



*Corso di*  
***SISTEMI TELEMATICI***  
*a.a. 2010-2011*

**Livello rete: Instradamento**



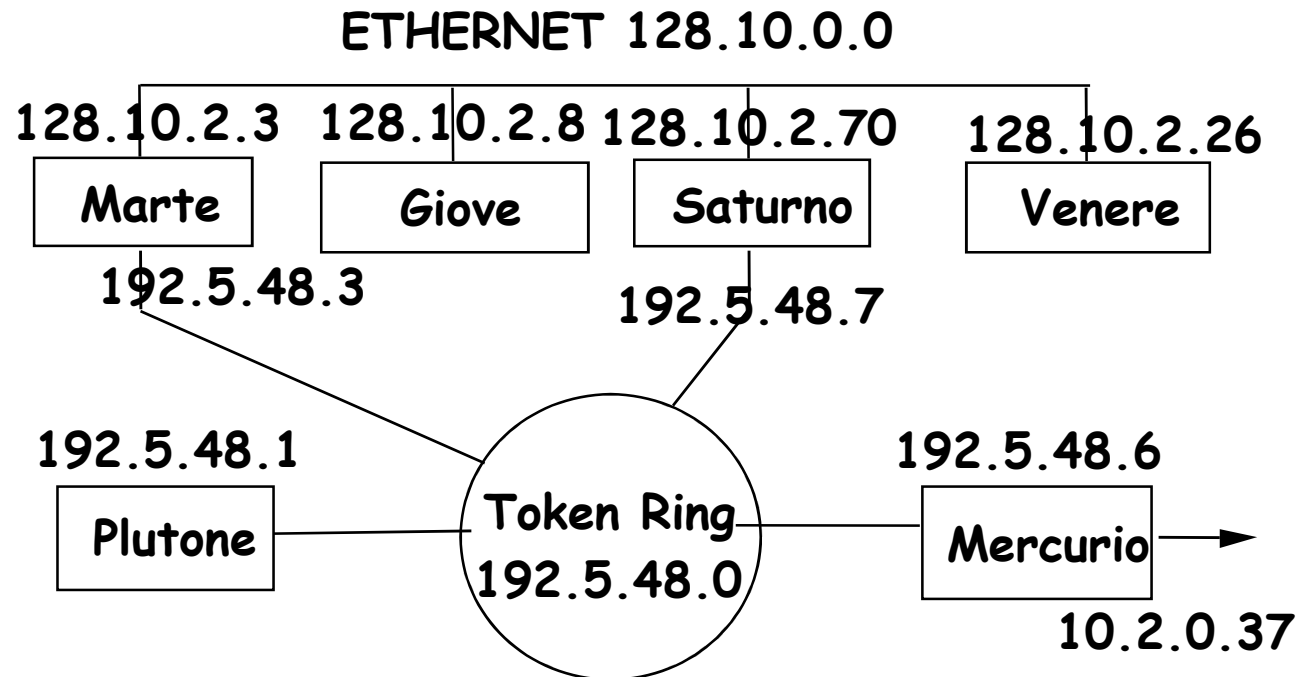
# Router IP

Ing. P. Fazio

- L'instradamento è una funzione di natura logica che ha lo scopo di guidare l'informazione di utente verso la destinazione desiderata
- In Internet ogni datagramma IP attraversa un cammino composto da sotto-reti interconnesse da router
- I router IP ricevono datagrammi IP da un'interfaccia e li inoltrano su un'altra
- I router IP hanno (normalmente) un indirizzo IP per ogni interfaccia



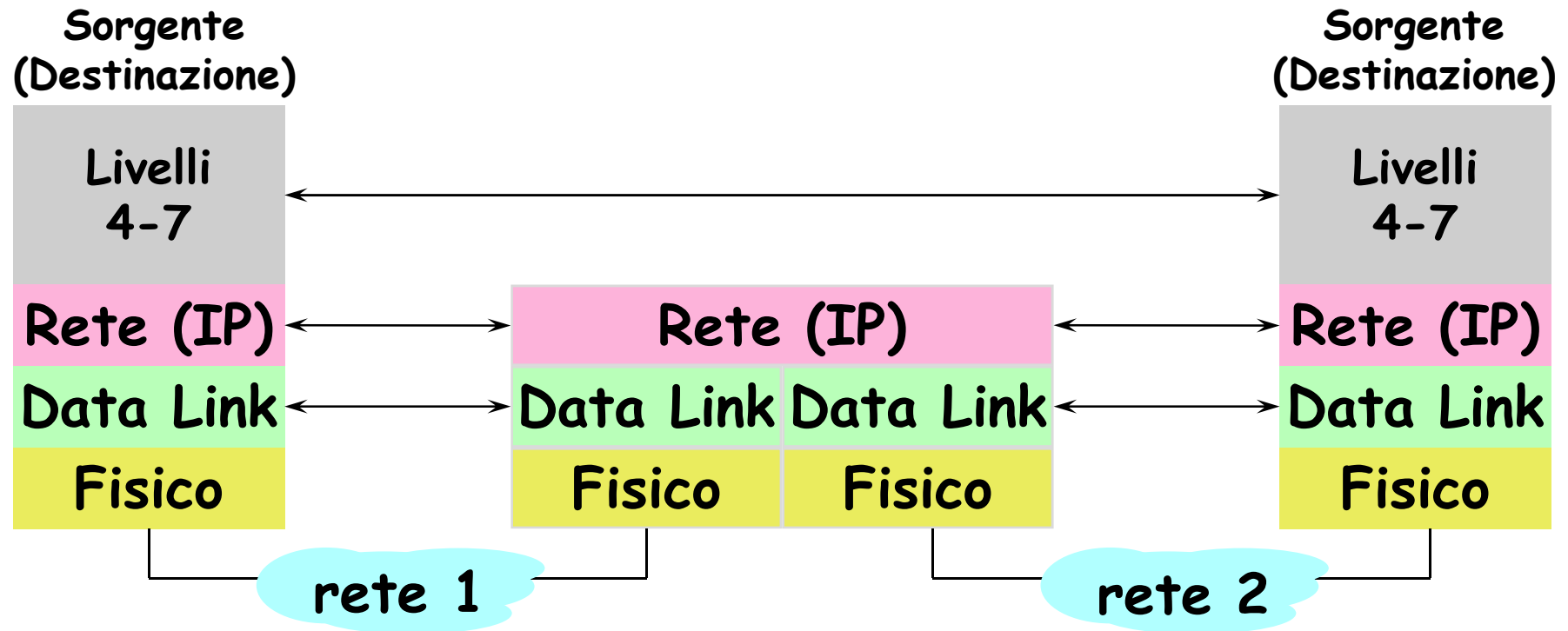
# Router IP



- “Marte” e “Saturno” sono multi-homed host, in quanto connessi sia alla Token Ring che a Ethernet; hanno quindi due indirizzi.
- Il gateway “Mercurio” interconnette la Token Ring a un’altra rete (ARPANET) e quindi anch’esso ha due indirizzi.
- Siccome gli indirizzi sono utilizzati per l’instradamento, se ci riferiamo a “Marte” con l’indirizzo 192.5.48.3 il messaggio arriva tramite la Token Ring; se invece usiamo 128.10.2.3, il messaggio arriva tramite l’Ethernet



# Interconnessione di reti tramite Router



- I router lavorano al livello 3 OSI (livello di rete)
- Sono indirizzati esplicitamente
- I nodi della rete devono conoscere l'indirizzo del router

# Instradamento IP

Ing. P. Fazio

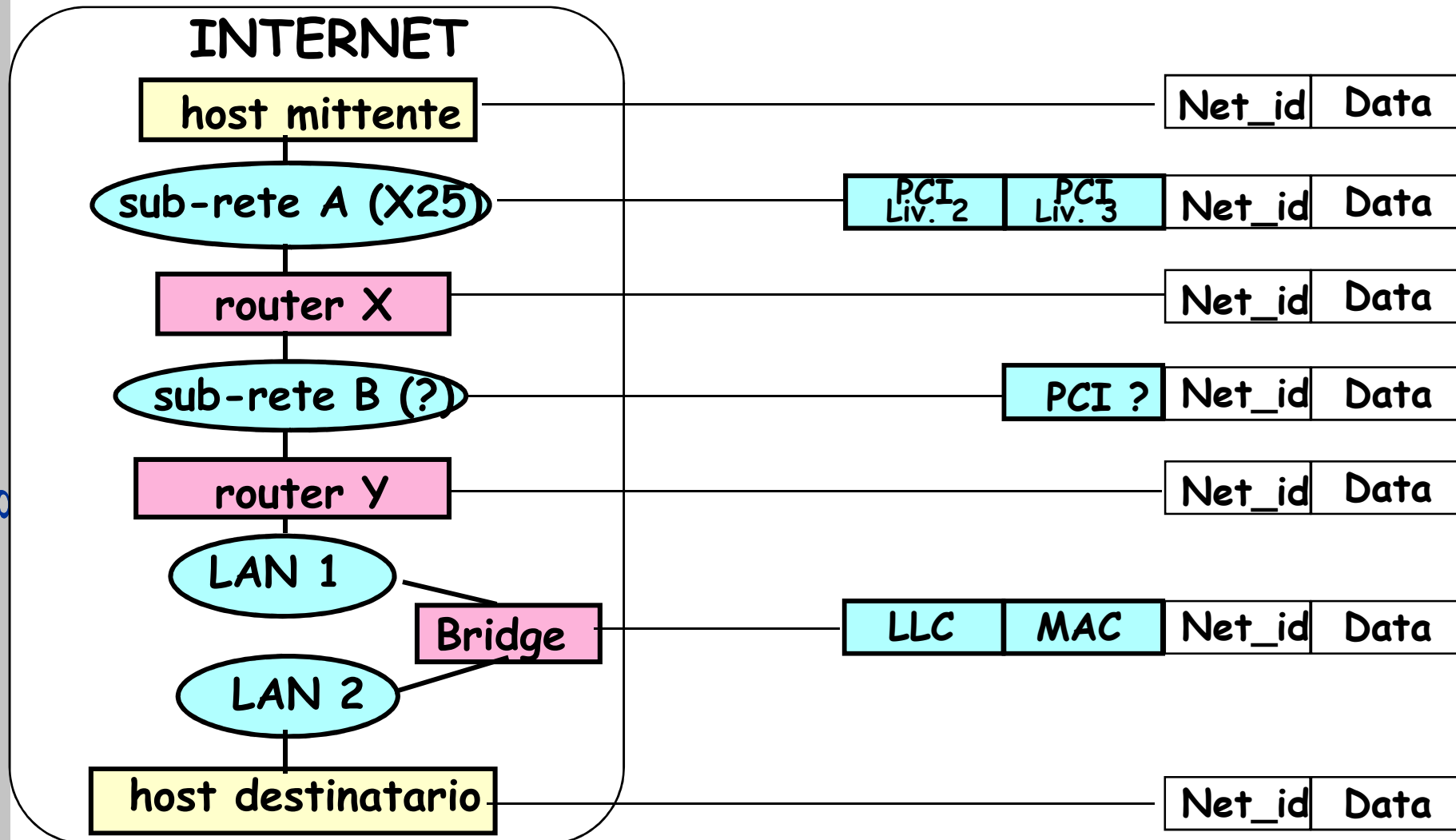


- Quando un router consegna un datagramma ad una sotto-rete, questo diventa l'unità di dati di servizio (Service Data Unit - SDU) propria dello strato immediatamente inferiore a IP di questa sotto-rete
- La sotto-rete consegna tale unità dati al prossimo router o a destinazione (se la destinazione è all'interno della sotto-rete) con le stesse modalità con cui tratta le unità dati ad essa "appartenenti"



# Incapsulamento del datagramma IP

Ing. P. Fazio



# Instradamento IP

Ing. P. Fazio



- Si è messo in evidenza Net-id nel datagramma IP, perché i router instradano i datagrammi verso la rete logica di destinazione e non verso il singolo host
- L'algoritmo di instradamento nei router determina la sequenza dei router da attraversare e si basa solo sulla componente Net-id dell'indirizzo IP di destinazione
- La componente Host-id viene presa in considerazione solo dai router della rete logica di destinazione

# Instradamento IP



## Instradamento diretto

- si applica quando la trasmissione di un datagramma IP avviene tra due host connessi alla stessa sotto-rete

## Instradamento indiretto

- si applica quando la trasmissione di un datagramma IP deve attraversare almeno un router, cioè avviene tra due host connessi su differenti sotto-reti





Università della Calabria D.E.I.S.

# Instradamento IP



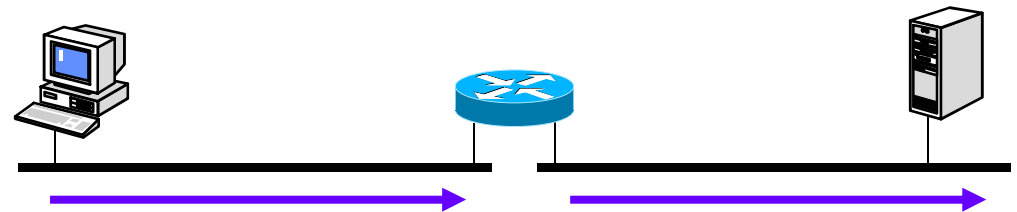
Bitwise\_AND (IP\_destination\_address, my\_subnet\_mask)  
=  
Bitwise\_AND (my\_IP\_address, my\_subnet\_mask)

SI

NO

Instradamento **diretto**

Instradamento **indiretto**





# Instradamento IP

Ing. P. Fazio

Bitwise\_AND (194.27.3.48, 255.255.255.192)  
=  
Bitwise\_AND (194.27.3.16, 255.255.255.192)

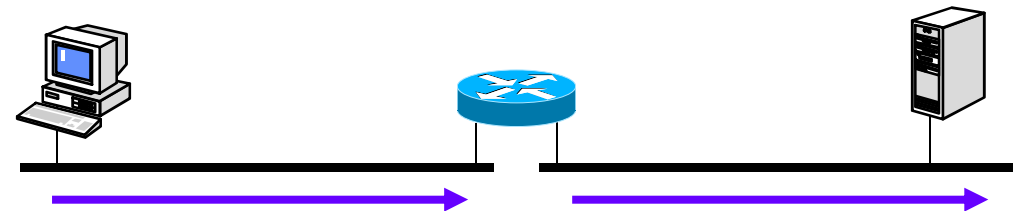
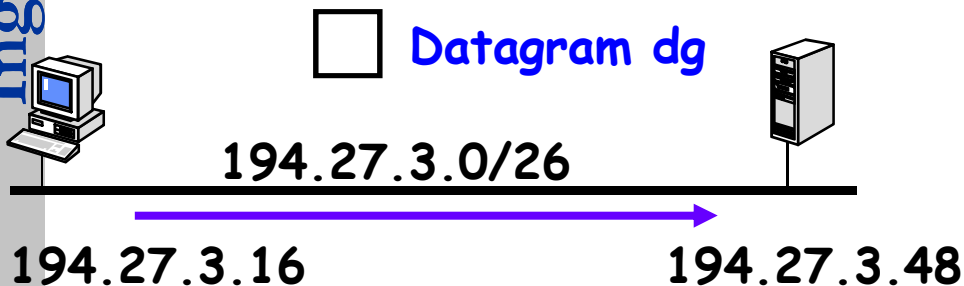
SI

194.27.3.0

NO

Instradamento **diretto**

Instradamento **indiretto**



```
IF bitwise_and(dg.ip_dest, my_ip_mask) ==  
   == bitwise_and(my_ip_addr, my_ip_mask)  
THEN send_dg_locally(dg, dg.ip_dest)
```



# Instradamento IP

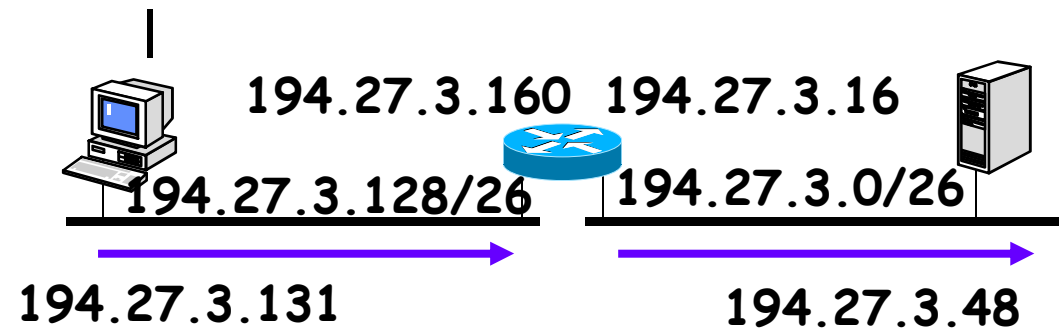
Bitwise\_AND (194.27.3.48, 255.255.255.192)  
=  
Bitwise\_AND (194.27.3.131, 255.255.255.192)

SI

NO

Instradamento **diretto**

Instradamento **indiretto**



...ELSE

```
send_dg_locally(dg,  
gateway_to(bitwise_and(dg.ip_dest, my_ip_mask)))
```



# Instradamento diretto

Ing. P. Fazio

- Lo scambio di datagrammi tra host connessi alla stessa sottorete NON coinvolge i router
- L'host IP sorgente incapsula il datagramma nell'unità dati tipica della sotto-rete, traduce l'indirizzo IP di destinazione nel corrispondente indirizzo locale di quella sotto-rete, e lo invia direttamente all'host di destinazione
- L'instradamento all'interno della sotto-rete utilizza i meccanismi propri della rete stessa e può essere qualunque e non significativo globalmente



# Instradamento diretto

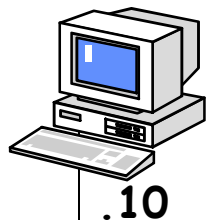
Ing. P. Fazio

- Se un host IP deve consegnare un datagramma ad un altro host attraverso una sottorete comune, l'host sorgente deve conoscere l'indirizzo di sottorete del destinatario
- E' necessaria un'operazione di traduzione di indirizzi IP in indirizzi specifici della sotto-rete (es. MAC)
- La corrispondenza tra gli indirizzi IP (indirizzi di livello 3) e gli indirizzi di livello 2 è gestita dal protocollo ARP (Address Resolution Protocol)
- Gli indirizzi di livello 2 possono essere:
  - × indirizzi MAC nelle LAN
  - × identificatori di circuito virtuale nelle reti X.25, Frame Relay e ATM
  - × etc.



# Instradamento diretto: esempio

Ing. P. Fazio



.10

Rete 192.168.10.0/24



.35

MAC 00082C785852

MAC-D	000060AD8744
MAC-S	00082C785852
IP-D	192.168.10.35
IP-S	192.168.10.10

MAC 000060AD8744



# Instradamento indiretto

Ing. P. Fazio

- L'host mittente identifica il router più vicino a cui inviare il datagramma IP utilizzando la sotto-rete fisica a cui è connesso (instradamento diretto)
- Il router esamina il datagramma ricevuto e decide verso quale altro router (next-hop router) indirizzarlo, nel cammino verso la rete logica di destinazione
- Quindi il router usa un instradamento diretto per inoltrare il datagramma verso il router successivo attraverso la sottorete a cui sono entrambi collegati
- L'instradamento attraverso la sotto-rete che connette due router avviene secondo i meccanismi della sottorete



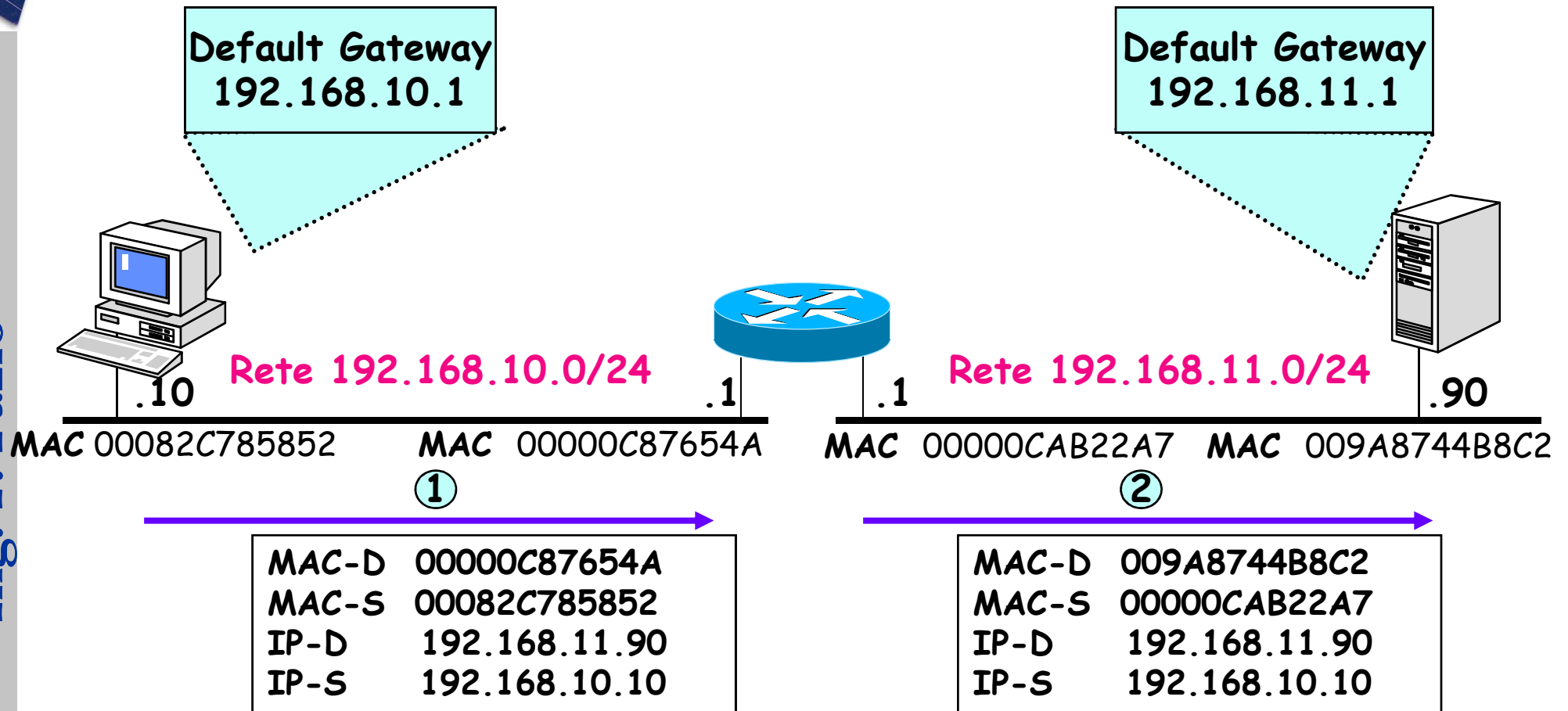
# Instradamento indiretto

- Il processo si ripete di router in router, finché il datagramma arriva ad un router collegato alla stessa sotto-rete dell'host di destinazione
- Nella sotto-rete di destinazione il datagramma viene inviato dal router allo specifico host tramite instradamento diretto
- Si può dire che l'instradamento indiretto è una successione di instradamenti diretti coordinata dai router
- I router non si occupano dell'instradamento all'interno delle sotto-reti



# Instradamento indiretto: esempio

Ing. P. Fazio



Gli indirizzi di livello 3 non cambiano mai durante il tragitto di un datagram, mentre quelli di livello 2 individuano gli apparati interessati alla trasmissione del pacchetto all'interno di una particolare sottorete.



# Instradamento indiretto

Resta da scoprire:

- Come un host mittente individua il primo router a cui inviare un datagramma?
- Come tale router decide verso quale altro router inoltrare a sua volta il datagramma?
- Quali sono le procedure operative seguite dagli host per inviare i datagrammi e dai router per inoltrarli (forwarding)?

Occupiamoci prima delle procedure operative ipotizzando che host e router sappiano verso quale altro router inviare/rilanciare un datagramma

# Tabelle di routing

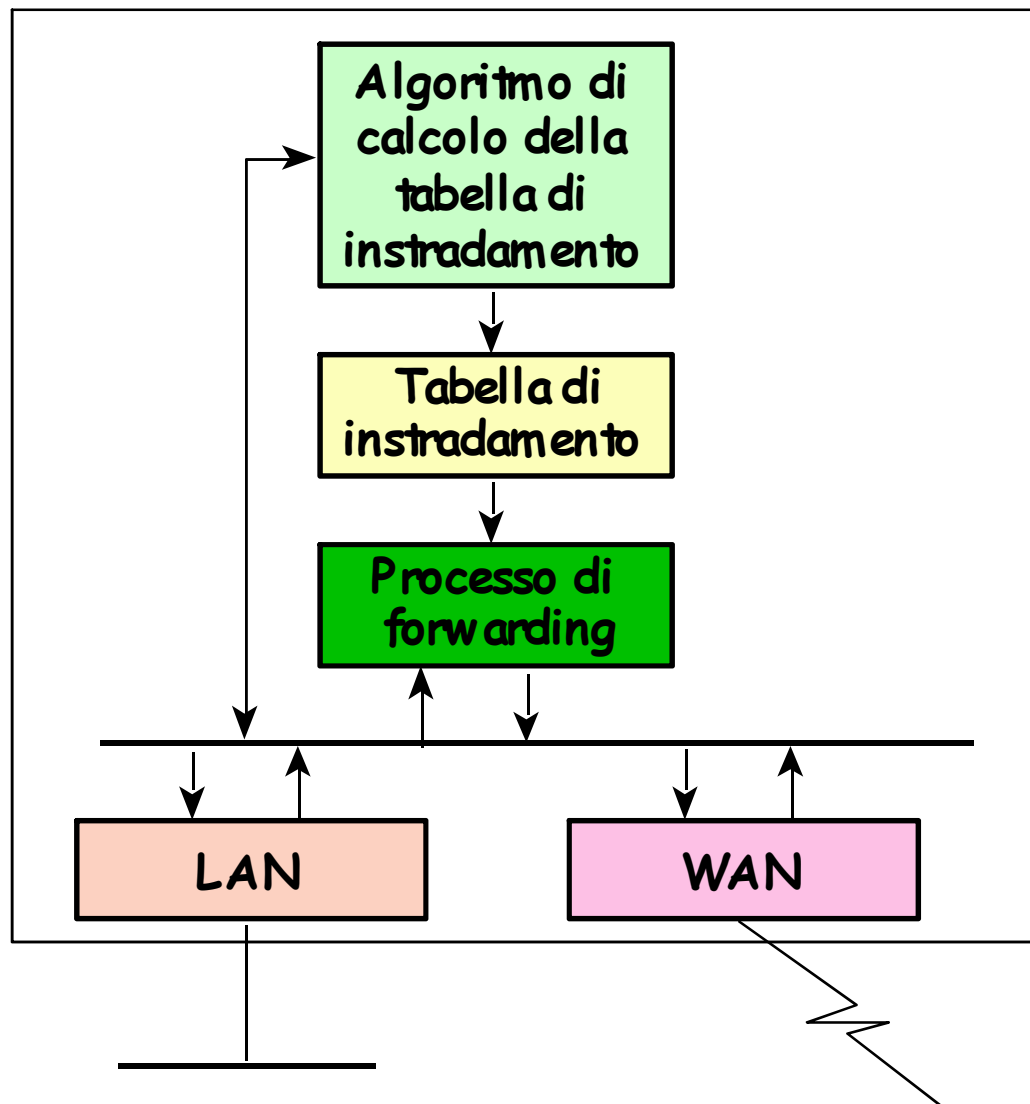
- Il meccanismo operativo usato per l'instradamento IP è basato su una tabella di instradamento (routing) che ogni host/router mantiene allo scopo di conoscere le possibili destinazioni e i modi per raggiungerle
- Una tabella di instradamento contiene le coppie (N,R), dove N è l'indirizzo della rete di destinazione e R è l'indirizzo IP del prossimo router (next-hop router) verso la rete di destinazione
  - ✗ solo nella rete di destinazione, R diventa l'indirizzo IP dell'host destinazione
- La tabella di instradamento specifica solo *un passo* lungo il cammino verso la destinazione; perciò un router non conosce il cammino completo del datagramma ma solo il passo successivo; quindi la tabella contiene indirizzi R raggiungibili solo attraverso una singola sottorete





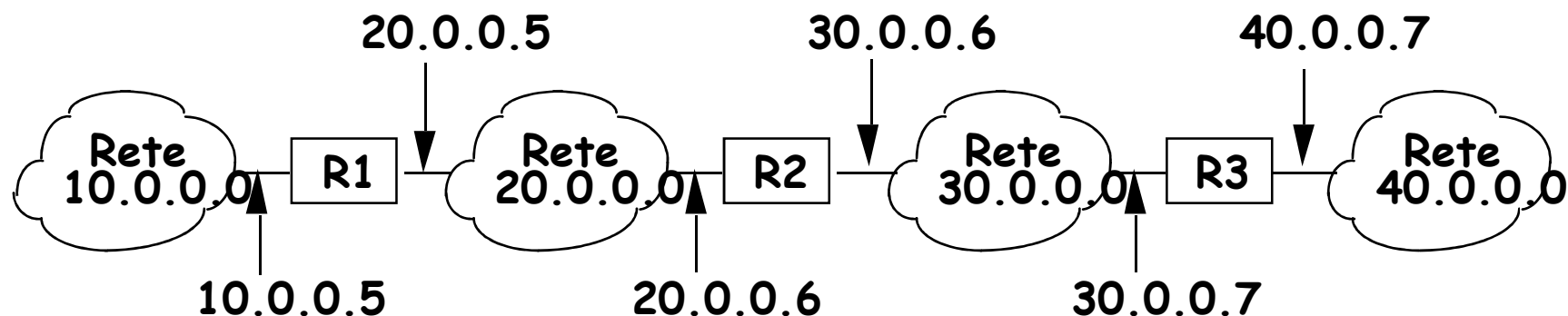
# Architettura logica di un Router

Ing. P. Fazio





# Tabelle di routing: esempio



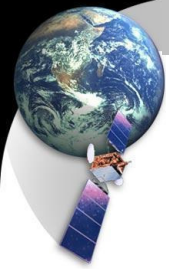
**Tabella di instradamento di R2**

Per raggiungere host indirizzati alla rete Net_id	indirizzare i datagrammi verso questa strada (o router) Router_id
20.0.0.0	inoltrare direttamente
30.0.0.0	inoltrare direttamente
10.0.0.0	20.0.0.5
40.0.0.0	30.0.0.7

Ipotizziamo che le sottoreti fisiche coincidano con le reti logiche

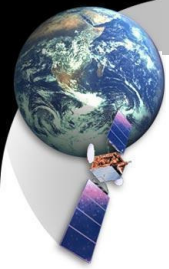
# Tabelle di routing

- La dimensione della tabella di routing dipende dal numero di reti logiche interconnesse ma non dipende dal numero degli host
- Le tabelle contengono solo informazioni sulle reti logiche di destinazione e non sui singoli host, al fine di:
  - ✗ nascondere i dettagli inerenti la inter-rete
  - ✗ mantenere piccole le tabelle di instradamento
  - ✗ consentire un instradamento efficiente



# Tabelle di routing

- Una tabella di routing può contenere anche una Metrica che definisce la distanza dalla destinazione, espressa secondo varie unità di misura (es. distanza fisica, numero di sottoreti da attraversare o numero di salti, costo del percorso intermini di affidabilità o tempo di attraversamento o integrità informativa, etc.)
- La metrica può essere opzionalmente usata nel decidere l'instradamento
  - ✕ per soddisfare ai requisiti di utente espressi nel campo Service Type del datagramma, o per ottimizzare le decisioni degli algoritmi di routing



# Tabelle di routing

Ing. P. Fazio

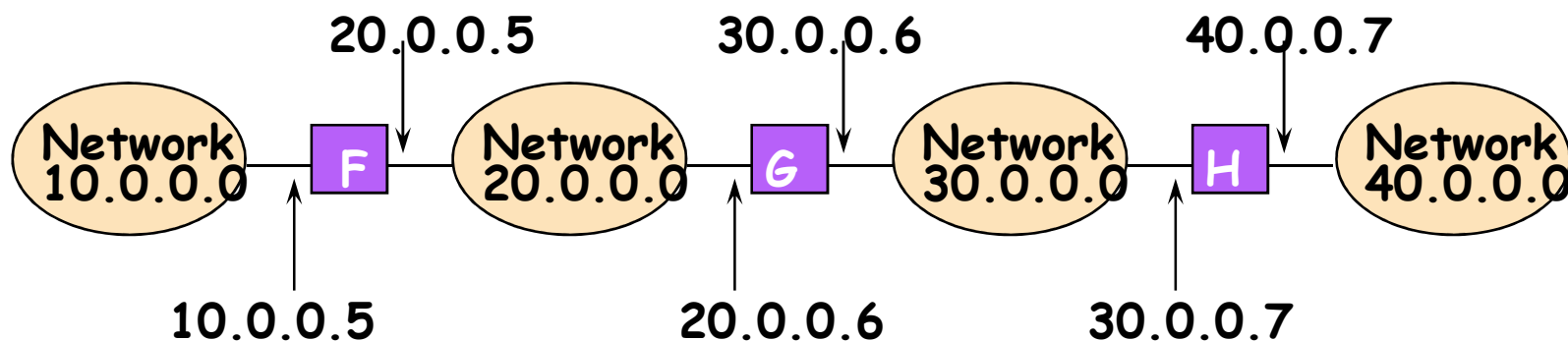


- La metrica associata ad ogni hop da router a router può essere:
  - inversamente proporzionale alla banda del ramo
  - proporzionale al carico istantaneo sul ramo
  - proporzionale al costo d'uso del ramo
  - qualsiasi combinazione tra i precedenti criteri
- Il router sceglie il percorso che minimizza il costo (percorso a costo minimo) in base ad **algoritmi di routing**
- Per determinare il percorso a costo minimo il router deve avere informazioni sui costi dei percorsi alternativi attraverso la rete di cui fa parte; per acquisire tali informazioni si usano **protocolli di routing**





# Tabelle di routing: esempio



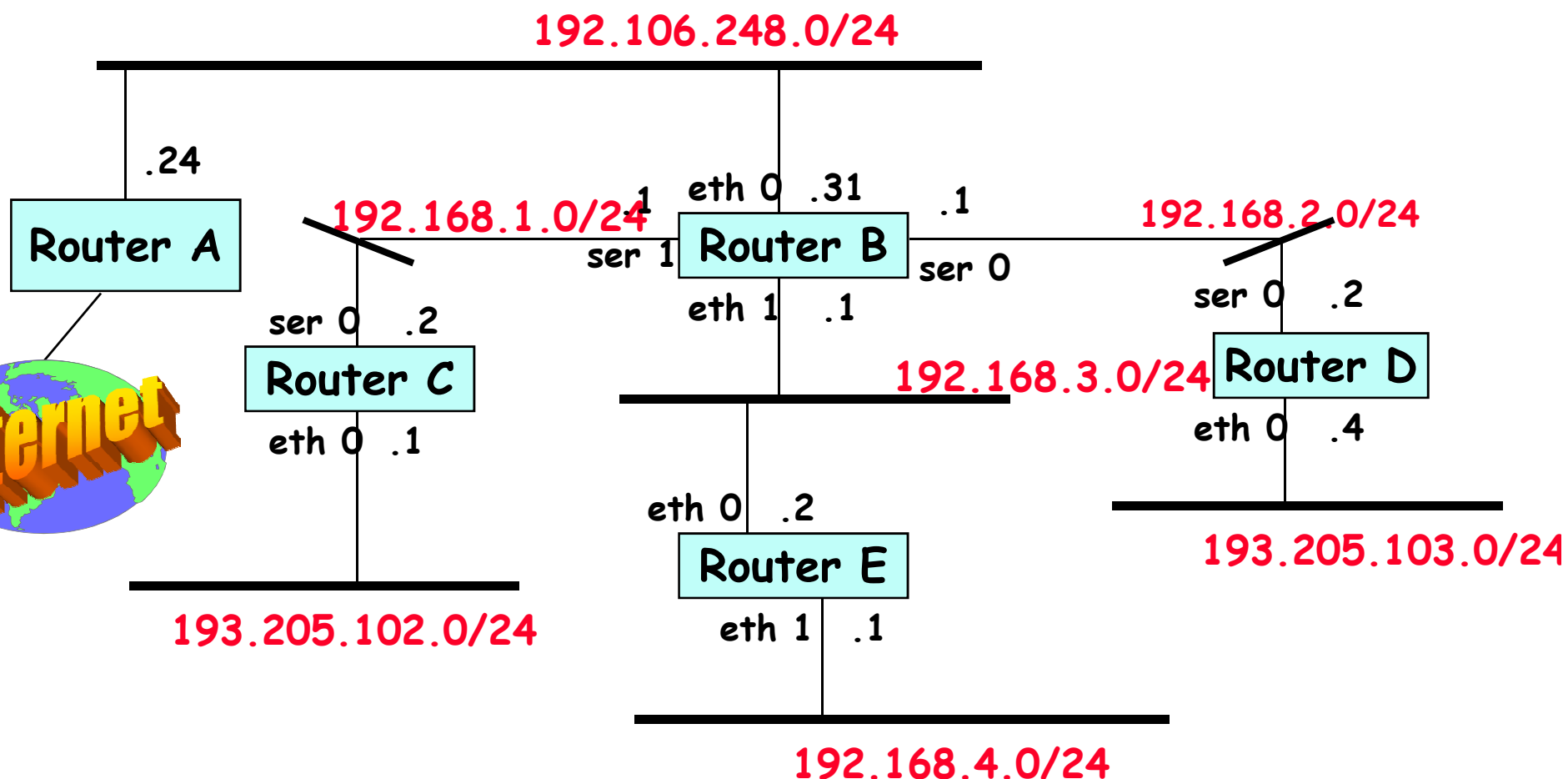
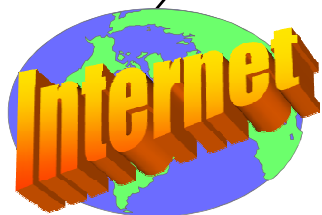
Network Prefix Next Hop Metrica

30.0.0.0/8	Direct	0
20.0.0.0/8	Direct	0
10.0.0.0/8	20.0.0.5	1
40.0.0.0/8	30.0.0.7	1

Tabella di routing di G

# Tabella di routing: esempio

Ing. P. Fazio





# Tabella di routing: router B

## □ ROUTER B (router CISCO)

router B #show ip route

N		R
192.106.248.0/24		is directly connected
192.168.1.0/24		is directly connected
192.168.2.0/24		is directly connected
192.168.3.0/24		is directly connected
193.205.102.0/24	[120/1]	via 192.168.1.2
193.205.103.0/24	[120/1]	via 192.168.2.2
192.168.4.0/24	[120/1]	via 192.168.3.2
"0.0.0.0"	[1/0]	via 192.106.248.24
<div> <div>Network Prefix</div> <div>Metrica</div> <div>Next Hop</div> </div>		

# Router di default

- Se un router non trova un instradamento nella sua tabella allora indirizza i suoi datagrammi verso un “router di default” (generalmente una macchina più potente, destinata principalmente ad operazioni di instradamento)
- Il meccanismo del router di default è usato:
  - ✗ da piccoli host che possono anche non avere una tabella propria ed che inviano al router di default tutti i datagrammi non diretti alla rete/sottorete logica cui sono collegati
  - ✗ da router con una tabella di discrete dimensioni, ma che non copre tutte le possibili destinazioni
- Quindi nella tabella di routing di un host/router deve essere presente una linea con N=“tutte le altre” e R=default router





# Algoritmo di instradamento nell'host X

- L'algoritmo di instradamento nell'host X, alla ricezione di un datagramma con indirizzo destinazione Y, si semplifica nel modo seguente:
  - 1) estrai l'indirizzo IP di destinazione (Y) dal datagramma in arrivo
  - 2) se l'indirizzo Y coincide con quello X dell'host, estraine il contenuto informativo e consegnalo agli strati superiori per l'ulteriore elaborazione
  - 3) altrimenti dichiara un errore di instradamento e scarta il datagramma



# Algoritmo di instradamento nel nodo X

Il nodo X (host terminale o router) ha ricevuto un datagramma con indirizzo IP di destinazione pari a Y

- 1) se è stata richiesta una strada specifica nel campo Source Route Option, invia il datagramma verso quella strada
- 2) se l'indirizzo Y coincide con quello di X del nodo in esame, estraine il contenuto informativo e consegnalo agli strati superiori per l'ulteriore elaborazione (può succedere per casi particolari, es. controllo)
- 3) altrimenti determina la componente Net\_Id.Subnet\_id dell'indirizzo Y (usando la maschera di sottorete)



# Algoritmo di instradamento nel nodo X

- 4) se la componente `Net_Id.Subnet_id` coincide con la corrispondente componente di X, invia il datagramma direttamente (con instradamento diretto); cioè traduci l'indirizzo IP Y in indirizzo locale ed incapsula il datagramma nell'unità dati della sottorete in questione (viene presa in considerazione anche la componente `SubHost_id`)
- 5) altrimenti, consulta la tabella di instradamento; se la componente `Net_Id.Subnet_id` è inclusa nella tabella instrada il datagramma come specificato nella tabella



# Algoritmo di instradamento nel nodo X

- 6) altrimenti, verifica se almeno la componente `Net_id` è contenuta in tabella; in tal caso instrada il datagramma come specificato in tabella (se la `Subnet_id` ha dimensione zero, i passi 5 e 6 coincidono)
- 7) altrimenti, se è stata specificata una strada di default, invia il datagramma al default router
- 8) altrimenti dichiara un errore di instradamento, notificandolo agli strati superiori (di X) e scarta il datagramma





# Aggiornamento delle tabelle di routing

- Le tabelle di routing possono essere costruite in modo:
  - × **Statico**
    - le tabelle sono definite manualmente dal gestore di rete e restano invariate fino al successivo intervento del gestore
    - si usano negli host e in router di piccole dimensioni, in zone della inter-rete relativamente stabili (sia per configurazione fisica che per tipo e carico di traffico)
    - presuppongono l'uso di criteri fissi di instradamento
  - × **Dinamico**
    - le tabelle sono calcolate dinamicamente in funzione della topologia della rete e dello stato dei link
    - presuppongono l'uso di criteri adattativi di instradamento



# Instradamento statico

Ing. P. Fazio

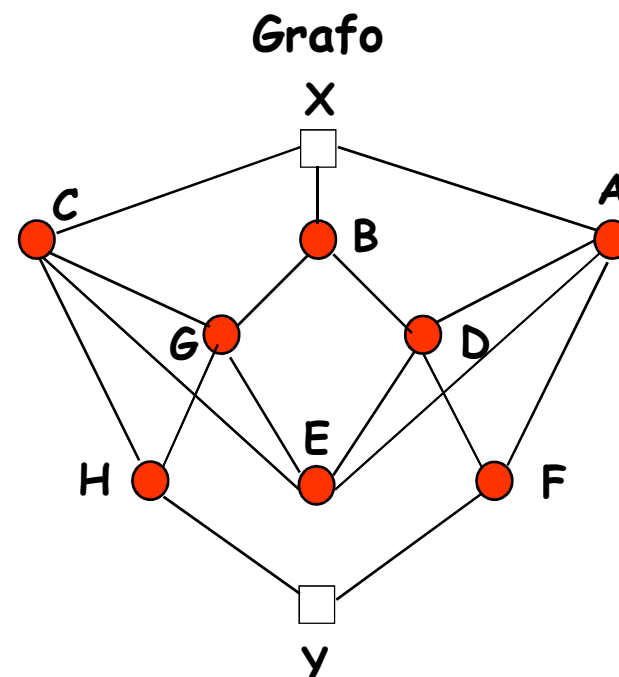
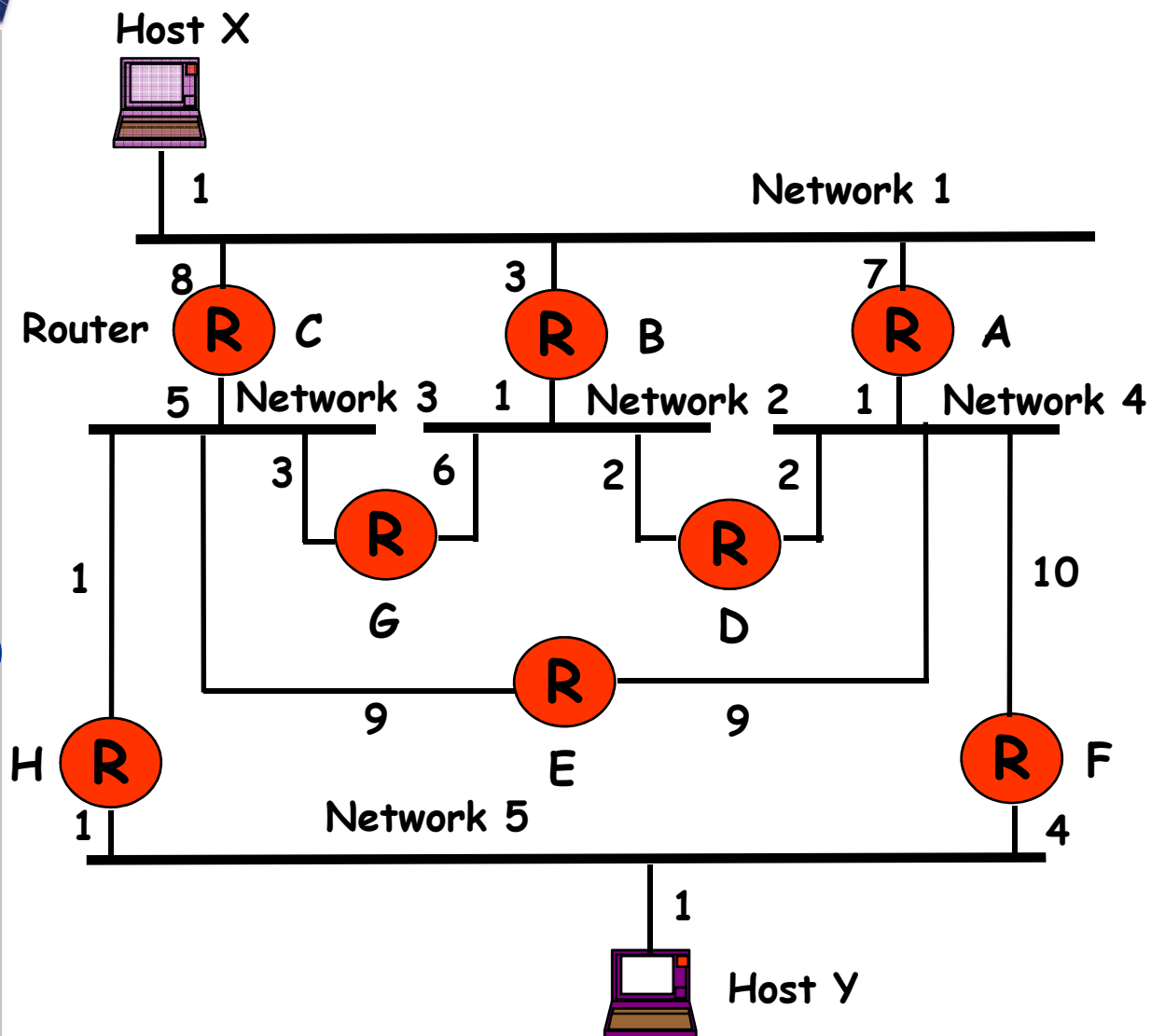
- Gli algoritmi di routing statici (non adattativi, deterministici) usano criteri fissi di instradamento
- Un “unico” cammino “permanente” è individuato tra ogni coppia di nodi origine e destinazione nella rete
- Si ha una variazione di instradamento solo se cambia la topologia della rete
- La scelta del cammino è indipendente dal carico istantaneo sulla rete

Vantaggi: semplicità implementativa

Svantaggi: scarsa flessibilità

# Instradamento statico: esempio

Ing. P. Fazio





# Instradamento statico: esempio

Ing. P. Fazio

Router A	
Net	Router
1	-
2	D
3	D
4	-
5	F

Router B	
Net	Router
1	-
2	-
3	G
4	D
5	G

Router C	
Net	Router
1	-
2	B
3	-
4	A
5	H

Router D	
Net	Router
1	B
2	-
3	G
4	-
5	F

Router E	
Net	Router
1	D
2	D
3	-
4	-
5	H

Router F	
Net	Router
1	H
2	H
3	H
4	-
5	-

Router G	
Net	Router
1	B
2	-
3	-
4	D
5	H

Router H	
Net	Router
1	C
2	G
3	-
4	G
5	-

Host X	
Net	Router
1	-
2	B
3	B
4	A
5	A



# Instradamento dinamico

- Gli algoritmi di routing dinamici (adattativi o non deterministici) si adattano alle variazioni di topologia e traffico in rete
- Vantaggi:
  - ✗ migliorano le prestazioni e contribuiscono al controllo della congestione
- Svantaggi:
  - ✗ la decisione di instradamento è più complessa, quindi il carico elaborativo nei router aumenta
  - ✗ richiedono lo scambio di informazioni tra i nodi sullo stato della rete (algoritmi distribuiti): tali informazioni sono traffico addizionale in rete, d'altra parte più informazioni si scambiano e più spesso questo avviene, migliori saranno le scelte di routing
  - ✗ esiste il rischio di oscillazioni (reazioni troppo rapide) o di inefficacia (reazioni troppo lente)
  - ✗ esiste il rischio di effetti collaterali (es. loop)



# Instradamento Dinamico

Ing. P. Fazio

- All'accensione un host/router inizializza la sua tabella di routing usando le informazioni contenute in un dispositivo di memoria di massa o interrogando opportuni server
- In seguito ogni router aggiorna o incrementa le informazioni di instradamento in proprio possesso dialogando con gli altri router tramite i protocolli di routing
- I protocolli di routing sono implementati nei router e si occupano di acquisire automaticamente nuove informazioni di instradamento (esaminando lo stato della rete a intervalli regolari), comunicare le informazioni aggiornate ai router che aggiornano le tabelle di routing di conseguenza



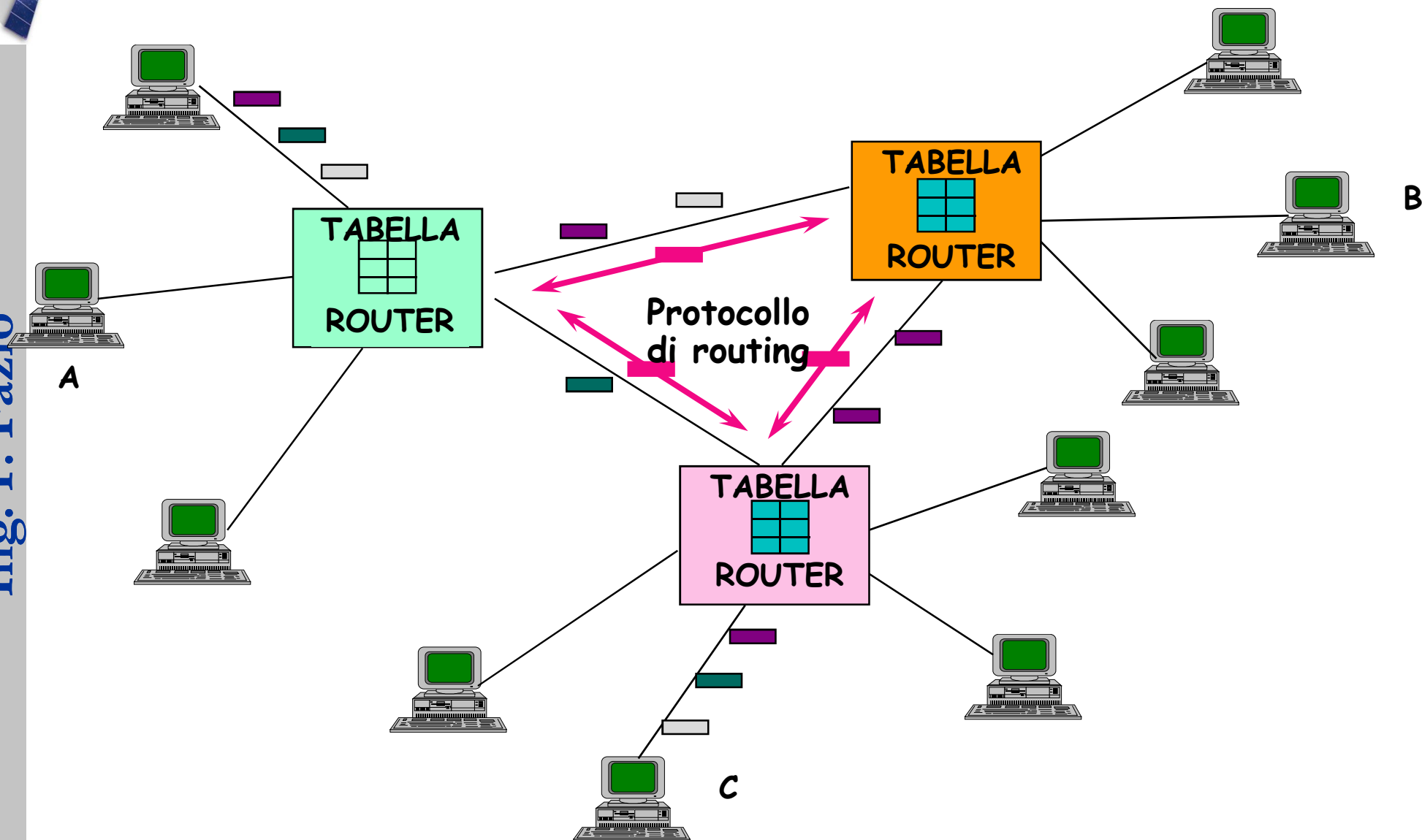
# Instradamento dinamico

- Le tabelle di instradamento devono essere aggiornate continuamente (anche ad intervalli di pochi secondi)
- La necessità di un aggiornamento dinamico delle tabelle è dovuta al fatto che:
  - ✗ Internet non può essere considerata stabile; nuovi host e sottoreti vengono aggiunti ed eliminati frequentemente e molti percorsi diventano disponibili o non (in caso di guasti alcuni cammini non sono utilizzabili)
  - ✗ Lo stato di occupazione delle risorse di rete varia continuamente



# Instradamento Dinamico: esempio

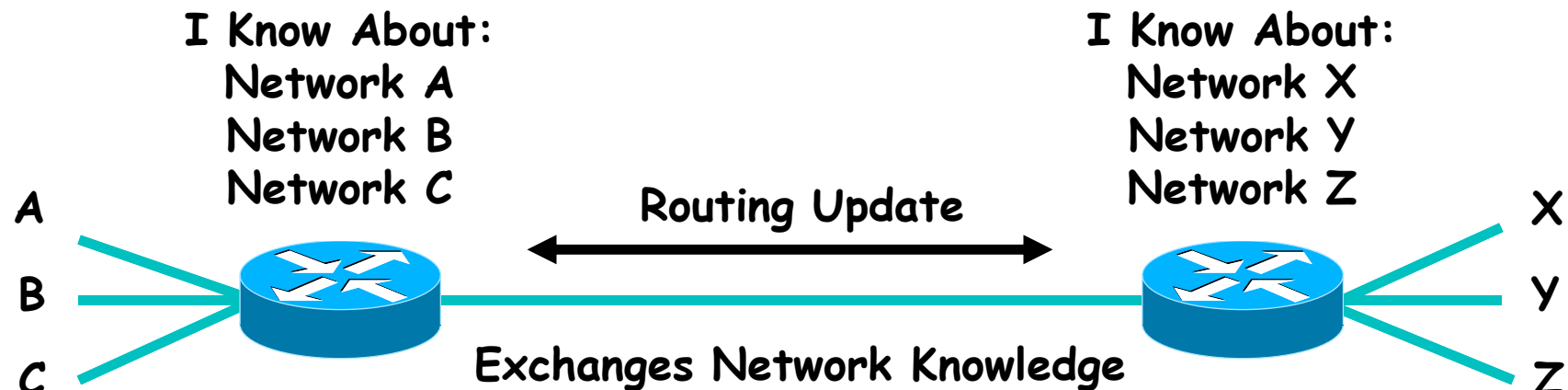
Ing. P. Fazio





# Instradamento dinamico

- I protocolli di routing sono utilizzati dai router per determinare il percorso per raggiungere le reti non direttamente connesse
- Esistono diversi protocolli di routing, ciascuno con caratteristiche più o meno attraenti



# Sistemi autonomi

- Si definisce “sistema autonomo” (AS) una porzione di rete (insieme di host, router e sottoreti) amministrata da un unico gestore
- I nodi che instradano messaggi all'interno dell'AS sono detti interior router, mentre quelli che instradano messaggi tra AS diversi sono detti exterior router
- L'AS è libero di scegliere qualsiasi (uno o più) protocollo di routing da usare tra i router interni al suo sistema autonomo



# Sistemi autonomi

Ing. P. Fazio

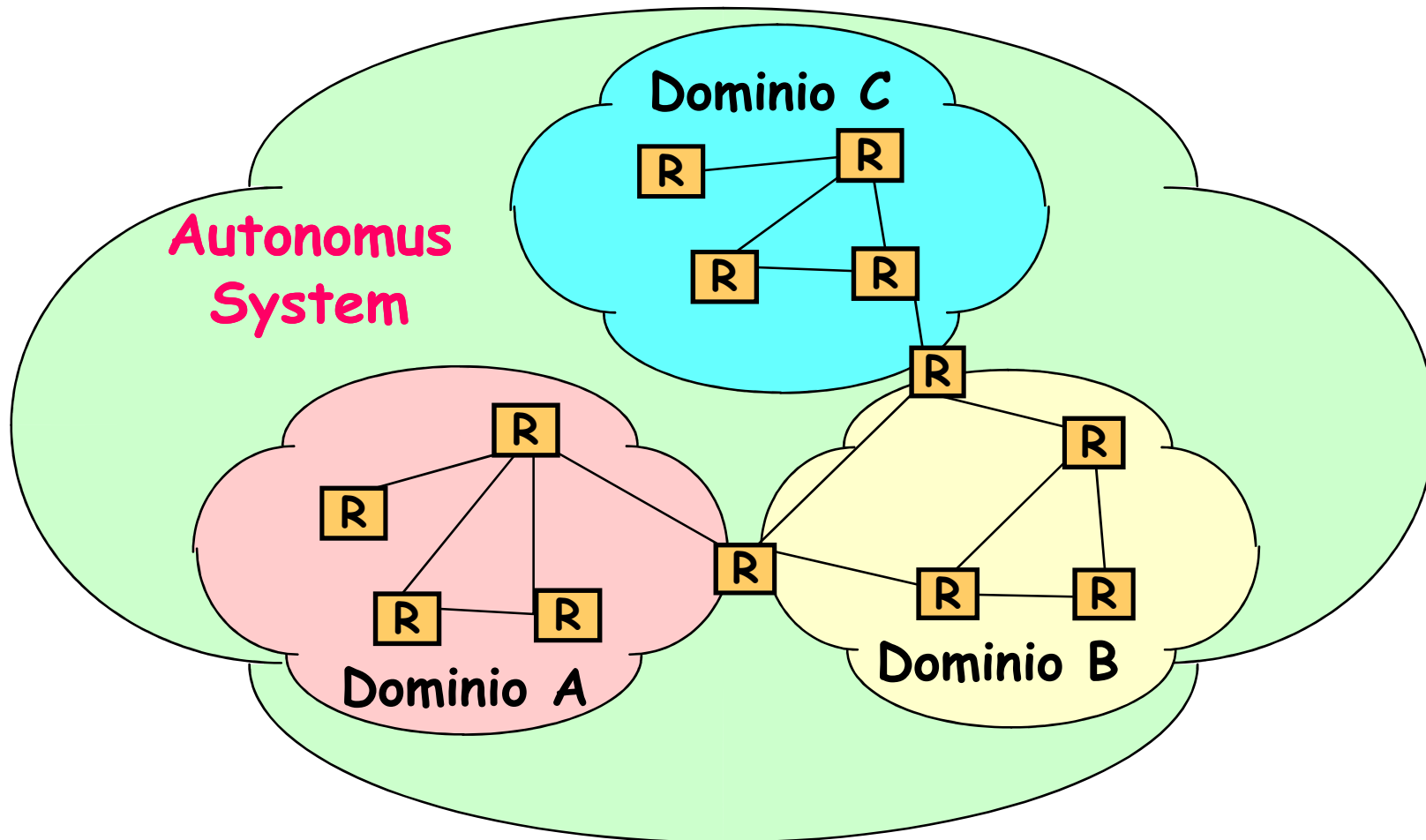


- L'AS decide una particolare 'politica di routing' per lo scambio di informazioni di routing con il resto della rete:
  - ✗ decidere quali informazioni di routing accettare e quali inoltrare, ovvero decidere come gestire il traffico verso la rete esterna, ad esempio quali AS attraversare per raggiungere una destinazione remota
- Gli AS sono identificati da un AS number assegnato da RIPE/interNIC, univoco a livello mondiale
- Un AS può contenere uno o più domini di routing



# Autonomous System (AS)

Ing. P. Fazio



# Sistemi autonomi

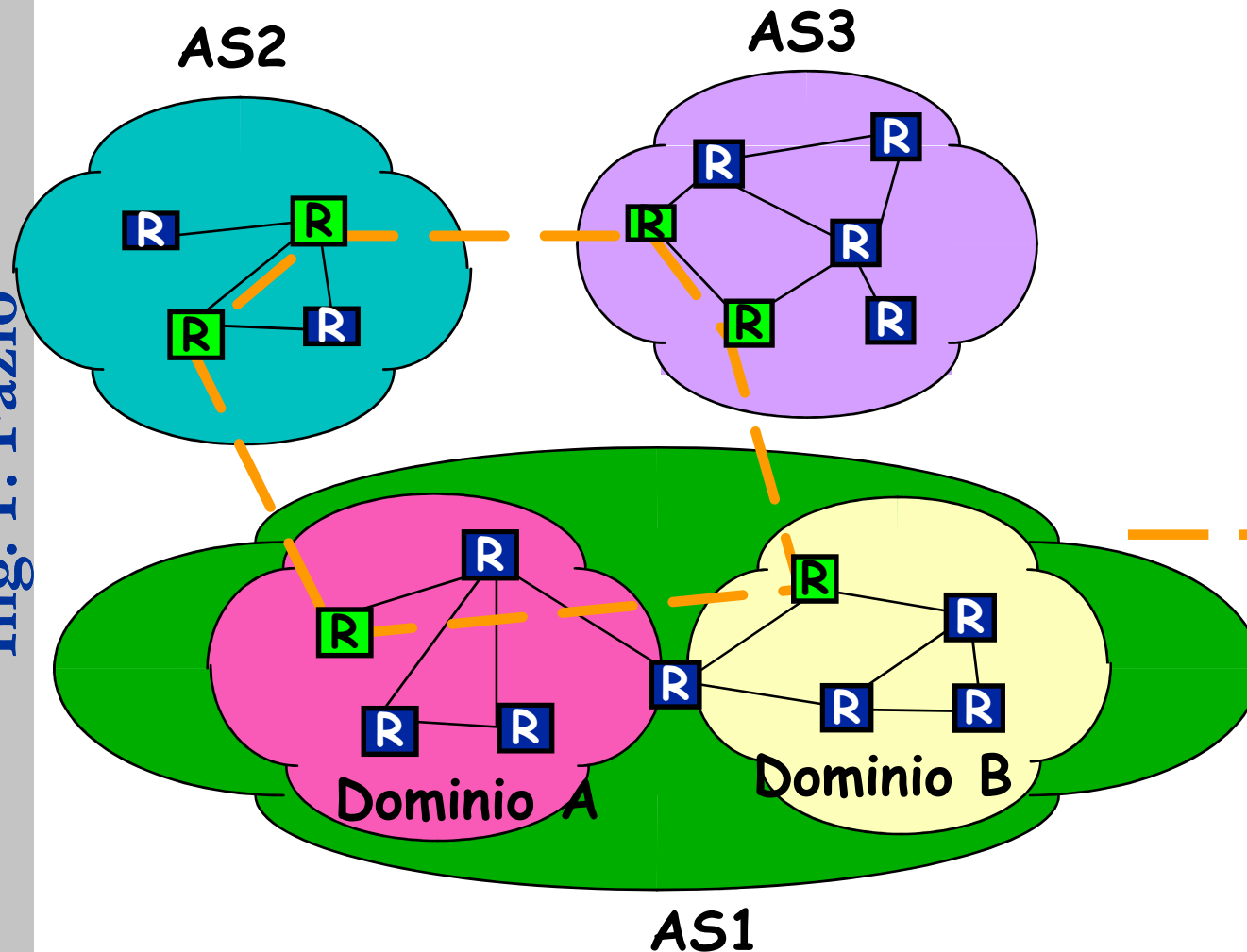
- Le informazioni di instradamento riguardanti i cammini all'interno di un AS e la raccolta di dati da inviare ai core router sono gestiti per mezzo di Interior Gateway Protocols (IGP)
- Le informazioni di instradamento riguardanti cammini che coinvolgono più di un AS sono gestite mediante Exterior Gateway Protocols (EGP)
- I messaggi di tutti i protocolli di routing sono trasportati all'interno di datagrammi IP





# Domini di routing e AS

Ing. P. Fazio



## Protocolli IGP:

### ➤ Distance Vector

- ★ RIP
- ★ RIPv2
- ★ IGRP
- ★ E-IGRP

### ➤ Link state

- ★ OSPF

## Protocolli EGP

### ➤ BGP



Ing. P. Fazio

# Teoria dei Grafi



# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Un grafo  $G(V,E)$  è dato da
  - ✗ un insieme  $V$  di nodi o vertici
  - ✗ un insieme  $E$  di rami (edge) o archi, ogni ramo connette una coppia di nodi
- La cardinalità  $|V|$  dell'insieme dei nodi è detta ordine del grafo  $G$
- La cardinalità  $|E|$  dell'insieme dei rami è detta dimensione del grafo  $G$
- Una qualsiasi rete a pacchetto può essere modellata come un grafo (orientato e pesato)
  - ✗ i nodi sono i commutatori e/o router
  - ✗ i rami sono le linee trasmissive





# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Due vertici  $i$  e  $j$  sono detti adiacenti se sono connessi da un ramo  $(i,j)$
- Il ramo  $(i,j)$  è detto incidente ai nodi  $i$  e  $j$
- Due rami incidenti sulla stessa coppia di vertici si dicono paralleli
- Un ramo incidente su un solo vertice si dice loop
- Un grafo senza loop né rami paralleli si dice grafo semplice



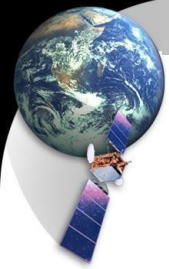
# Teoria dei Grafi

- Un Grafo può essere rappresentato dalla sua Matrice di Adiacenza  $A$ , di dimensioni  $|V| \times |V|$ , il cui generico elemento  $a_{ij}$ :

$$a_{ij} = 1 \text{ se } (i,j) \in E$$

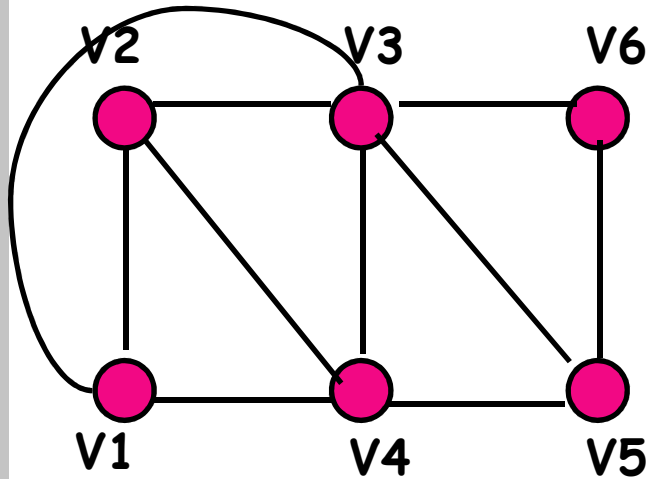
$$a_{ij} = 0 \text{ altrimenti}$$

- La matrice è simmetrica rispetto alla diagonale principale, perché un ramo è definito come una coppia “non ordinata” di nodi, quindi  $(i,j) = (j,i)$



# Matrice di adiacenza: esempio

Ing. P. Fazio



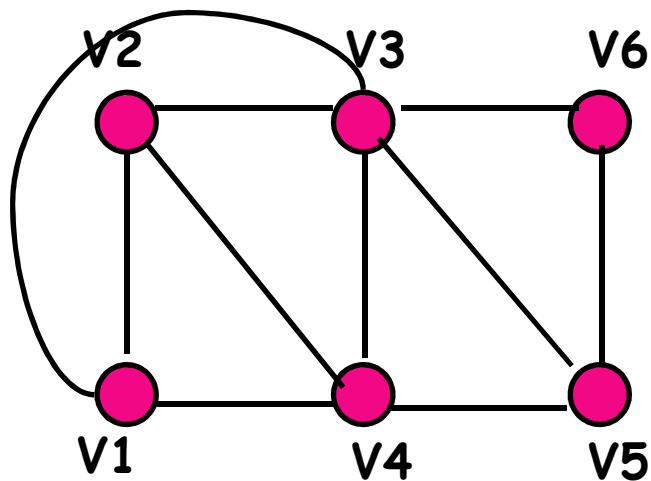
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V1	0	1	1	1	0	0
V2	1	0	1	1	0	0
V3	1	1	0	1	1	1
V4	1	1	1	0	1	0
V5	0	0	1	1	0	1
V6	0	0	1	0	1	0



# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Un cammino (path) tra due nodi  $i$  e  $j$  è una sequenza di nodi e rami, a partire dal nodo  $i$  fino al nodo  $j$ , tale che ogni ramo è incidente al nodo precedente e successivo
- Un cammino in cui ogni nodo e ogni ramo appaiono una sola volta è detto cammino semplice (simple path)



Cammini semplici da V1 a V6 sono:

V1 V2 V3 V4 V5 V6

V1 V2 V3 V5 V6

V1 V2 V3 V6

V1 V3 V6

Ecc.



# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Il minimo numero di nodi che compone un cammino tra due nodi  $i$  e  $j$  è detta distanza tra i due nodi
  - ✗ Nell'es. precedente la distanza tra  $V1$  e  $V6$  è 3 e  $(V1, V3, V6)$  definisce il cammino a distanza minima
- Un ciclo è un cammino in cui il nodo di partenza coincide con il nodo di arrivo
  - ✗ Nell'es. precedente  $V1 V3 V4 V1$
- Un grafo  $G$  è detto connesso se esiste un cammino tra ogni sua coppia di nodi



# Teoria dei Grafi

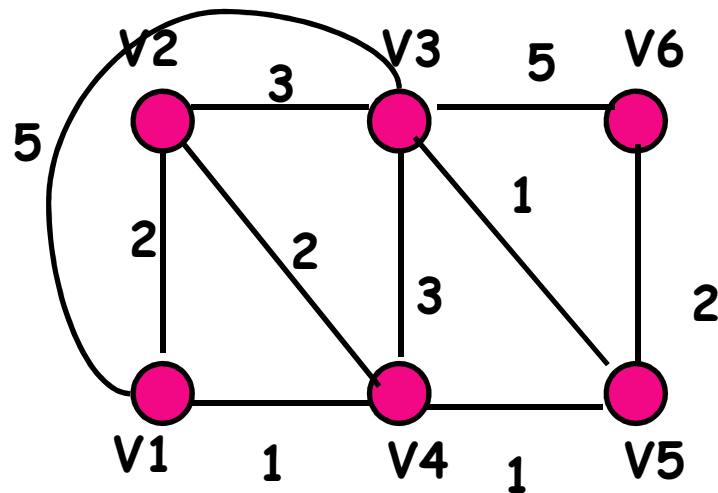
Ing. P. Fazio

- Un grafo orientato è un grafo in cui i rami hanno un verso di percorrenza, cioè ogni ramo è definito come una coppia ordinata di vertici
  - ✗ la matrice di adiacenza di un grafo orientato non è necessariamente simmetrica
- Un grafo pesato è un grafo in cui a ciascun ramo  $(i,j)$  è associato un numero  $w_{ij}$  (peso del ramo)
  - ✗ la matrice di adiacenza di un grafo pesato contiene i pesi dei rami
- Si definisce lunghezza di un cammino in un grafo pesato è data dalla somma dei pesi associati ai rami del cammino



# Teoria dei Grafi

- Si noti che non sempre il cammino a distanza minima coincide col cammino a lunghezza minima



Il cammino a distanza minima tra  
V1 e V6 è (V1,V3,V6)

Il cammino a lunghezza minima è  
(V1,V4,V5,V6)



# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Una qualsiasi rete a pacchetto può essere modellata come un grafo orientato e pesato
- L'instradamento (routing) di un pacchetto equivale alla ricerca di un cammino nel grafo associato della rete
- Ricerca del cammino a minima distanza
  - × grafo non pesato
- Ricerca del cammino a minima lunghezza
  - × grafo pesato (costo, congestione, capacità, ecc.)





# Teoria dei Grafi

- Un grafo semplice è detto albero (tree) se:
  - × tra ogni coppia di nodi  $i$  e  $j$  esiste un unico cammino semplice
  - × detto  $N$  il numero di nodi, il numero di rami è  $N-1$  e il grafo è connesso e senza cicli
- Un nodo qualsiasi dell'albero può essere scelto come nodo radice; quindi l'albero si costruisce disponendo i nodi in livelli successivi a partire dalla radice (livello 0)
  - × i nodi adiacenti alla radice al I livello; i nodi adiacenti ai nodi del I livello al II livello e così via...
- In un albero:
  - × ogni nodo, tranne la radice, ha un solo nodo padre
  - × ogni nodo ha zero o più nodi figli
  - × un nodo senza figli è detto foglia



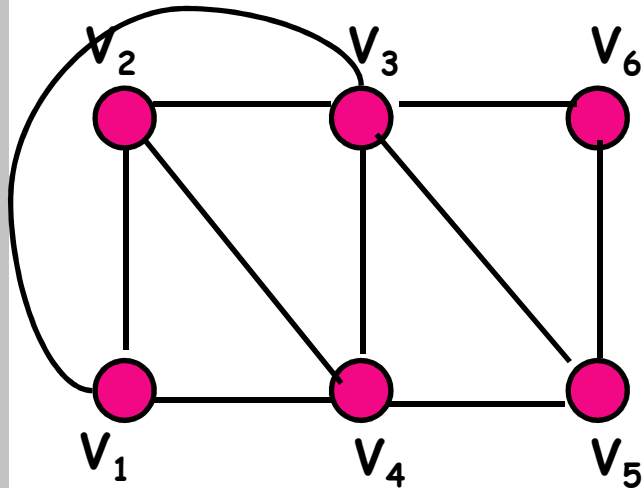
# Teoria dei Grafi

Ing. P. Fazio

- Un sottografo di un grafo  $G(V,E)$  è un grafo ottenuto dal grafo  $G$ 
  - × scegliendo un sottoinsieme di rami e di nodi appartenenti a  $G$
  - × per ogni ramo scelto devono essere compresi, nel sottoinsieme dei nodi, i nodi in cui il ramo è incidente
- Un sottografo  $T$  di un grafo  $G$  è chiamato Spanning Tree di  $G$  se
  - ×  $T$  è un albero
  - ×  $T$  include tutti i nodi di  $G$
- Uno spanning tree di un grafo  $G$  si ottiene da  $G$  rimuovendo gli archi in modo da eliminare i cicli (il sottografo è connesso)

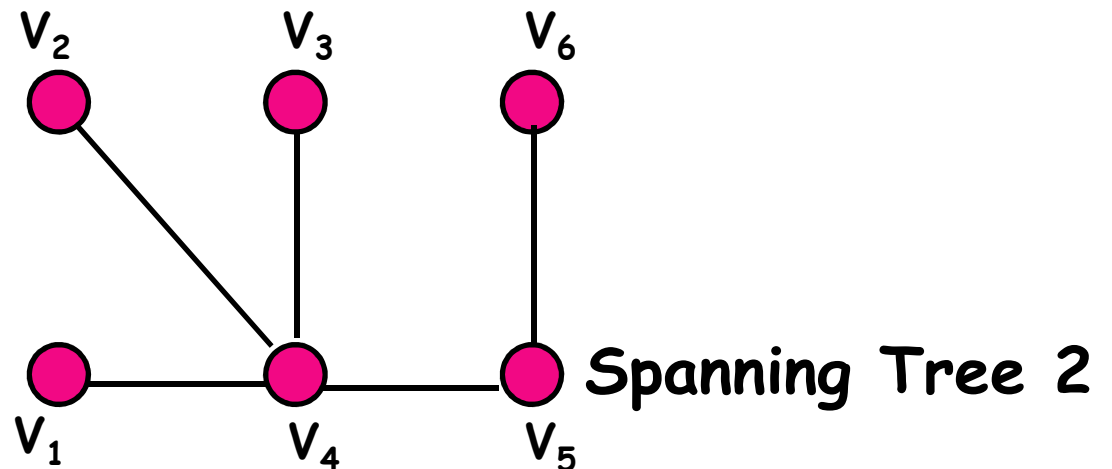
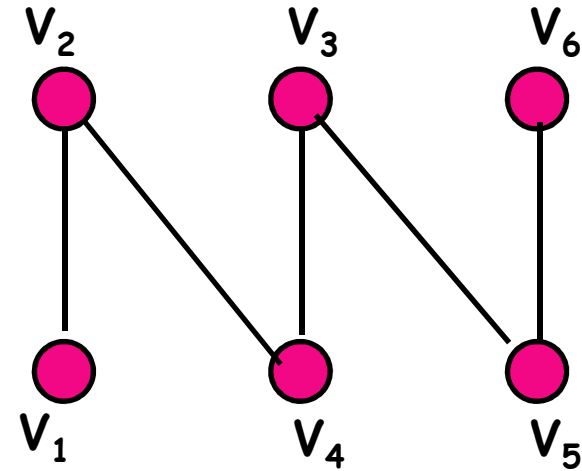


**Grafo  $G$**



Lo Spanning Tree di  
un grafo non è unico

**Spanning Tree 1**





# Algoritmi di routing a costo minimo

- In Internet, le decisioni di routing sono equivalenti al problema di trovare un percorso in un grafo
- Le decisioni di routing si basano su una qualche forma di criterio di costo minimo
  - ✗ se il criterio è il numero di hop (ogni hop/ramo vale 1), questo corrisponde a trovare il cammino di distanza minima tra ogni coppia di nodi nel grafo della rete
  - ✗ se a un hop è associato un costo (dipende dalla capacità, dal carico, etc.), questo corrisponde a trovare il cammino di lunghezza minima tra ogni coppia di nodi nel grafo pesato della rete
- La maggior parte degli algoritmi di routing a costo minimo in uso in Internet sono variazioni di due algoritmi: l'algoritmo di Dijkstra e di Bellman-Ford
  - ✗ Si tratta di algoritmi per il calcolo del minimum spanning tree