



**POLITECNICO**  
MILANO 1863



# **Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI**

**Pierpaolo Boffi**

Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

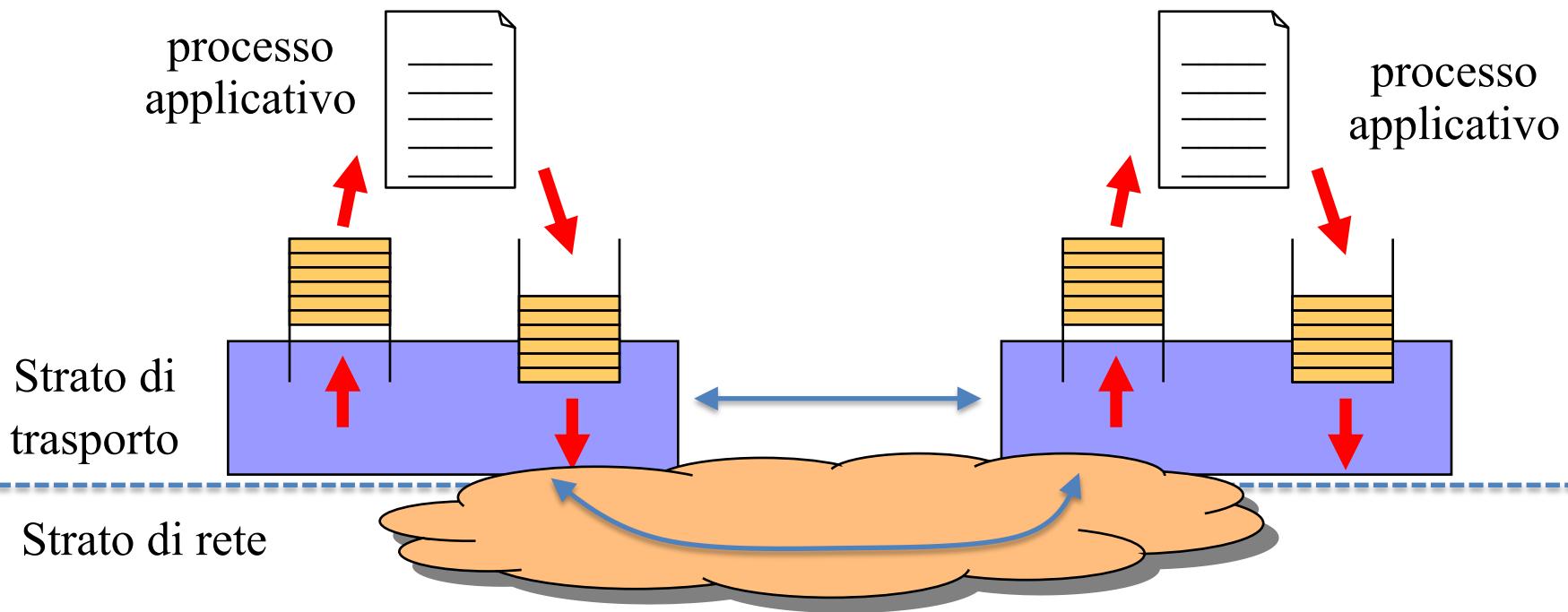


## 8 - Livello di Rete

**Indirizzo IP, inoltro dei pacchetti IP,  
IP addressing, instradamento in rete**

# Strato di rete e strato di trasporto

- Lo strato di **trasporto** realizza la comunicazione tra due **processi applicativi**
- Lo strato di **rete** si incarica di trasferire i dati tra gli **host** che ospitano i due processi comunicanti



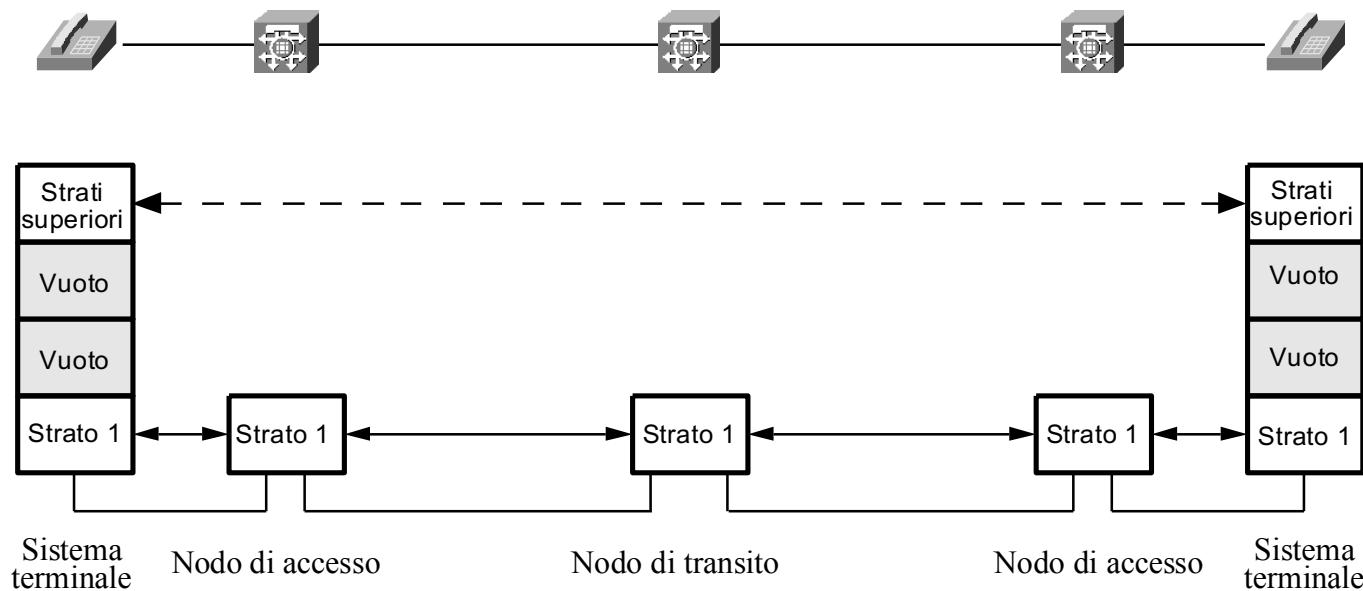
# Funzioni fondamentali dello strato di rete

- **Inoltro / Forwarding:**
  - Funzione locale con cui il router trasferisce i pacchetti dall'ingresso all'uscita
- **Instradamento / Routing:**
  - Processo che determina i percorsi dei pacchetti dalla sorgente alla destinazione
  - Processo globale svolto dagli **Algoritmi di Routing**
    - Processo centralizzato vs distribuito, statico vs dinamico, manuale vs dinamico



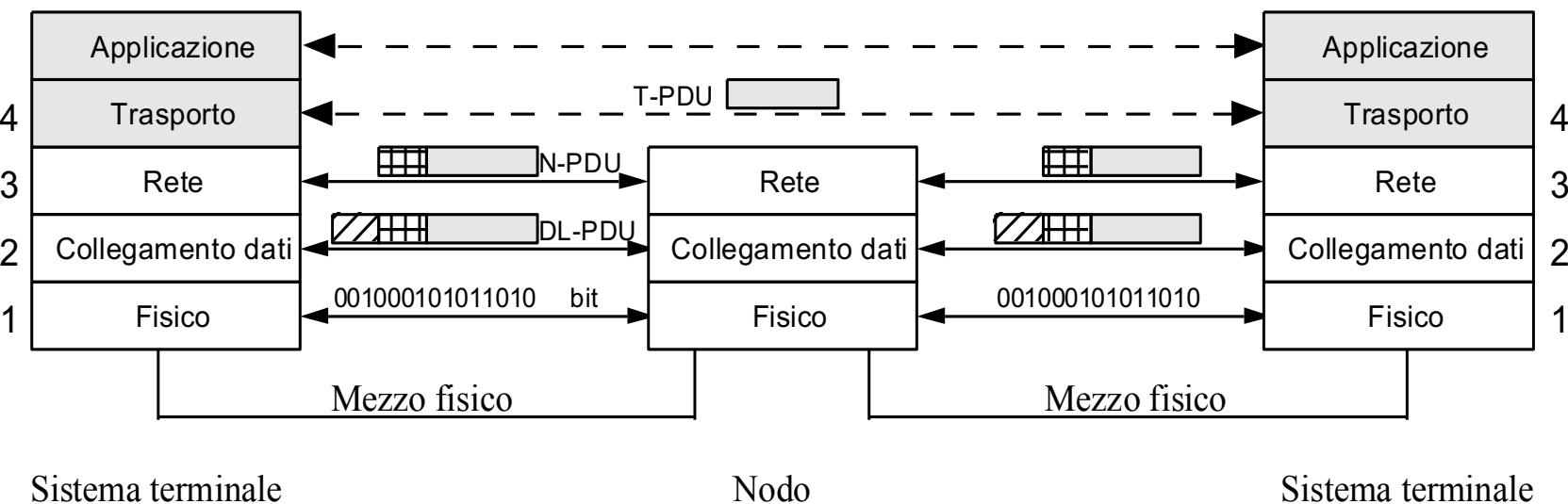
# Modo di trasferimento: commutazione a circuito

- Caratteristiche
  - I nodi intermedi vengono attraversati dai dati, ma non eseguono alcuna elaborazione dell'informazione
  - Nei nodi intermedi è sufficiente che siano presenti solo funzionalità dello strato fisico
- Esempio: rete telefonica (connessione = chiamata)



# Modo di trasferimento: commutazione a pacchetto

- Caratteristiche
  - In ciascun nodo intermedio devono essere realizzati tutti gli strati dallo strato fisico allo strato di rete
  - I nodi intermedi eseguono le due funzioni base: instradamento e inoltro
- Esempio: rete Internet



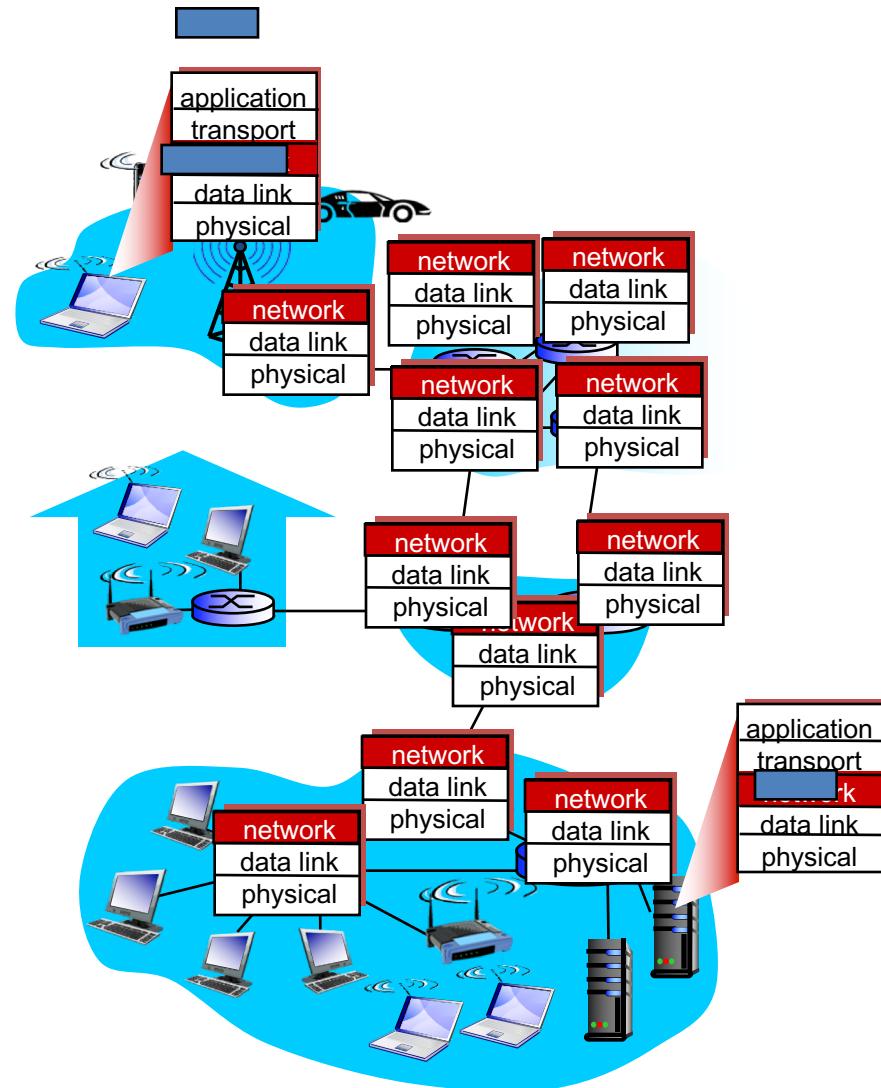
# Servizi del livello di rete

- Possibili **servizi** di rete che sarebbero richiesti:
  - Consegna garantita
  - Consegna garantita con ritardo limitato
  - Consegna ordinata della sequenza dei pacchetti
  - Banda minima garantita
  - Sicurezza del contenuto trasportato
- MA il livello di rete di Internet può solo offrire
  - **Servizio Best Effort (Massimo impegno possibile) !!!**



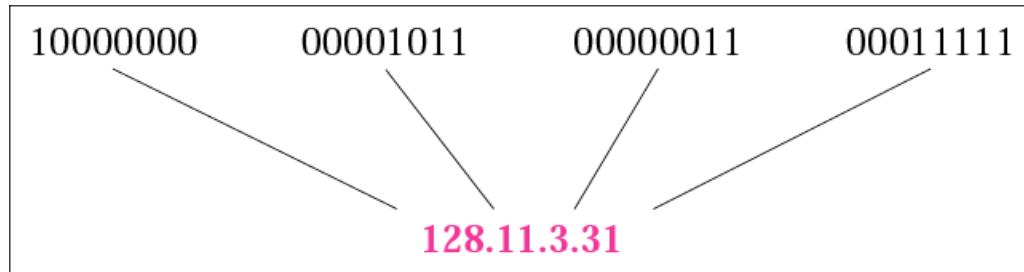
# Strato di rete in Internet

- I segmenti dello strato di trasporto vengono trasferiti dallo strato di rete dall'host sorgente all'host destinazione
- I protocolli dello strato di rete sono implementati in ogni host e in ogni router
  - I nodi di rete non implementano i livelli superiori
- I router esaminano i campi dell'header di ciascun pacchetto IP che li attraversa
  - I pacchetti vengono inoltrati hop-by-hop fino a destinazione

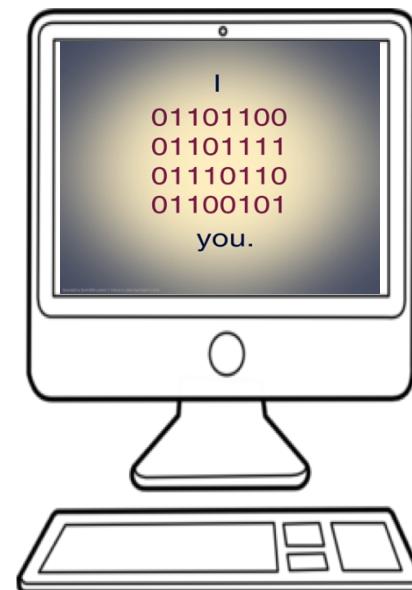


# Indirizzo IP (IPv4)

- È un numero binario di 32 bit
- “A beneficio degli esseri umani”, viene scritto nella forma x.y.z.w.  
Ciascuno dei x,y,z,w
  - rappresenta 8 bit
  - può assumere tutti i valori da 00000000 a 11111111 (0 – 255 in base 10)
- Sempre “a beneficio degli esseri umani” si usa scriverlo nella forma decimale (notazione decimale puntata)

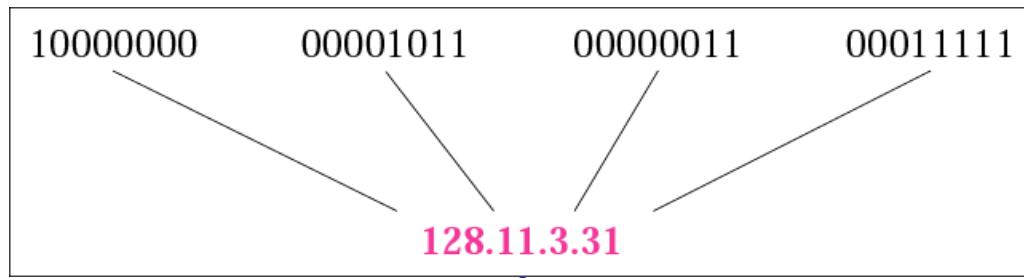


“Dotted decimal notation”

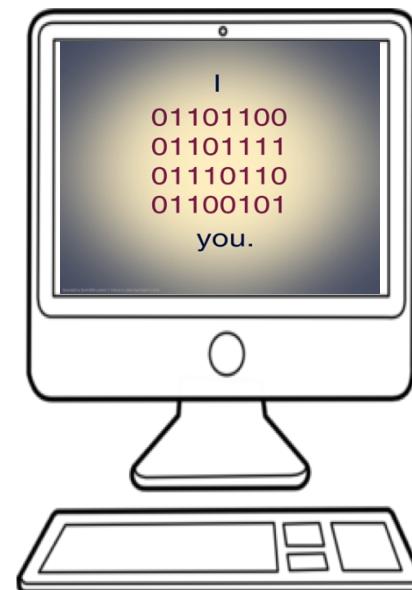


# Indirizzo IP (IPv4)

- È associato in modo univoco ad un'interfaccia di rete di un host o di un router
  - Non è associato direttamente a un host o a un router perché questi possono avere più interfacce di rete
- Indirizzo IP deve avere valenza e univocità universali (in tutto Internet)
  - Il routing in IP è basato sull'indirizzo dell'host destinazione
- Ogni gestore di rete ha a disposizione un blocco di indirizzi che distribuisce alle interfacce dei singoli apparati



“Dotted decimal notation”



# IP Network, Network prefix (NetID)

- Un blocco elementare di indirizzi IP è assegnato alle interfacce di una **rete IP**
- Gli indirizzi del blocco devono avere identici i primi  $n$  bit
- Questi primi  $n$  bit si chiamano **prefisso** (o **identificativo**) di rete (**network prefix** o **NetID**)
- L'indirizzo IP è dunque diviso in due campi (o livelli)
  - I primi  $n$  bit (prefix o NetID) identificano la rete
  - I rimanenti bit (**HostID**) sono usati per identificare un host specifico (un'interfaccia) nell'ambito della rete
- Il valore di  $n$  dipende dal tipo di rete



# IP Network $\leftrightarrow$ rete fisica

IP-B: 193.17.31.55

MAC-B: 05:98:76:6c:4a:7b



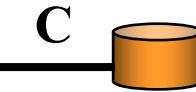
B

IP-A:193.17.31.45

MAC-A: 00:9f:7a:89:90:7a



A



C

Rete IP  
193.17.31.0

IP-C: 193.17.31.254

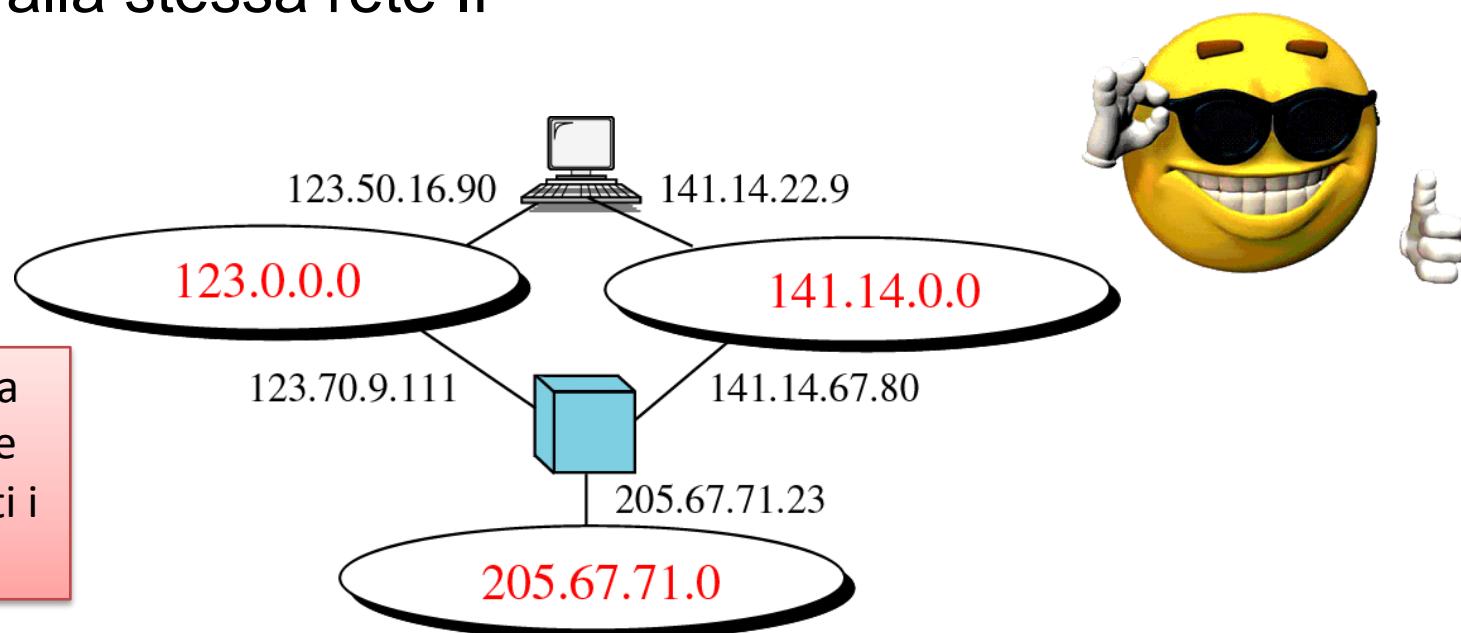
MAC-C: 99:8b:6f:ac:58:7f

- Una rete IP, identificata da un NetID, è una insieme di interfacce (host + router) fisicamente interconnesse, tipicamente con switch e hub
- Le card fisiche degli hosts sono identificate da un indirizzo MAC (oltre che dall'indirizzo IP)
- E' necessario che vi sia almeno un router con un'interfaccia collegata alla rete IP per comunicare con altre reti IP



# Esempio

- Notare che anche un host può avere più interfacce di rete (dual homing)
- Ogni interfaccia di un router (e di un host) deve appartenere a reti IP diverse
- Non è possibile assegnare due interfacce dello stesso apparato alla stessa rete IP



# Netmask

11111111 11111111 11111111 00000000

- La netmask è un numero binario di 32 bit associato ad una rete IP
  - Inizia con  $n$  bit a 1(dal più significativo), con  $n$  pari alla lunghezza del NetID
  - I restanti  $32 - n$  bit sono a 0
  - Indica quali bit di un indirizzo IP sono assegnati al NetID
  - Viene indicata con *dotted decimal notation*
- Esempio:
  - Indirizzo IP 193.17.31.45 e Netmask: 255.255.255.0
  - La rete a cui appartiene l'indirizzo è 193.17.31.0



# NetID: notazioni alternative equivalenti

- Esempio: NetID 130.86.0.0
  - Rappresenta tutti i  $2^{16}$  indirizzi IP che iniziano con il pattern di bit 10000010 01010110
- Questo si può scrivere come
  - Coppia: 130.86.0.0 + Netmask 255.255.0.0
  - 130.86.0.0/16 (16 rappresenta il numero di posizioni occupate da 1 nella netmask)
  - 130.86.\*.\*
  - Intervallo (range) [130.86.0.0, 130.86.255.255]



# Inoltro dei pacchetti

- IP è una tecnica di internetworking
  - Nel trasferimento di pacchetti tra due *host* si serve della capacità di **inoltro delle reti (locali) attraversate**
- **Inoltro diretto:**
  - quando la destinazione è nella stessa rete IP (e rete locale)
- **Inoltro indiretto:**
  - quando la destinazione non è nella stessa rete IP (e rete locale)
- Trasmissione di pacchetti nelle reti locali attraversate
  - Incapsulati in trame di livello 2
  - Si basa sugli indirizzi di livello 2 (indirizzi MAC) dei dispositivi



# Inoltro diretto negli host

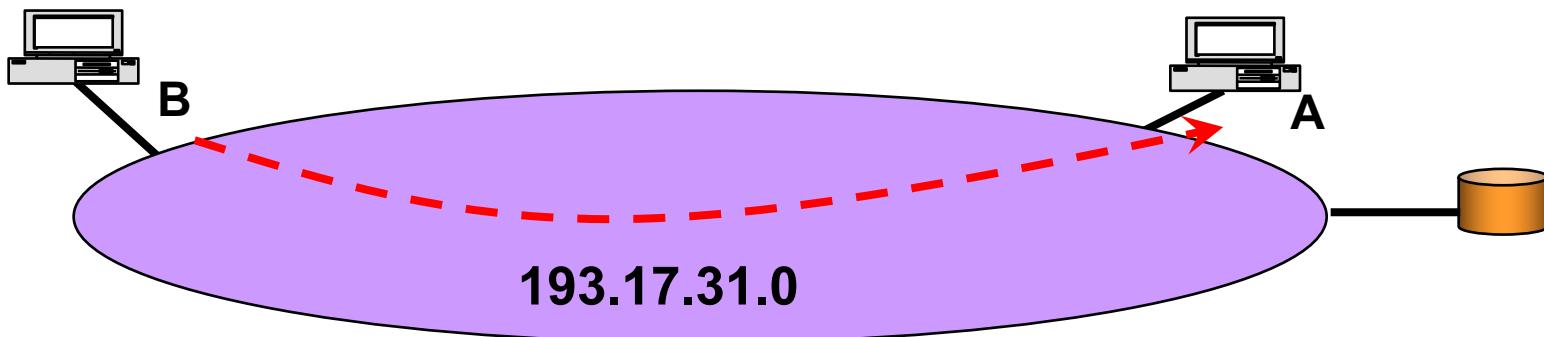
- Rete locale coincidente con rete IP

IP-B: 193.17.31.55

MAC-B: 05:98:76:6c:4a:7b

IP-A:193.17.31.45

MAC-A: 00:9f:7a:89:90:7a

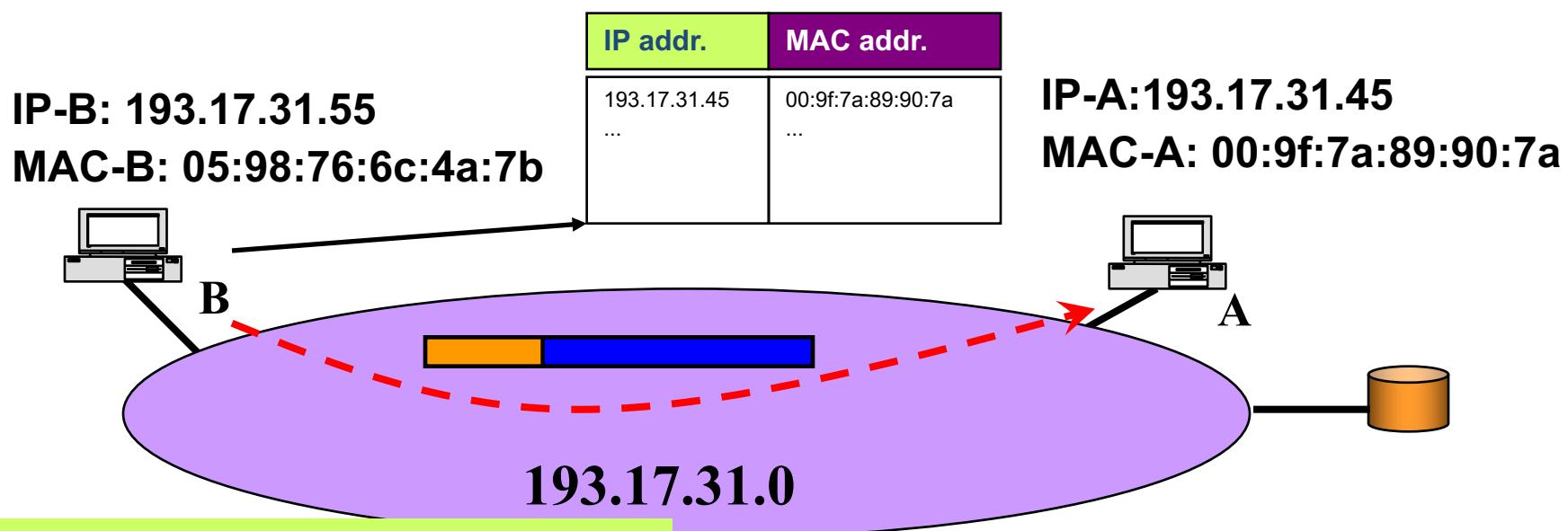


**1. L'entità IP di B deve spedire un pacchetto all'indirizzo IP-A**

**2. B conosce l'indirizzo IP-B della propria interfaccia e dal confronto con IP-A capisce che A si trova nella stessa rete**



# Inoltro diretto negli host



**3. B consulta una tabella di corrispondenza tra indirizzi IP e indirizzi della rete (indirizzi MAC nel caso di rete locale) per reperire l'indirizzo MAC-A**

**4. L'entità IP di B passa il pacchetto al livello inferiore che crea un pacchetto con destinazione MAC-A**



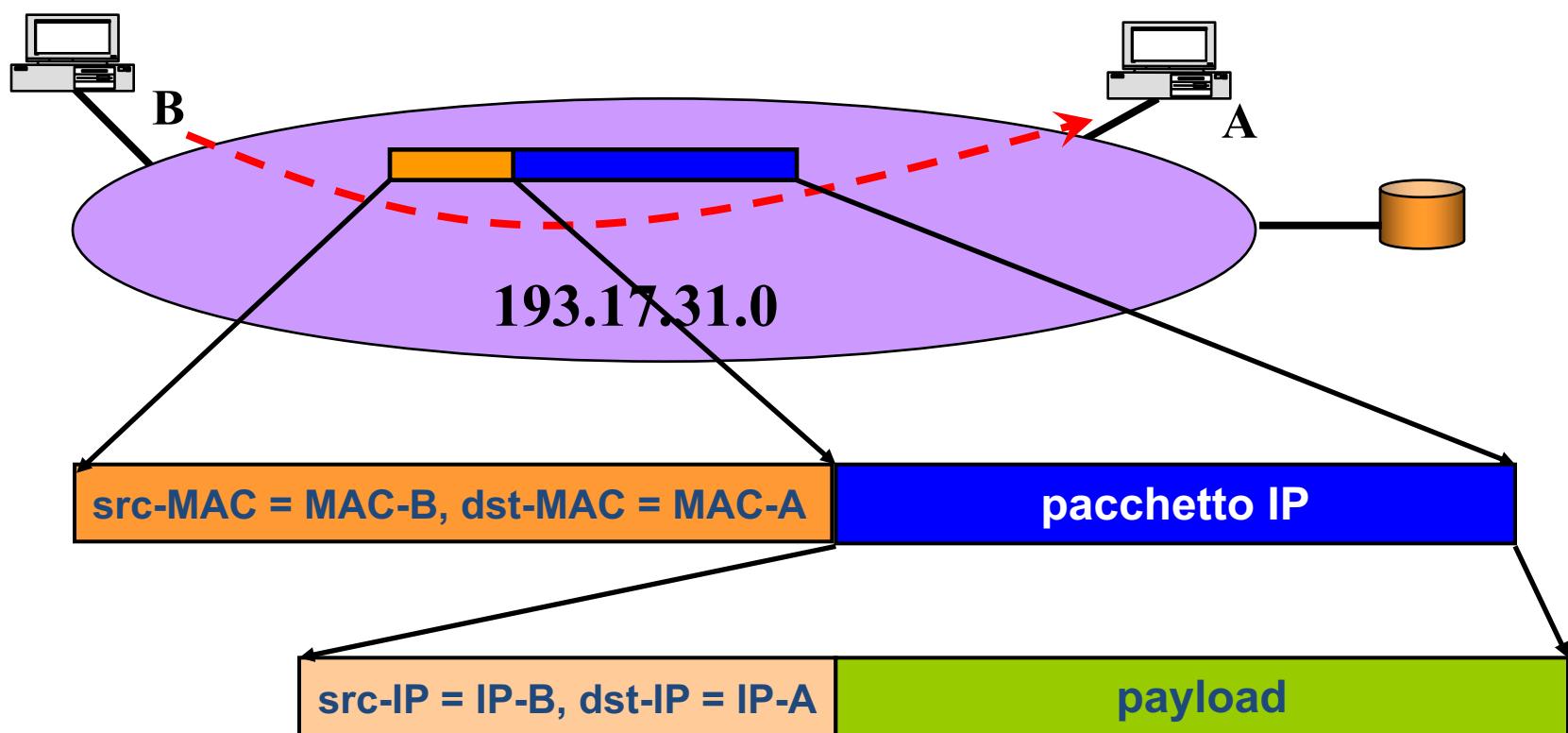
# Inoltro diretto negli host

IP-B: 193.17.31.55

MAC-B: 05:98:76:6c:4a:7b

IP-A: 193.17.31.45

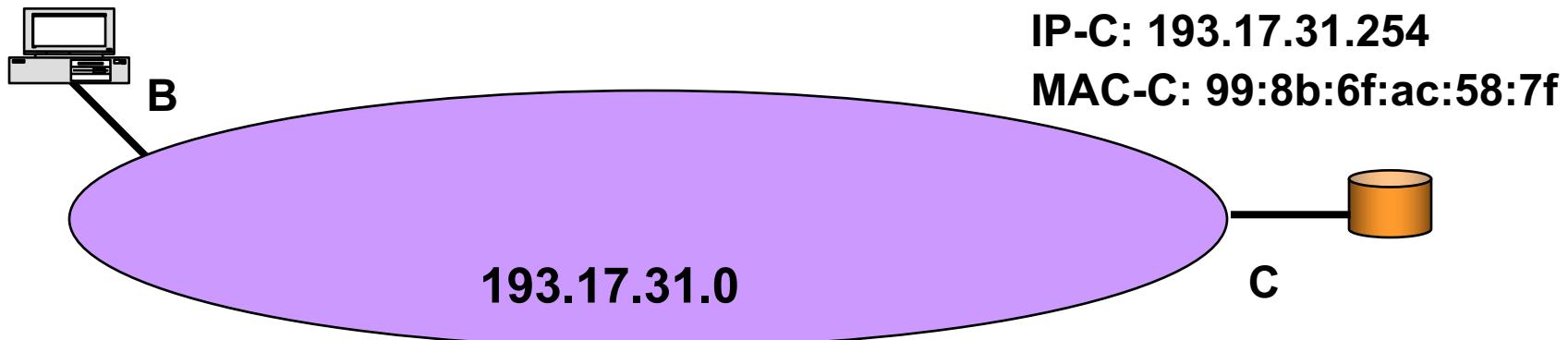
MAC-A: 00:9f:7a:89:90:7a



# Inoltro indiretto negli host

IP-B: 193.17.31.55

MAC-B: 05:98:76:6c:4a:7b

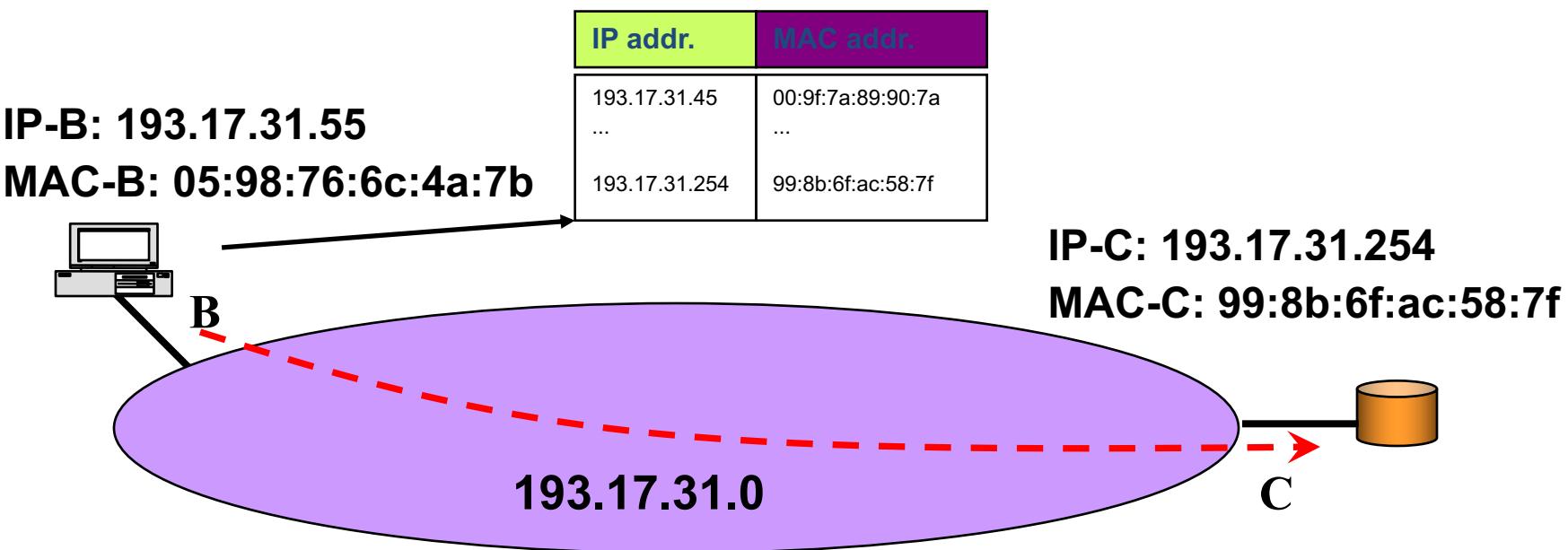


**1.** L'entità IP di B deve spedire un pacchetto all'indirizzo *IP-D=131.17.23.4*

**2.** B conosce l'indirizzo IP-B della propria interfaccia e dal confronto con IP-D capisce che D NON si trova nella stessa rete



# Inoltro indiretto negli host



**3. B deve dunque inoltrare il pacchetto ad un router (di solito è configurato un solo default router)**

**4. B recupera l'indirizzo MAC del router nella tabella di corrispondenza e passa il pacchetto al livello inferiore**

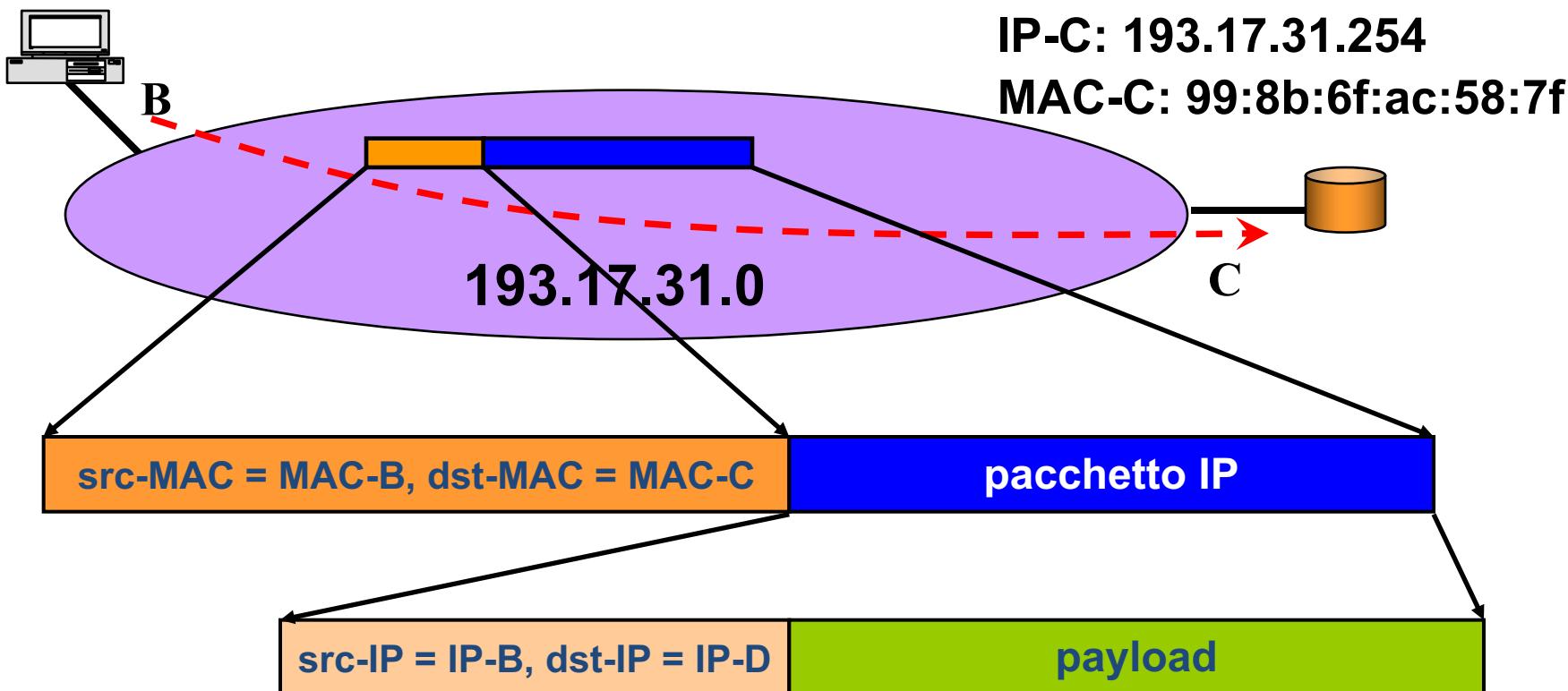


# Inoltro indiretto negli host

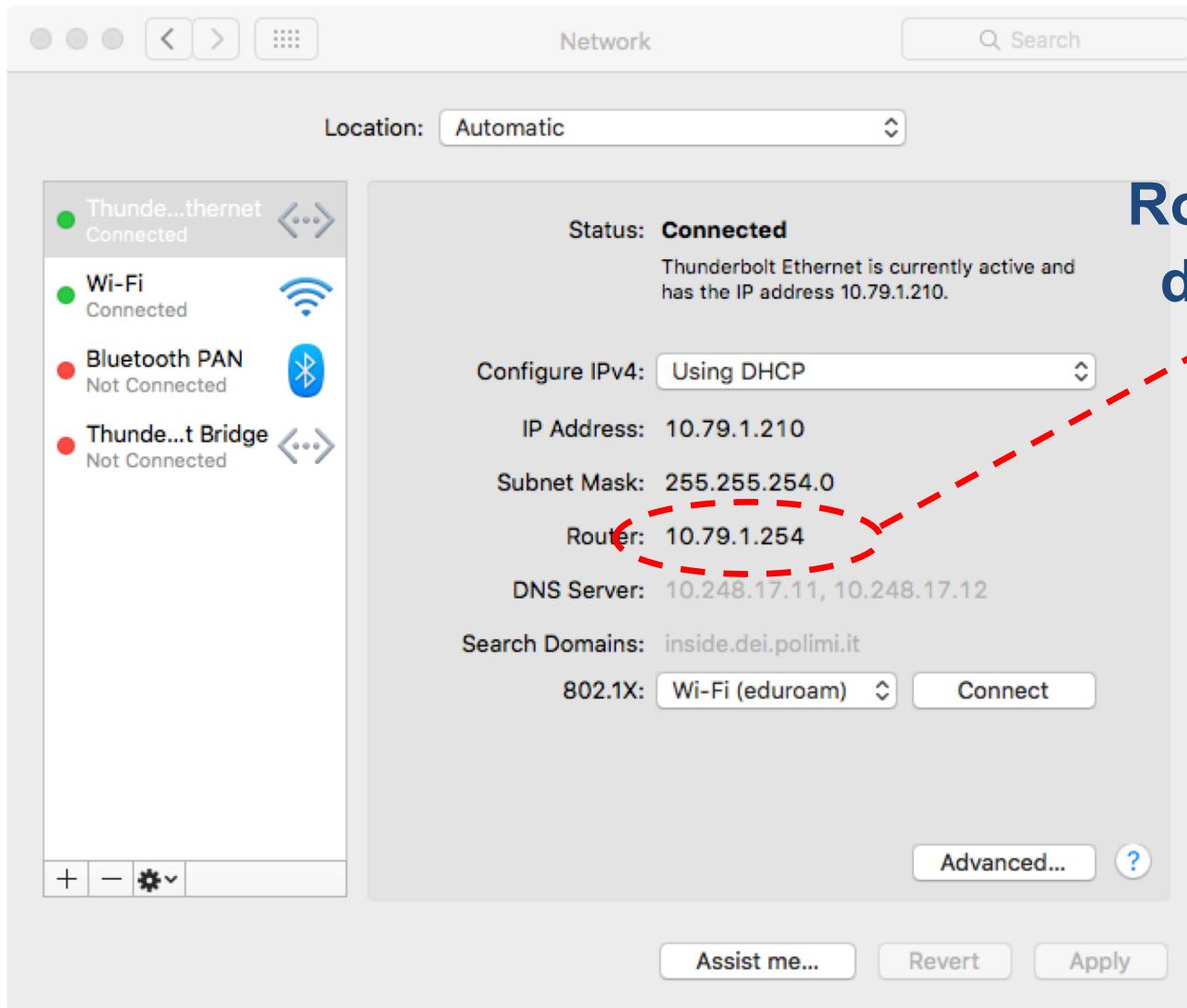
5. il pacchetto viene costruito e spedito sull'interfaccia

IP-B: 193.17.31.55

MAC-B: 05:98:76:6c:4a:7b



# Configurazione degli host



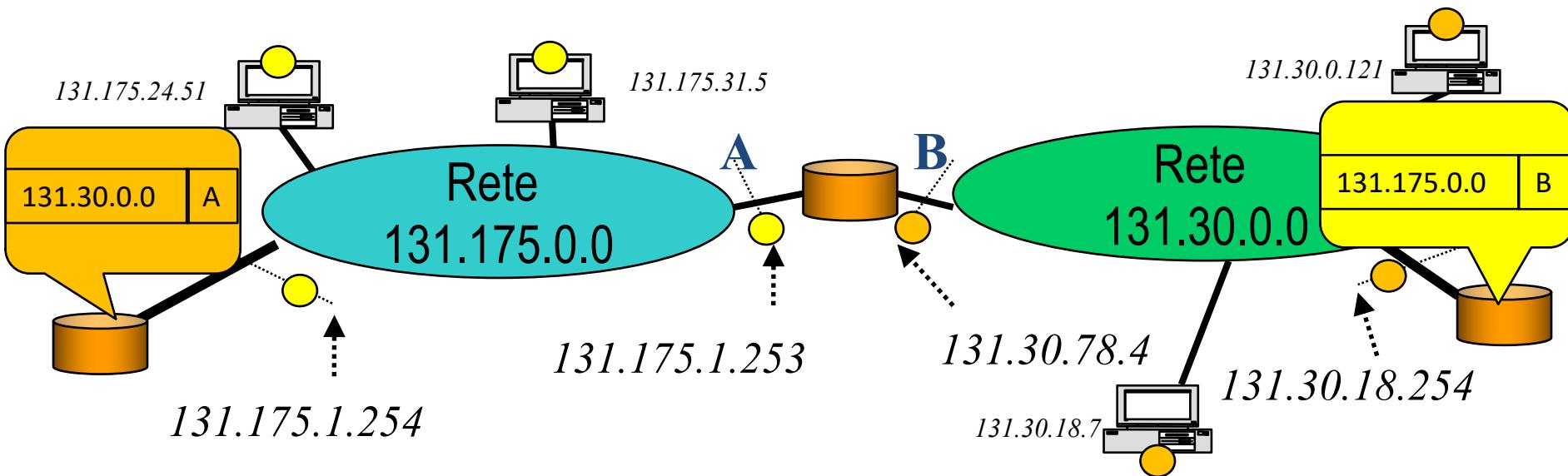
# Inoltro nei router

- *Router*: dispositivi di internetworking con interfacce di uscita multiple.
- Anche i *router* seguono le tecniche di inoltro diretto ed indiretto ma:
  - Inoltro diretto: hanno di solito più di una interfaccia dove poter effettuare l'inoltro diretto
  - Inoltro indiretto: si basa su *tabelle di routing* dove è definita la “rotta” di instradamento
- Caratteristiche dell'inoltro:
  - **DESTINATION BASED**: L'inoltro IP è basato sul solo indirizzo di destinazione, indipendentemente dalla provenienza
  - **NEXT HOP ROUTING**: Nelle tabelle di routing per ogni rete di destinazione è indicato solo il prossimo router (next-hop) nel percorso verso la destinazione



# Inoltro nei router

- L'inoltro avviene da router a router attraverso le reti IP
- I router inoltrano i pacchetti basandosi esclusivamente sulla parte di NetID dell'indirizzo di destinazione
- Tutti gli host che appartengono alla rete di destinazione sono identificati nelle tabelle di routing da una singola entry (il prefisso di rete) → **Address Aggregation**



# Tabella di routing (routing table)

Destination prefix	Next-hop	Output interface
24.40.32/20	192.41.177.148	2
130.86/16	191.41.177.181	6
208.12.16/20	192.41.177.241	4
208.12.21/24	192.41.177.196	1
167.24.103/24	192.41.177.148	2



Tutti gli indirizzi nell'intervallo: 167.24.103.0 –  
167.24.103.255



# Inoltro diretto e indiretto con le netmask

- Per inoltrare un pacchetto occorre capire se appartiene alla sottorete di una delle interfacce
- Per effettuare la verifica si fa un AND bit a bit tra indirizzo dell'interfaccia e netmask e tra indirizzo di destinazione e netmask
- Se i due risultati coincidono allora la sottorete è la stessa e si procede all'**inoltro diretto**

**destinazione: (131.175.21.77) AND (255.255.255.0) = 131.175.21.0**

Nota: gli indirizzi a bordo dei PACCHETTI non hanno MAI NETMASK.

**confronto  
positivo**

**interfaccia: (131.175.21.96) AND (255.255.255.0) = 131.175.21.0**



# Tabelle di routing con le netmask

- Se i confronti con le interfacce sono negativi occorre procedere ad un inoltro indiretto
- Occorre analizzare la tabella di *routing* del router
- Il confronto riga per riga si effettua allo stesso modo (AND bit a bit) usando la *netmask* relativa a ciascuna riga
- Se il confronto dà esito positivo per più righe della tabella viene selezionata la tabella con la *netmask* che ha il maggior numero di 1 (si dice comunemente che vale il principio del prefisso più lungo o *longest prefix matching*).
  - Prefisso più lungo equivale a rotta più “specifica”



# Tabelle di routing con le netmask

network	netmask	first hop
131.175.21.0	255.255.255.0	131.17.123.254
131.175.16.0	255.255.255.0	131.17.78.254
131.56.0.0	255.255.0.0	131.17.15.254
131.155.0.0	255.255.0.0	131.17.15.254
0.0.0.0	0.0.0.0	131.17.123.254

interface eth0

IP address	131.17.123.1
netmask	255.255.255.0

interface eth1

IP address	131.17.78.1
netmask	255.255.255.0

interface eth2

IP address	131.17.15.12
netmask	255.255.255.0

default router:

il confronto dà sempre esito positivo ma la netmask è lunga 0 bit



# Tabelle di routing: esempio (1)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

131.175.21.86

interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0  
interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0



# Tabelle di routing: esempio (1)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

131.175.21.86

**inoltro diretto:**  
destinatario appartiene a  
stessa sottorete IP con  
NetID 131.175.21.0

interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0  
interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0



# Tabelle di routing: esempio (2)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

131.175.16.65

X

OK



X

X

X

X

X

OK

interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X  
interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X



# Tabelle di routing: esempio (2)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

X

OK

X

X

X

X

X

OK

131.175.16.65



2 riscontri positivi.  
Si sceglie quello con la  
NetMask più lunga.  
Si trova indirizzo IP  
dell'interfaccia del router  
*dirimettaio*

interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X  
interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X



# Tabelle di routing: esempio (3)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

131.180.21.78

X

X

X

X

X

OK



OK

OK

interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X  
interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X



# Tabelle di routing: esempio (3)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

131.180.21.78

X

X

X

X

X

OK

OK

OK

3 riscontri positivi.

Si sceglie quello con la NetMask più lunga.



interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X

interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X



# Tabelle di routing: esempio (4)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

**200.45.21.84**

X

X

X

X

X

X

X

**OK**

**interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X**

**interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X**



# Tabelle di routing: esempio (4)

network	netmask	first hop
131.175.15.0	255.255.255.0	131.175.21.1
131.175.16.0	255.255.255.0	131.175.21.2
131.175.17.0	255.255.255.0	131.175.21.3
131.180.23.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.18.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.21.0	255.255.255.0	131.175.21.4
131.180.0.0	255.255.0.0	131.175.21.5
0.0.0.0	0.0.0.0	131.175.12.254

X

X

X

X

X

X

X

**200.45.21.84**

**OK**

è scappatoia, che  
fornisce sempre un  
riscontro positivo

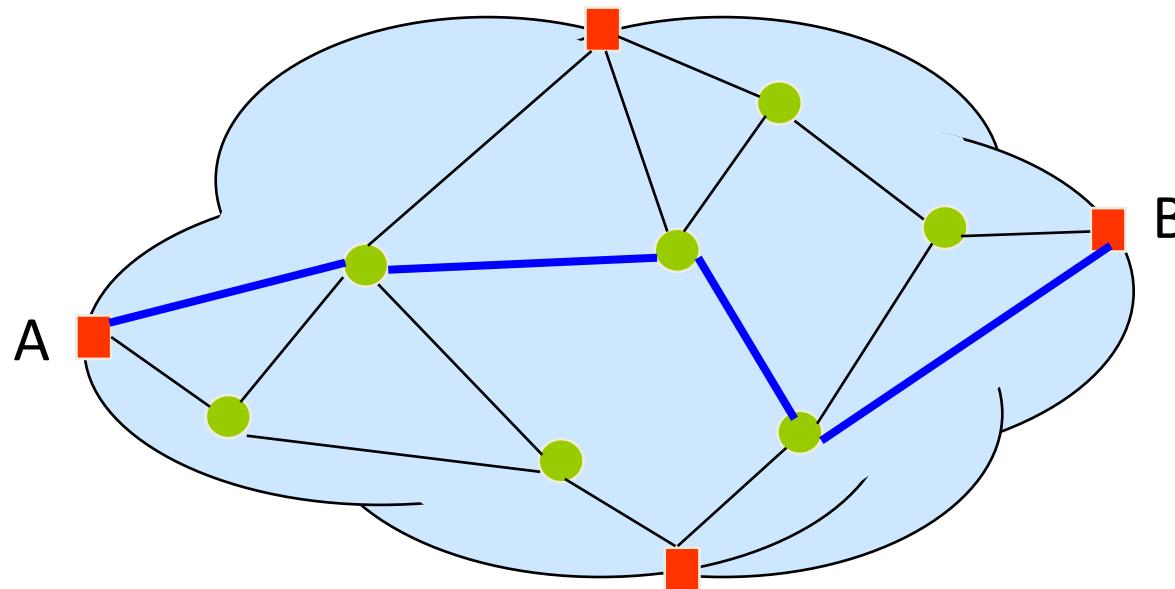
**interfaccia 1: 131.175.21.254, 255.255.255.0 X**

**interfaccia 2: 131.175.12.253, 255.255.255.0 X**



# Routing

- L'instradamento (o *routing*) è alla base della funzionalità di rete implementata dalle entità di livello 3 (OSI) dei nodi
- Consente a due nodi A e B, non collegati direttamente, di comunicare tra loro mediante la collaborazione di altri nodi



# Politiche di Routing

- La **politica di routing** (o *algoritmo di routing*) è quella che definisce i criteri di scelta del cammino nella rete per i pacchetti che viaggiano tra un nodo di ingresso ed uno di uscita
- e dunque quella che costruisce le tabelle di *routing* che vengono usate dai nodi per effettuare il *forwarding*



# Routing e capacità

- Nelle reti broadcast (come WiFi) non vi sono nodi che effettuano instradamento ed il mezzo condiviso può essere usato a turno
- Il risultato è che il traffico massimo che può essere smaltito dalla rete (**capacità**) è al più pari alla capacità del canale
- Nelle reti magliate la trasmissione di un pacchetto non occupa tutte le risorse di rete e più canali e cammini possono essere usati in parallelo
- E' facile comprendere come in questo caso la politica di instradamento abbia un forte impatto sul traffico smaltibile dalla rete

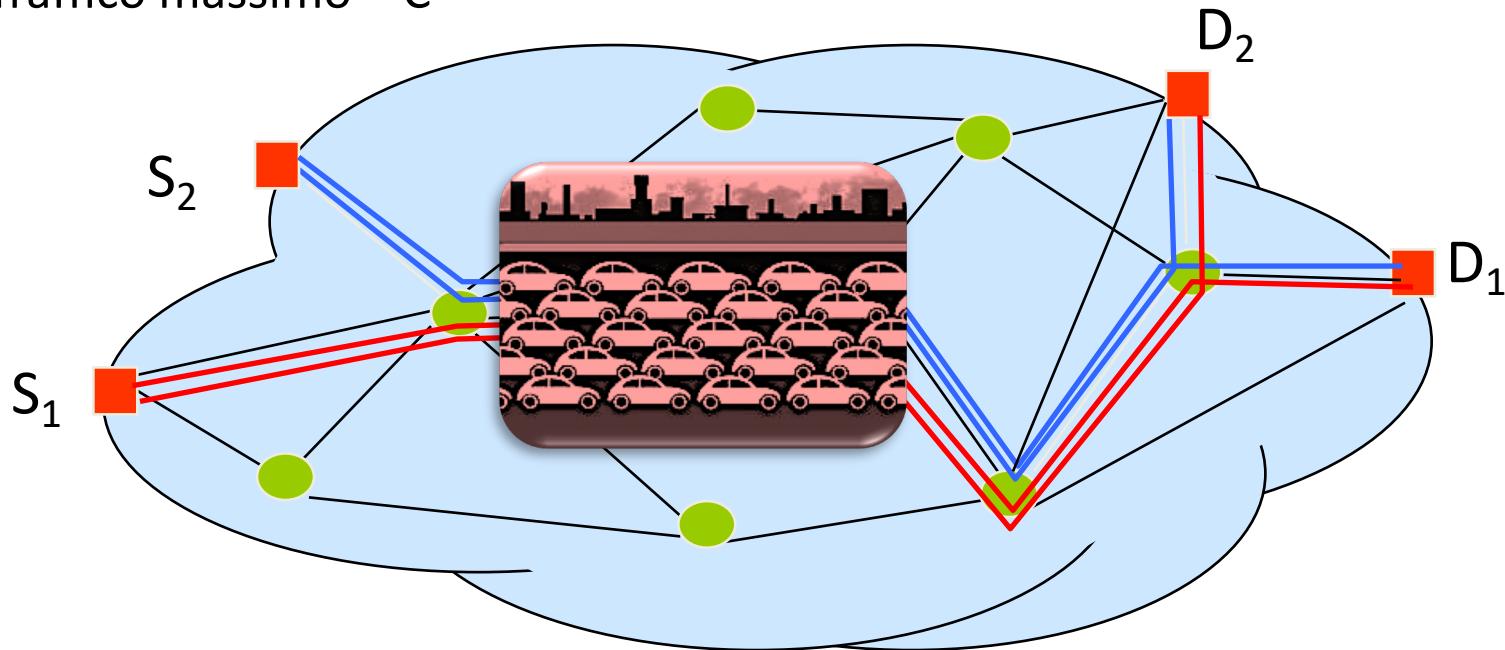


# Routing e capacità: esempio (1)

- Ad esempio:
  - Se il traffico viene fatto passare da pochi cammini nella rete il traffico massimo sarà basso

Capacità di tutti i link = C

Traffico massimo = C

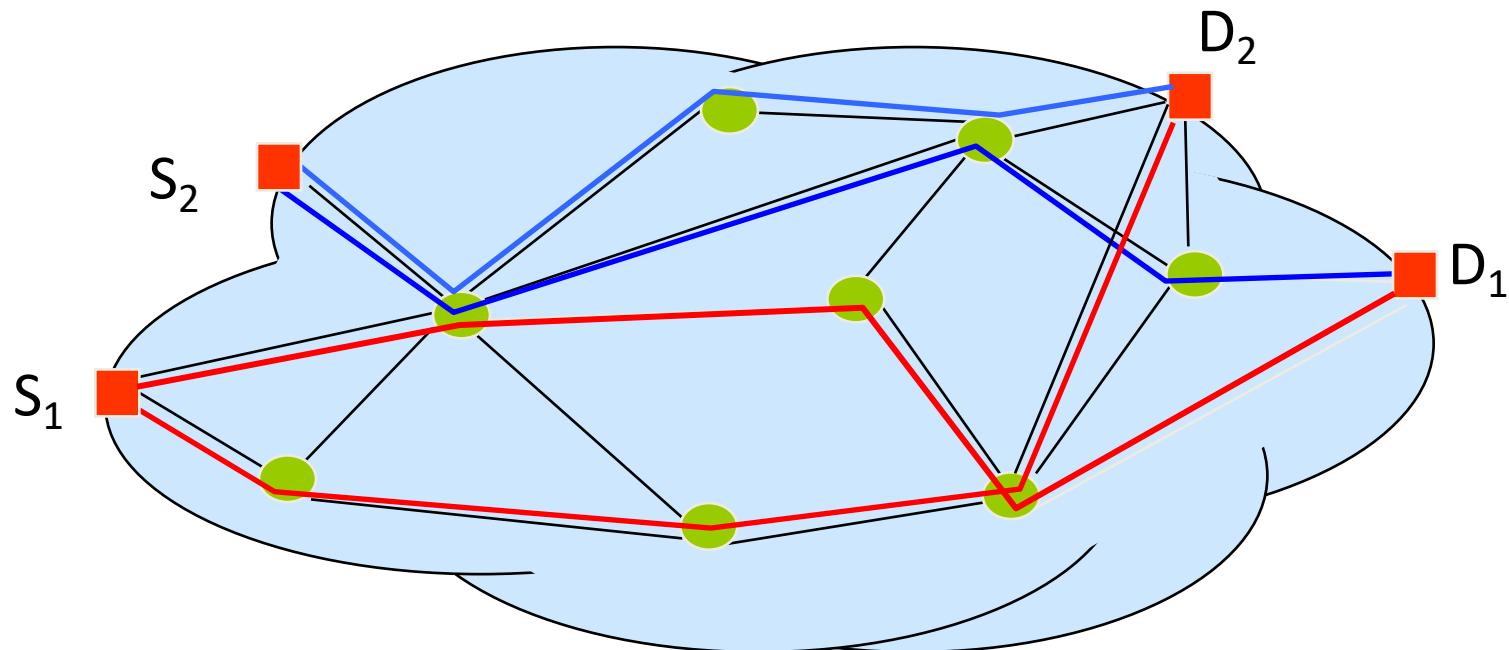


# Routing e capacità: esempio (2)

- Se invece si usano molti cammini ripartendo il carico il massimo traffico sarà elevato

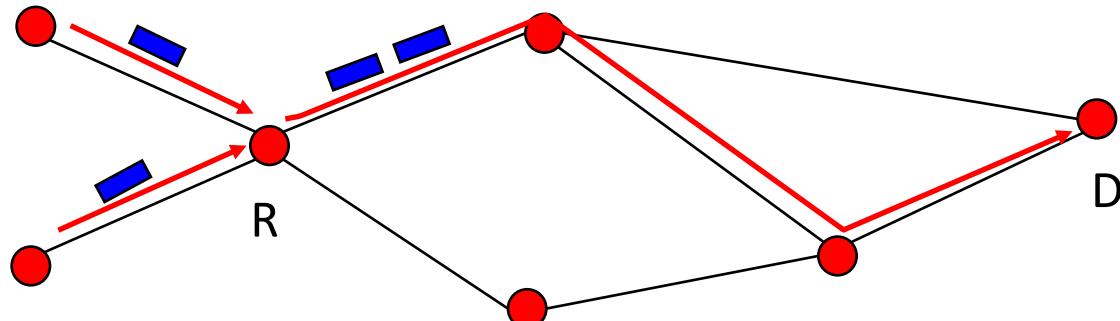
Capacità di tutti i link =  $C$

Traffico massimo  $> C$



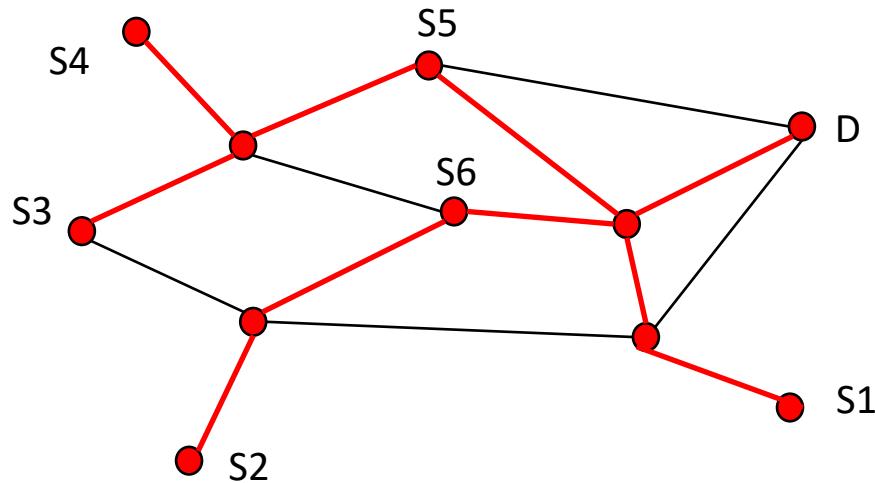
# Politiche di routing per Internet

- Il tipo di inoltro (*forwarding*) utilizzato dalle reti IP condiziona la scelta delle politiche di routing
- Ricordiamo che il *forwarding* IP è
  - *Basato sull'indirizzo di destinazione (destination-based)*
  - *Con inoltro al nodo successivo (next-hop routing)*
- Come conseguenza:
  - *I pacchetti diretti ad una stessa destinazione D che giungono in un router R seguono lo stesso percorso da R verso D indipendentemente dal link di ingresso in R*



# Politiche di routing per Internet

- Quindi il vincolo che ogni politica di *routing* deve soddisfare è che
  - *l'insieme dei cammini da ogni sorgente verso una destinazione D sia un albero, per ogni possibile destinazione D*



- *Non è dunque possibile instradare in modo indipendente ogni relazione di traffico (coppia sorgente-destinazione)*



# Routing IP

- Il principio su cui si basa il *routing* IP è molto semplice
  - Inviare i pacchetti sul *cammino minimo* verso la destinazione
  - La metrica su cui si calcolano i cammini minimi è generale
  - Il calcolo avviene in modo distribuito dai *router* mediante uno scambio di informazioni con gli altri *router*



# Algoritmi di instradamento: caratteristiche

- Requisiti di un algoritmo di instradamento
  - Semplicità
  - Robustezza
  - Stabilità
  - Ottimalità
- Localizzazione della decisione di instradamento
  - Algoritmi centralizzati: un unico centro di controllo prende tutte le decisioni
  - Algoritmi distribuiti: tutti i nodi cooperano per determinare il migliore instradamento in ogni nodo
  - Algoritmi isolati: il nodo sorgente prende le proprie decisioni eventualmente anche in base a informazioni chieste ad altri nodi



# Algoritmi di instradamento con tabella

- Algoritmo di instradamento a distanza minima secondo un'opportuna metrica
- Richiede la definizione di una **metrica**
  - Numero di salti
  - Capacità dei link
  - Ritardo medio
  - Numero totale di pacchetti in coda
  - ecc.
- Definisce la **tabella di instradamento** che indica per ogni destinazione di rete il nodo successivo verso cui instradare il pacchetto



# Instradamento fisso (tipic. centralizzato)

- Un centro di controllo costruisce le tabelle di instradamento che devono essere applicate da ogni singolo nodo e le comunica ai nodi stessi
- Le tabelle vengono cambiate solo a seguito di aggiornamento della topologia, su azione del centro di controllo
- Poco flessibile, in quanto non reagisce a sovraccariche e guasti aleatori
- Consente un'accurata pianificazione di rete (traffic engineering)



# Instradamento dinamico (tipic. distribuito)

- La tabella di routing di ciascun router varia nel tempo in base alle indicazioni che il router riceve dagli altri router grazie al protocollo di routing
- In un protocollo di routing si definiscono
  - Una metrica per valutare il costo degli elementi di rete (link e a volte anche nodi)
    - Possibili metriche: ritardo, numero di hop, capacità disponibile o utilizzata, affidabilità, ecc.
  - L'algoritmo per scegliere i percorsi migliori (a minimo costo)
  - La modalità con cui vengono scambiati i messaggi di aggiornamento tra i router
    - Tipo, contenuto, frequenza
- Il routing che si utilizza in Internet è dinamico



# Instradamento dinamico (distribuito)

- Perchè si modificano le tabelle di routing?
  - Cambiamenti nella topologia della rete
    - Quando viene attivato un nuovo link, usalo!
  - Guasti di link e nodi
    - Se un link “è giù”, trova un percorso alternativo!
  - Carico del traffico e congestione di rete
    - Se c’è un link meno carico di un altro, usalo!

