow$ notazione con puntatore e offset

- Un esempio che riassume i modi in cui si può accedere agli elementi di un vettore.

```
int vet[5] = {11, 22, 33, 44, 55};
int *pi = vet;
int offset = 3;

/* assegnamenti equivalenti */

vet[offset] = 88;
*(vet + offset) = 88;
pi[offset] = 88;
*(pi + offset) = 88;
```

- **Attenzione**: a differenza di un normale puntatore, il nome di un vettore è un puntatore costante
  - il suo valore non può essere modificato!
- ```
  int vet[10];
  int *pi;
  ```
  `pi = vet;` corretto

  `pi++;` corretto

  `vet++;` scorretto: `vet` è un puntatore costante!
- È questo il vero motivo per cui non è possibile assegnare un vettore ad un altro utilizzando i loro nomi

  ```
  int a[3]={1,1,1}, b[3] i;
  for (i=0; i<3; i++)
      b[i] = a[i];
  ```

  ma non `b=a` (`b` è un puntatore costante!)

Modi alternativi per scandire un vettore

```
int a[LUNG]= {.......};
int i, *p=a;
```

- I seguenti sono tutti modi equivalenti per stampare i valori di `a`

```
for (i=0; i<LUNG; i++)
     printf("%d", a[i]);

for (i=0; i<LUNG; i++)
    printf("%d", *(a+i));

for (p=a; p<a+LUNG; p++)
    printf("%d", *p);
```

```
for (i=0; i<LUNG; i++)
      printf("%d", p[i]);

for (i=0; i<LUNG; i++)
     printf("%d", *(p+i));
```

- Non è invece lecito un ciclo del tipo

  ```
  for ( ; a<p+LUNG; a++)
      printf("%d", *a);
  ```

  perché? Perché a++ è un assegnamento sul puntatore costante a!.
  ```

Differenza tra puntatori

- Il parallelo tra vettori e puntatori ci consente di capire il senso di un'operazione del tipo `p-q` dove `p` e `q` sono puntatori allo stesso tipo.

```
int *p, *q;
int a[10]={0};
int x;
...
x=p-q;
```

- Il valore di `x` è il numero di interi compresi tra l'indirizzo `p` e l'indirizzo `q`.
- Quindi se nel codice precedente `...` sono le istruzioni:

```
q = a;
p = &a[5];
```

il valore di `x` dopo l'assegnamento è 5.

Esempio

```
double b[10] = {0.0};
double *fp, *fq;
char   *cp, *cq;

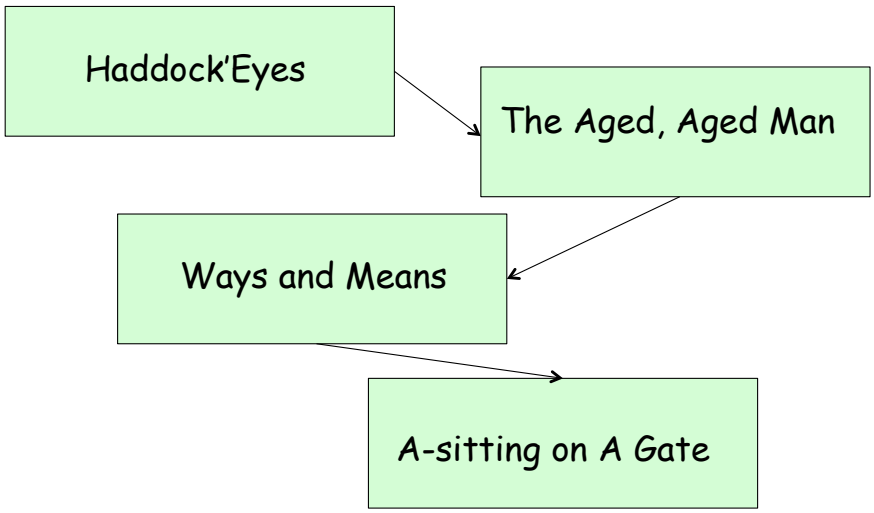
fp = b+5;
fq = b;

cp = (char *) (b+5);
cq = (char *) b;

printf("fp=%p  cp=%p  fq=%p  cq=%p\n", fp, cp, fq, cq);
printf("fp-fq= %d,   cp-cq=%d\n", fp-fq, cp-cq);
```

```
fp=0x22fe3c  cp=0x22fe3c  fq=0x22fe14  cq=0x22fe14
fp-fq=5   cp-cq=40
```

Diagramma di Alice



Passaggio dei parametri per indirizzo nelle funzioni

- Per poter modificare il valore dei parametri attuali, alcuni linguaggi (es. Pascal) prevedono un'ulteriore modalità di passaggio dei parametri, il passaggio per indirizzo
  - che informalmente, fa in modo che, al momento della chiamata, il parametro formale costituisca un modo alternativo per accedere al parametro attuale (che deve essere una variabile e non una generica espressione)
  - durante l'esecuzione del corpo, ogni riferimento (e/o modifica) al parametro formale è un riferimento al parametro attuale.
- In C esiste solo il passaggio per valore, ma quello per indirizzo si può realizzare come segue:
  1. si utilizza un parametro formale di tipo puntatore
  2. all'interno del corpo della procedura ogni riferimento al parametro formale avviene attraverso l'operatore di dereferenziazione $*$ (parametro attuale e il parametro formale si riferiscono alla stessa cella)
  3. al momento della chiamata, si utilizza come parametro attuale un indirizzo di una variabile (utilizzando, se necessario, l'operatore di indirizzo &).

Esempio: Riprendiamo l'esempio del valore assoluto.

```
void abs(int *x)
{
 if (*x < 0)
   *x = -(*x);
}
```

- Nel chiamante si utilizzano chiamate del tipo `abs(&z)` per ottenere l'effetto di rimpiazzare il valore della variabile `z` con il suo valore assoluto.

```
int z = -5;
abs(&z);        ⟹    x = &z;
                      if (*x < 0) *x = -(*x);
```

- N.B. Il passaggio dei parametri è sempre per valore, ma questa volta viene passato un valore puntatore che consente di accedere alla variabile del chiamante.
- Nell'esempio, l'assegnamento `*x = -(*x);` ha come effetto la modifica della variabile `z` del chiamante, in quanto il valore di `x` è `&z` e dunque `*x` è proprio `z`.

Esempio: Procedura per lo scambio di due variabili intere

```
void swap(int *x, int *y)
{
  int temp = *x;
  *x = *y;
  *y = temp;
}
```

- Esempio di utilizzo: programma che legge due valori interi e li stampa ordinati.

```
main()   {
int a, b;
scanf("%d", &a);
scanf("%d", &b);
if (a > b) swap(&a, &b);
printf("Valore minimo: %d\n", a);
printf("Valore massimo: %d\n", b);   }
```