



Corso di
SISTEMI TELEMATICI
a.a. 2011-2012

Livello rete: Instradamento

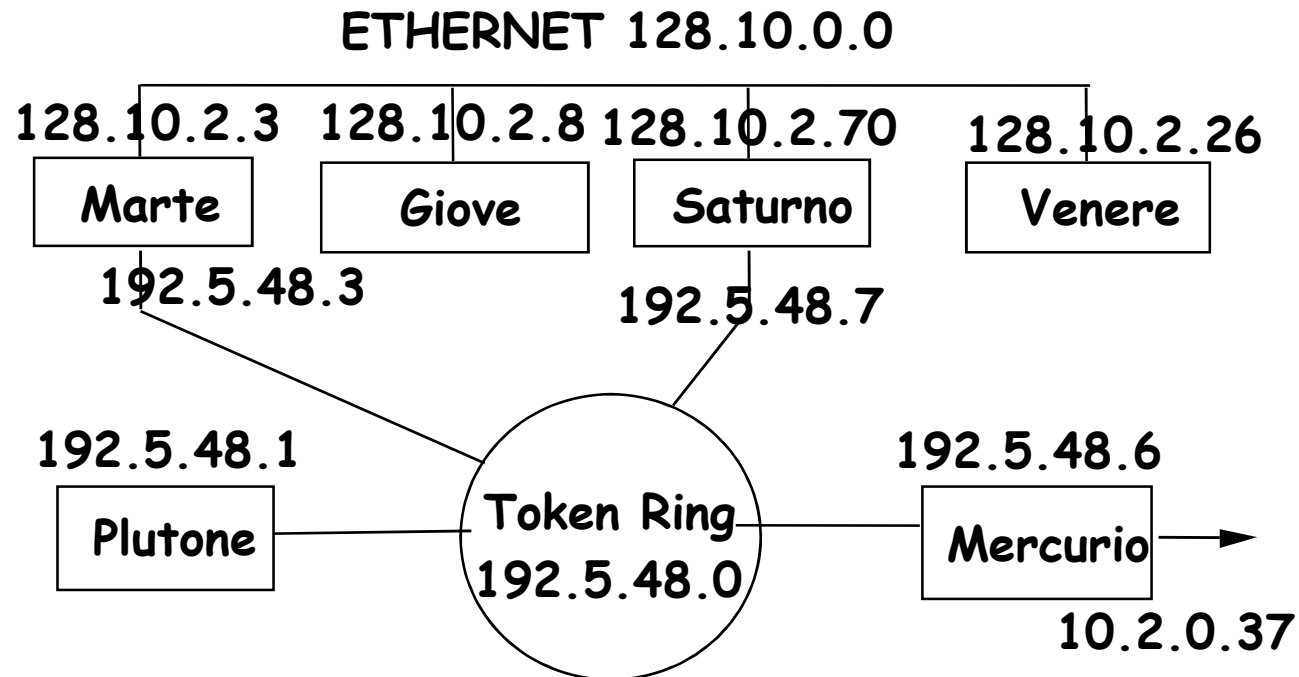


Router IP

- 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



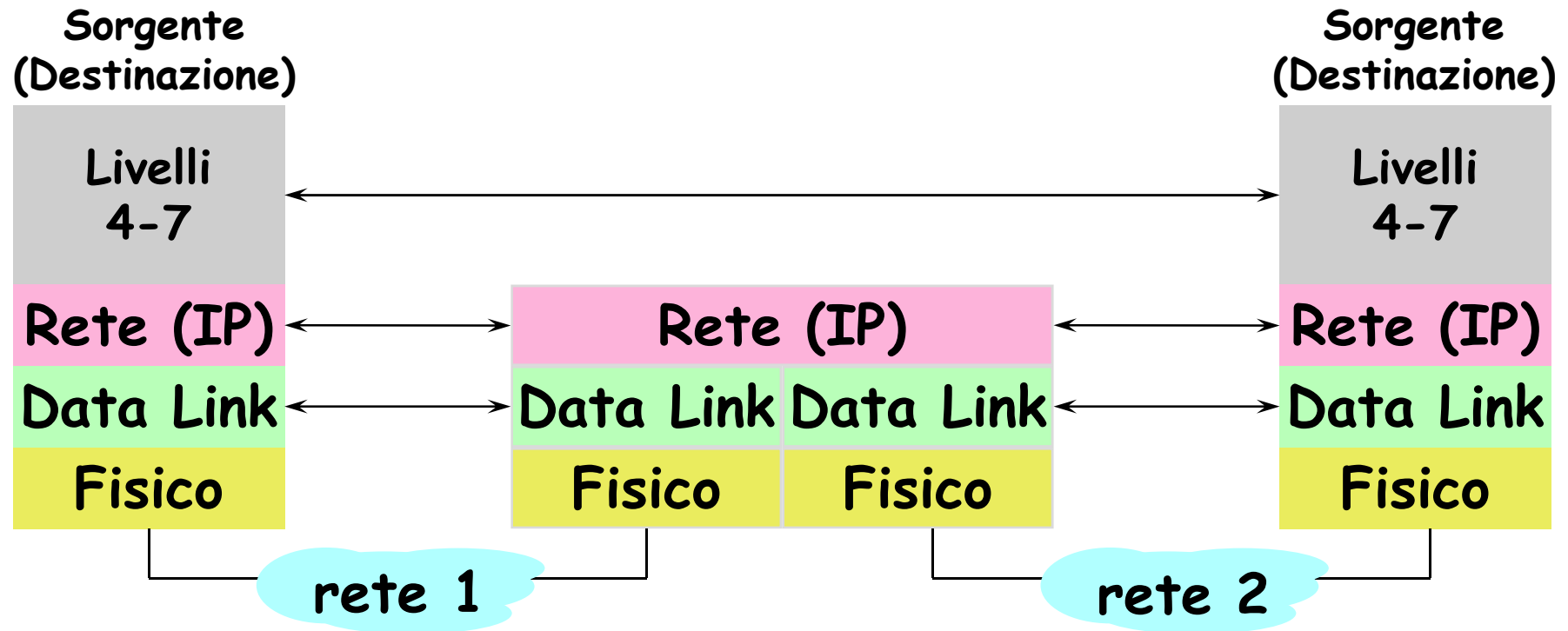
Router IP



- “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



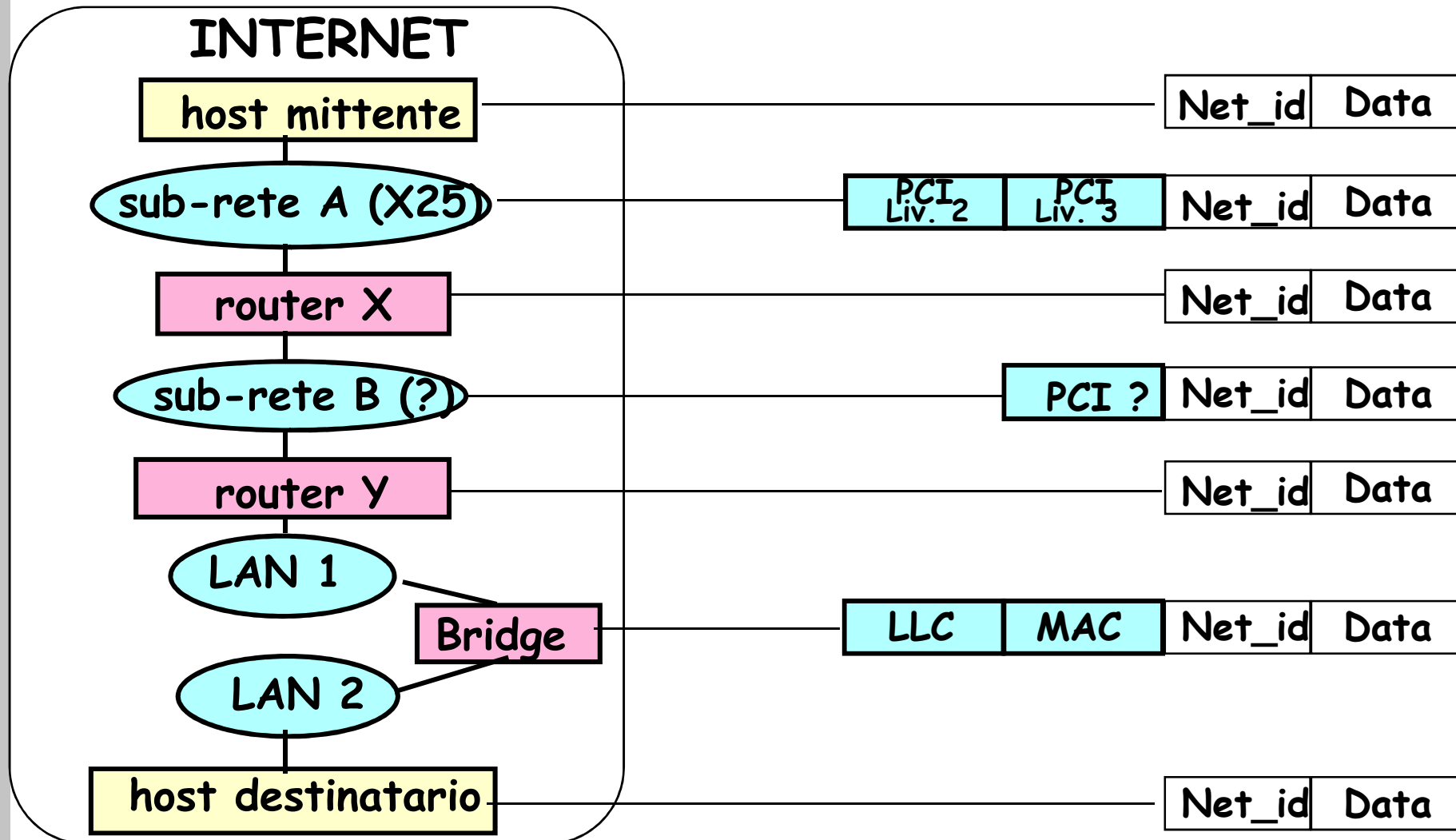
- I router lavorano al livello 3 OSI (livello di rete)
- Sono indirizzati esplicitamente
- I nodi della rete devono conoscere l'indirizzo del router

Instradamento IP

- 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



Instradamento IP



- 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

Instradamento IP



- La decisione tra instradamento diretto e indiretto viene presa in base alla corrispondenza tra l'indirizzo di destinazione e gli indirizzi delle sottoreti a cui il nodo è direttamente connesso
- Caso 1: la sottorete logica dell'host coincide con tutta la sottorete fisica
 - ✕ l'host mittente confronta la parte del proprio indirizzo corrispondente a Net-id+Subnet-id con la parte in questione dell'indirizzo dell'host di destinazione (se non si usano le subnet il confronto avviene solo con Net-id)
- Caso 2: la sottorete logica dell'host è una parte della sottorete fisica
 - ✕ l'host mittente usa l'instradamento diretto solo per gli host della stessa sotto-rete logica
 - ✕ l'host è configurato con l'elenco delle sotto-reti logiche direttamente raggiungibili



Università della Calabria D.E.I.S.

Instradamento IP



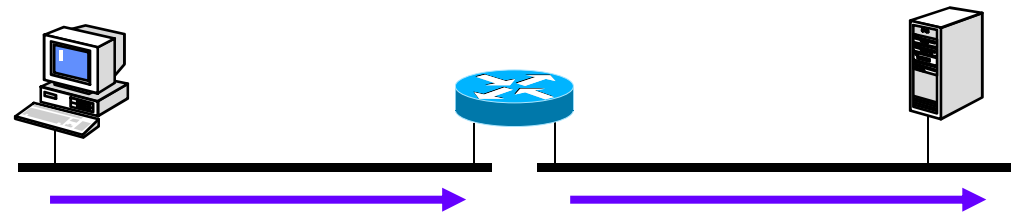
$\text{Bitwise_AND}(\text{IP_destination_address}, \text{my_subnet_mask})$
=
 $\text{Bitwise_AND}(\text{my_IP_address}, \text{my_subnet_mask})$

SI

NO

Instradamento **diretto**

Instradamento **indiretto**





Instradamento IP

Bitwise_AND (194.27.3.48, 255.255.255.192)
=
Bitwise_AND (194.27.3.16, 255.255.255.192)

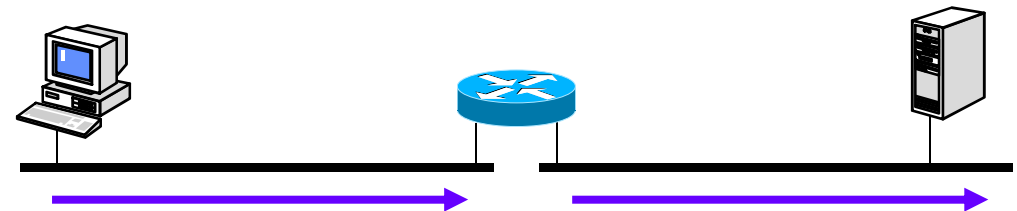
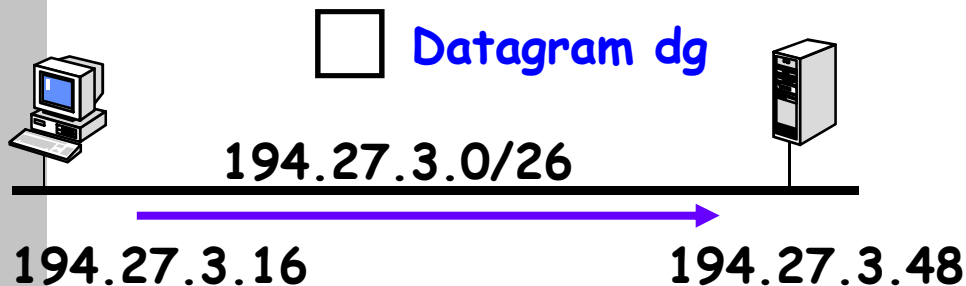
SI

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

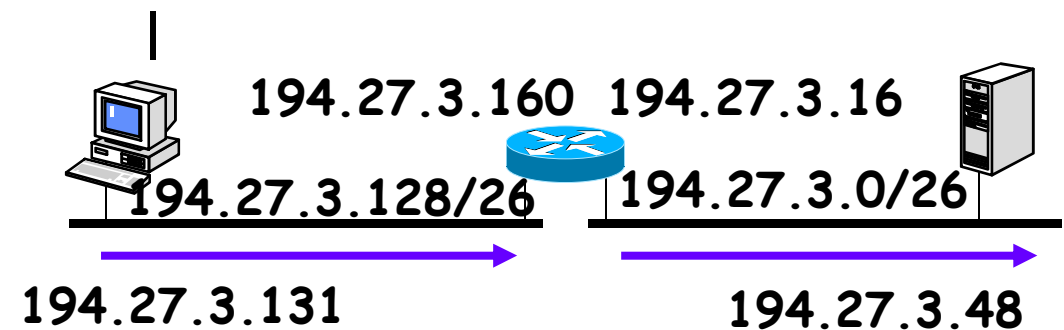
Bitwise_AND (194.27.3.48, 255.255.255.192)
=
Bitwise_AND (194.27.3.131, 255.255.255.192)

SI

NO

Instradamento **diretto**

Instradamento **indiretto**



...ELSE

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



Instradamento diretto

- 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

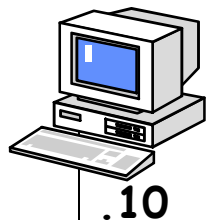


Instradamento diretto

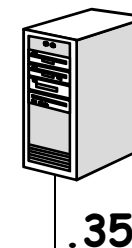
- Se un host IP deve consegnare un datagramma ad un altro host attraverso una sottorete comune, l'host sorgente deve conoscere l'indirizzo di sottorete del destinatario
- E' necessaria un'operazione di traduzione di indirizzi IP in indirizzi specifici della sotto-rete (es. MAC)
- La corrispondenza tra 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



Rete 192.168.10.0/24



MAC 00082C785852

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

MAC 000060AD8744



Instradamento indiretto

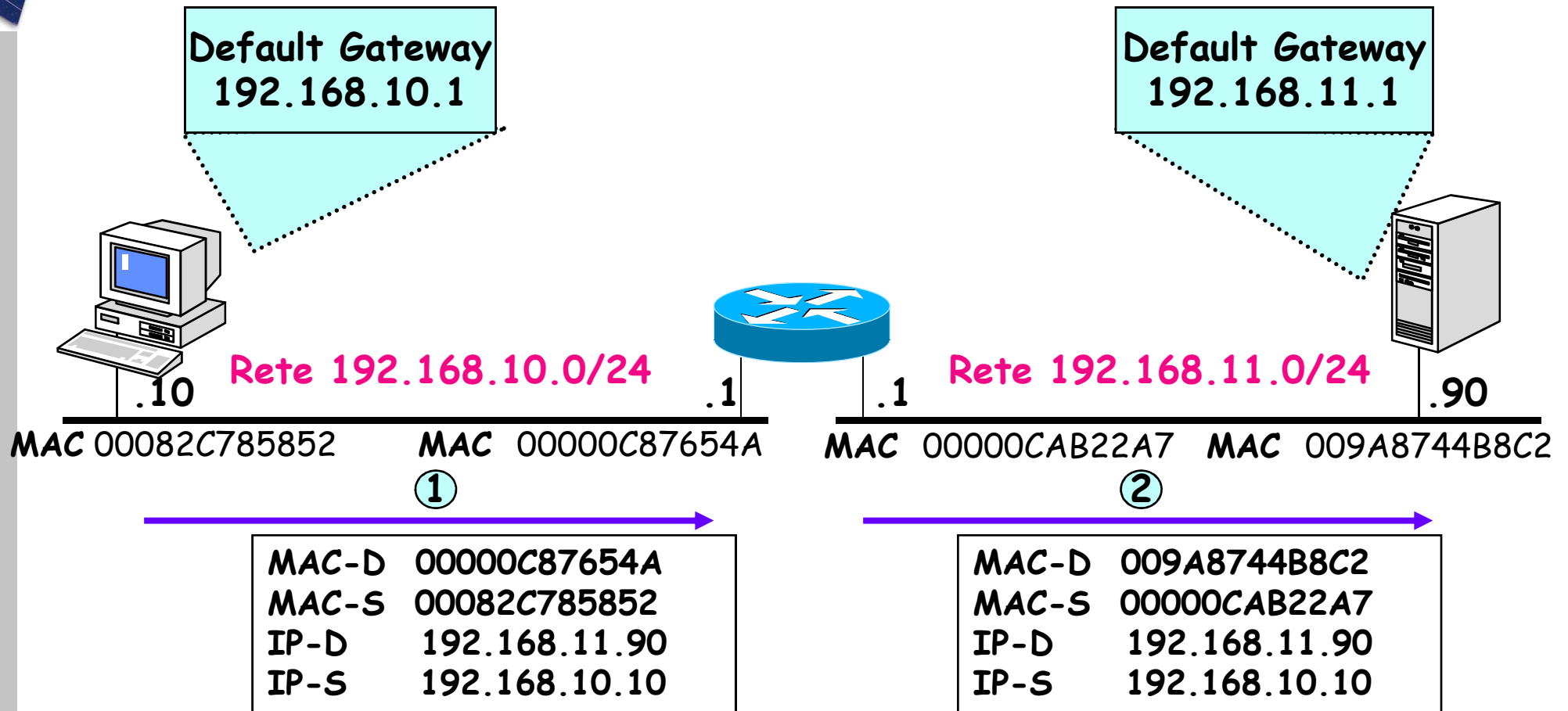
- L'host mittente identifica il router più vicino a cui inviare il datagramma IP utilizzando la sotto-rete fisica a cui è connesso (instradamento diretto)
- Il router esamina il datagramma ricevuto e decide verso quale altro router (next-hop router) indirizzarlo, nel cammino verso la rete logica di destinazione
- 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



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

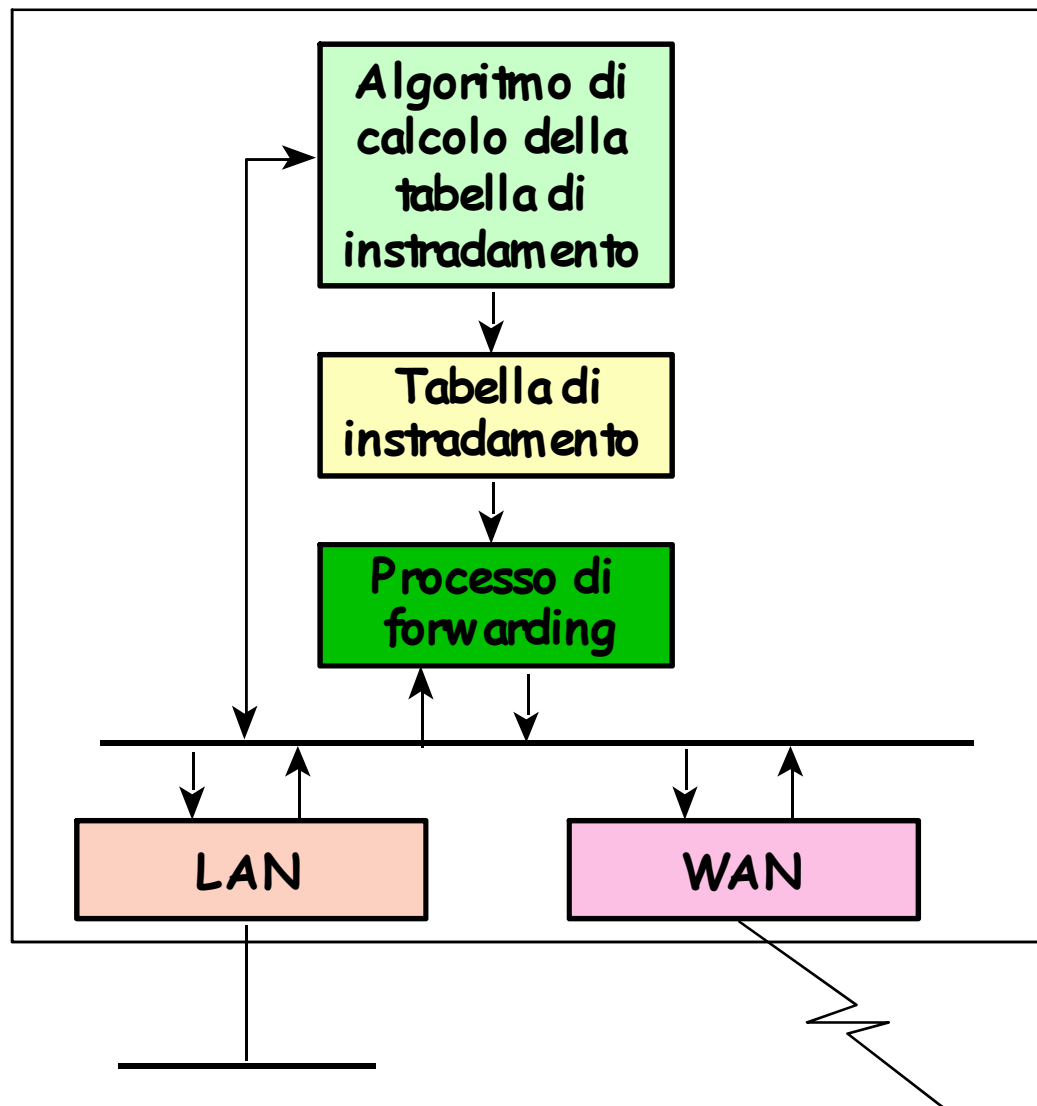




Tabelle di routing: esempio

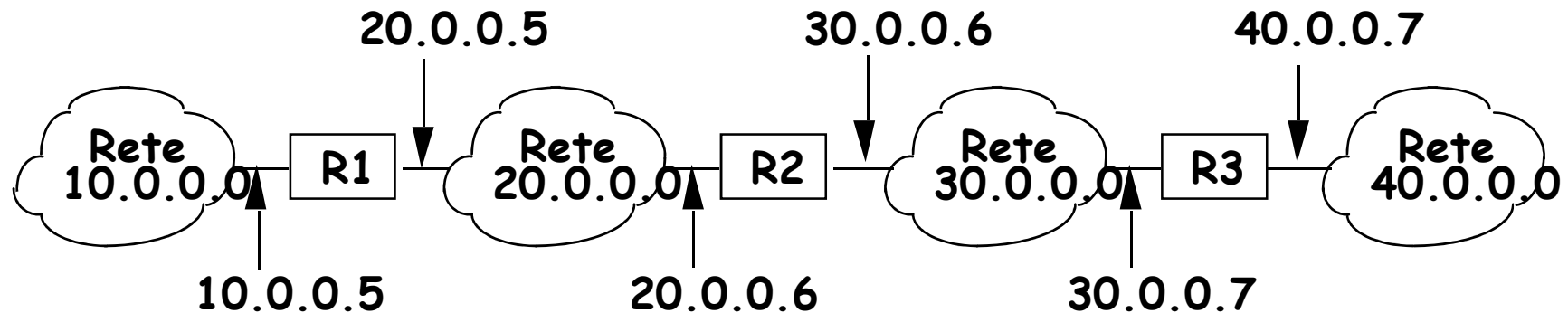


Tabella di instradamento di R2

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



- 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**

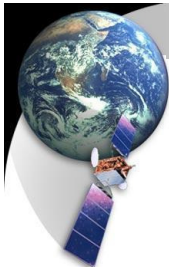
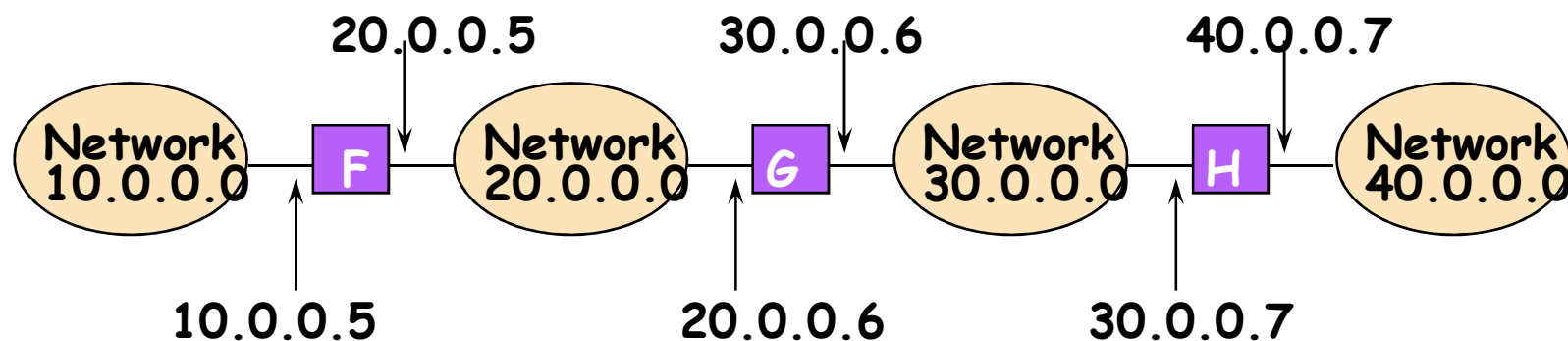


Tabelle di routing: esempio



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

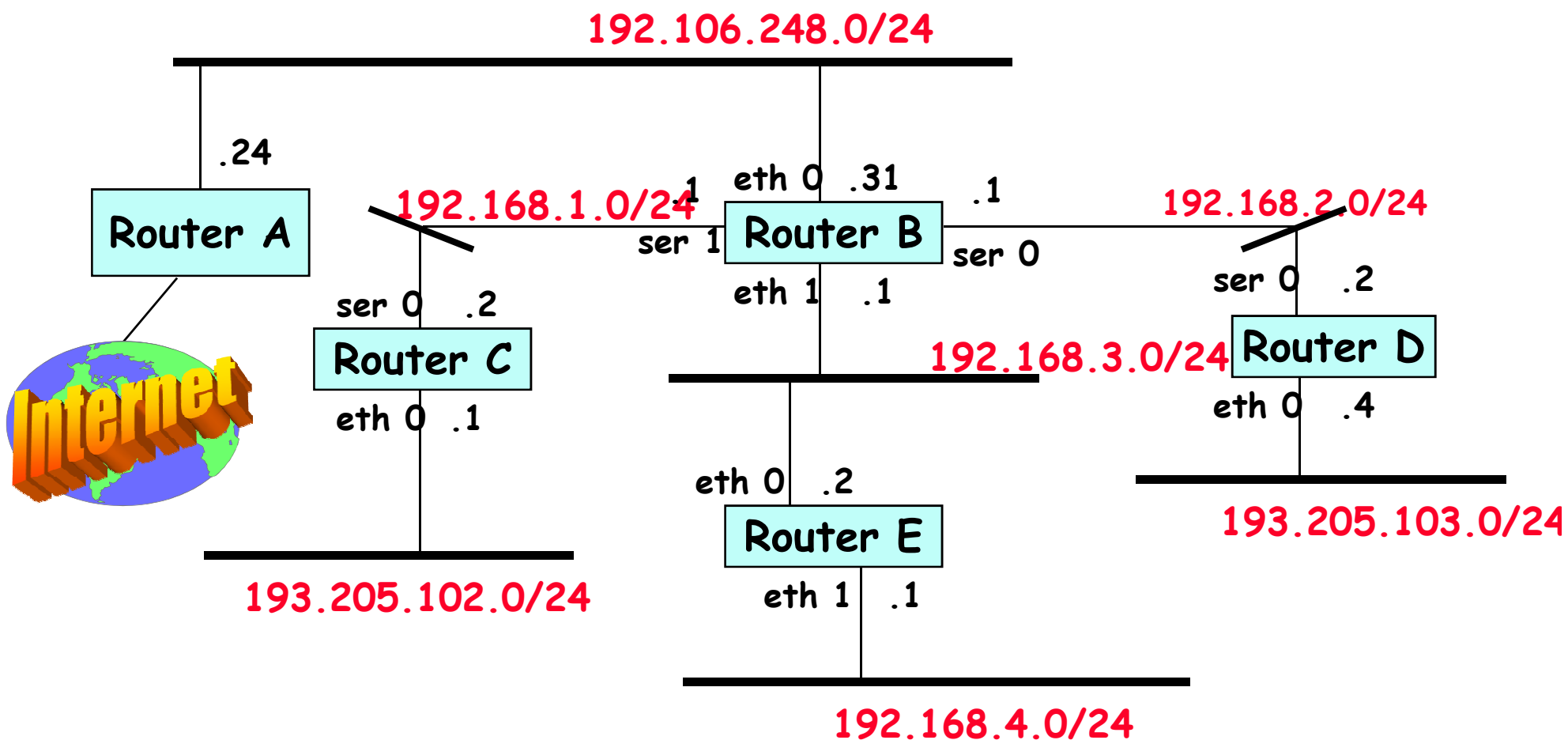




Tabella di routing: router B

□ 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 nel nodo X

Il nodo X ha ricevuto un datagramma con indirizzo IP di destinazione pari a Y

- 1) estrai l'indirizzo IP di destinazione (Y) dal datagramma in arrivo
- 2) se è stata richiesta una strada specifica nel campo Source Route Option, invialo verso quella strada (trascurando le informazioni nella tabella di routing)
- 3) 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 (anche i datagrammi broadcast)
- 4) decrementa il Time to live del datagramma; se questo è arrivato a zero, scarta il datagramma e comunicalo all'host mittente (tramite ICMP)



Algoritmo di instradamento nel nodo X

- 5) altrimenti determina la componente `Net_Id.Subnet_id` dell'indirizzo Y (usando la maschera di sottorete)
- 6) 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 `Host_id`)
- 7) 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

- 8) 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 7 e 8 coincidono)
- 9) altrimenti, se è stata specificata una strada di default, invia il datagramma al default router
- 10) altrimenti dichiara un errore di instradamento (invocando eventualmente ICMP) e scarta il datagramma

Precisazioni

- L'algoritmo di instradamento nel nodo X descritto è teoricamente valido sia per host che per router
- Esistono però delle differenze tra host e router, perché un host non contiene tutti i protocolli di un router e, inoltre, la sua tabella di routing tipicamente è configurata dall'amministratore di rete e non viene aggiornata dinamicamente, come accade per i router
- La tendenza è quella di evitare che un host rilanci datagrammi non diretti a se stesso:
 - ✗ se un host ha ricevuto un datagramma non diretto a se stesso, significa che si è verificato un errore di instradamento; se l'host vi pone rimedio è difficile per il gestore di rete individuare l'errore



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 (host/router) X ha generato 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



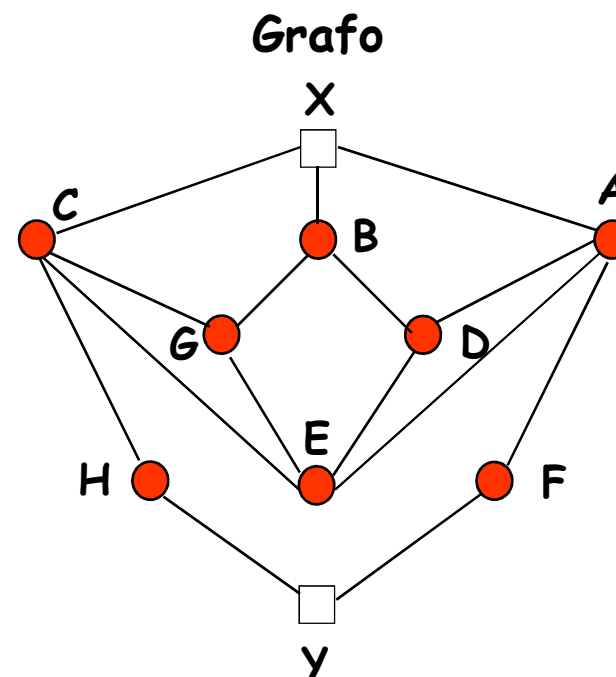
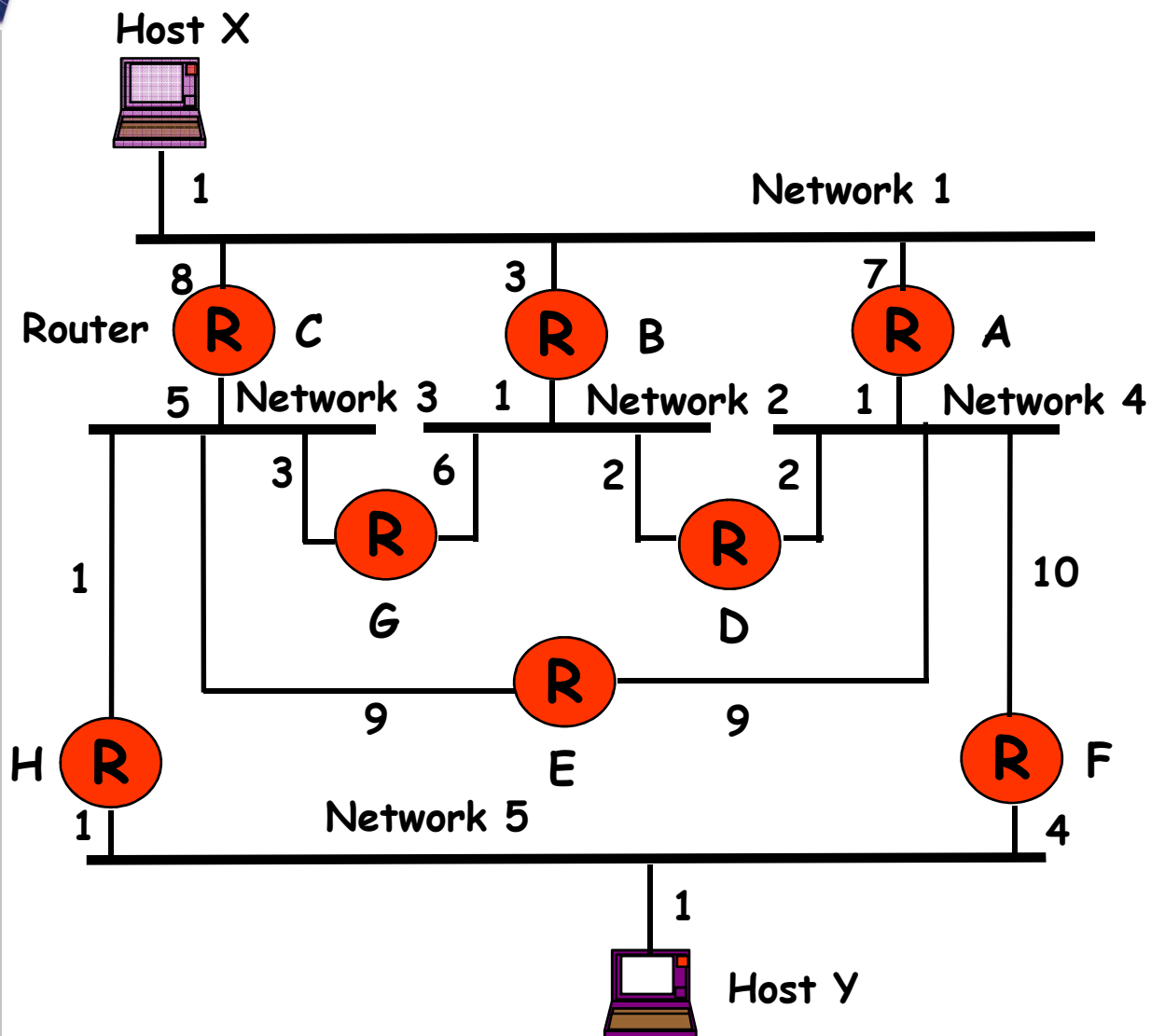
Instradamento statico

- 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



Instradamento statico: esempio



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

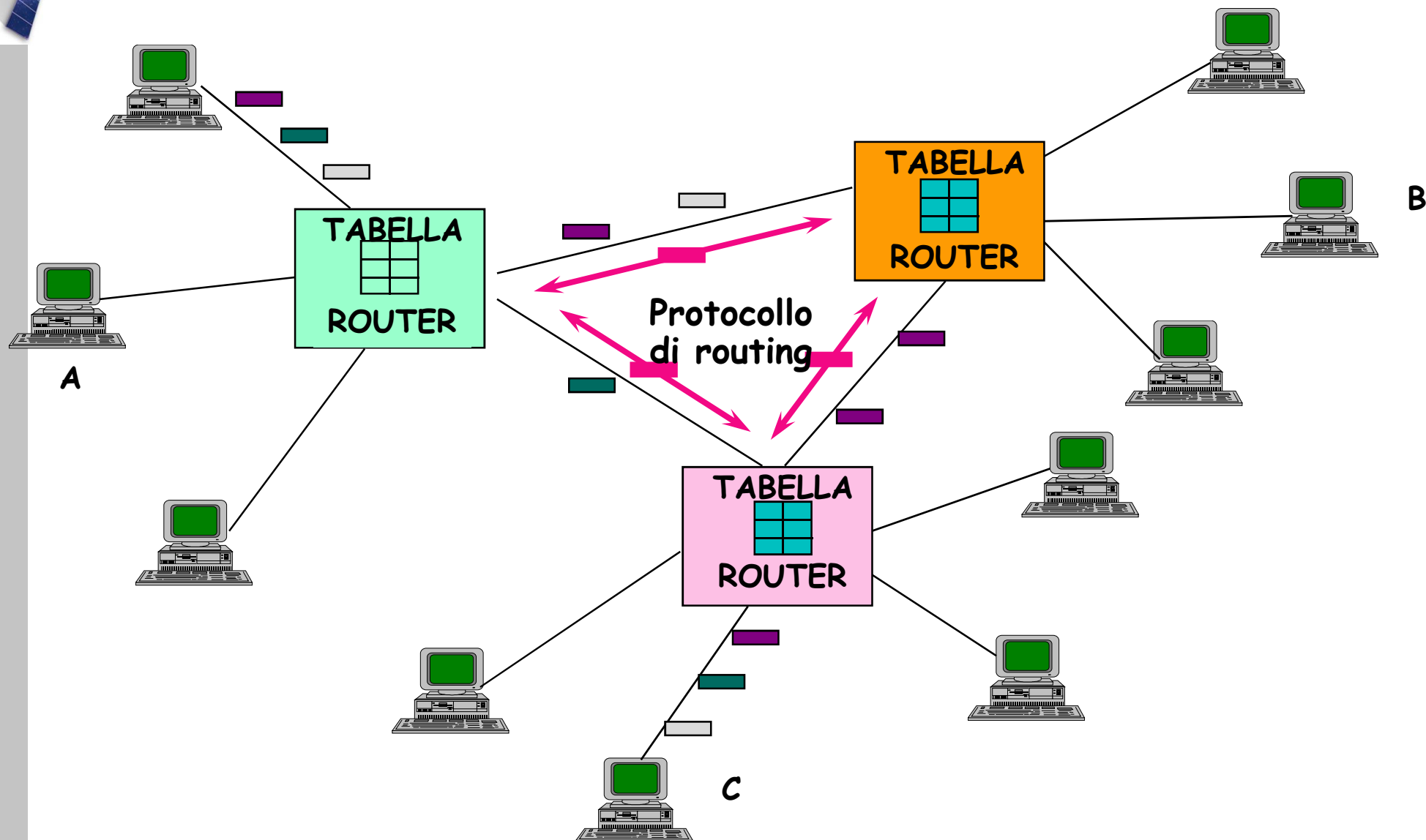
- All'accensione un host/router inizializza la sua tabella di routing usando le informazioni contenute in un dispositivo di memoria di massa o interrogando opportuni server
- In seguito ogni router aggiorna o incrementa le informazioni di instradamento in proprio possesso dialogando con gli altri router 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

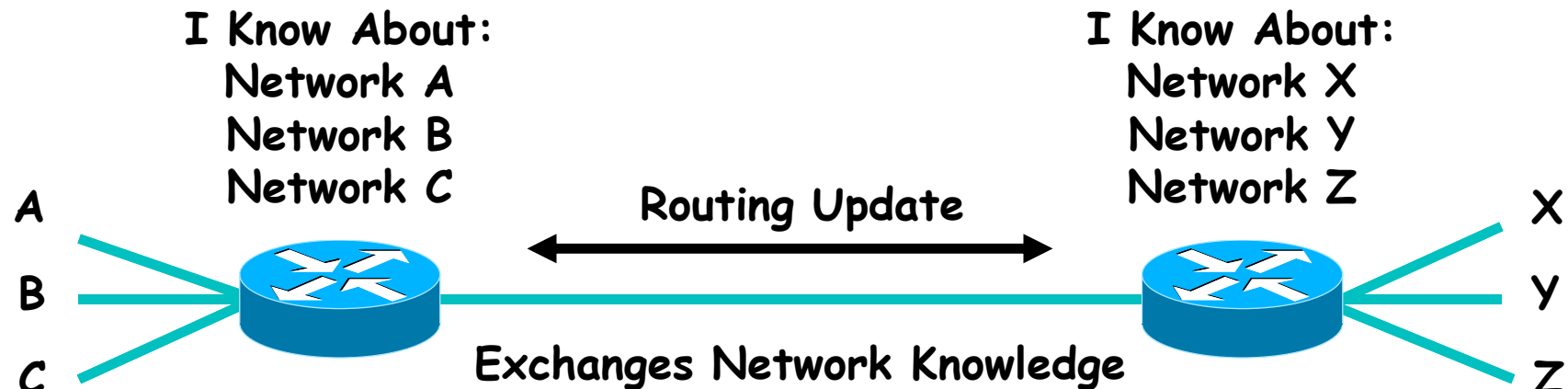
Instradamento Dinamico: esempio





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

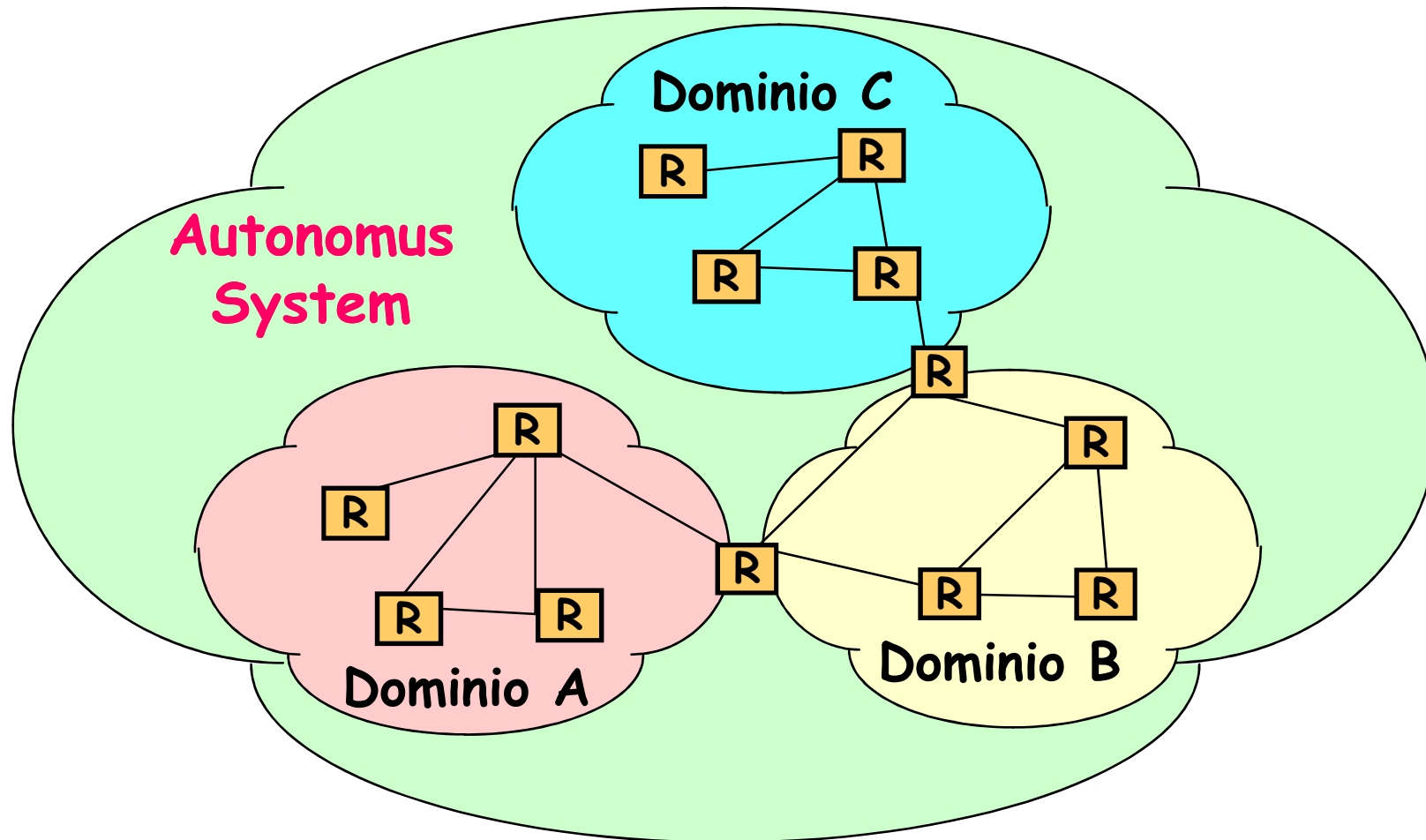
- Si definisce “sistema autonomo” (AS) una porzione di rete (insieme di host, router e sottoreti) amministrata da un unico gestore
- I nodi che instradano messaggi all'interno dell'AS sono detti interior router, mentre quelli che instradano messaggi tra AS diversi sono detti exterior router
- L'AS è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

Sistemi autonomi



- 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)



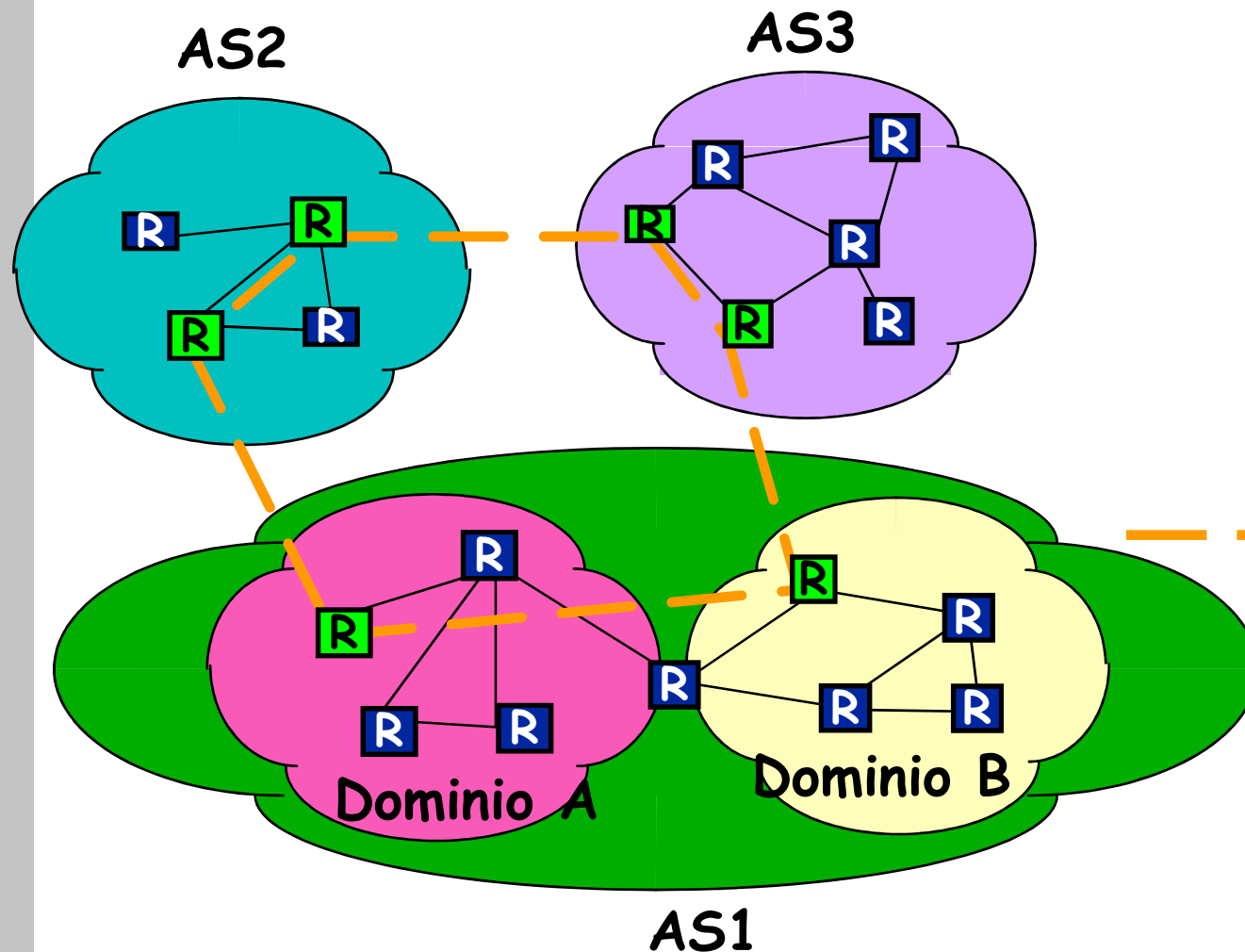
Sistemi autonomi

- In Internet esistono alcuni router, detti core router, che contengono informazioni di instradamento sufficienti per inviare un datagramma verso qualsiasi destinazione
- Ogni AS deve comunicare ai core router quali reti logiche fanno parte del sistema stesso
- Così, quando a un core router si chiede un'informazione di instradamento relativa ad una data rete logica X, esso è a conoscenza che la rete fa parte del sistema autonomo Y
- Un datagramma che ha come destinazione la rete logica X potrà quindi essere inviato a un border router di Y, poi saranno i protocolli di routing interni all'AS a determinare la strada per arrivare alla rete di destinazione

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



Protocolli IGP:

➤ Distance Vector

- ★ RIP
- ★ RIPv2
- ★ IGRP
- ★ E-IGRP

➤ Link state

- ★ OSPF

Protocolli EGP

➤ BGP



Teoria dei Grafi



Teoria dei Grafi

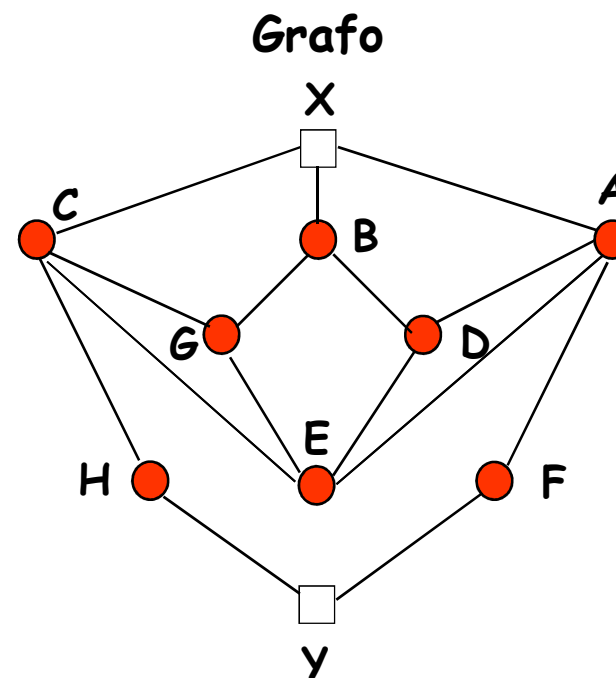
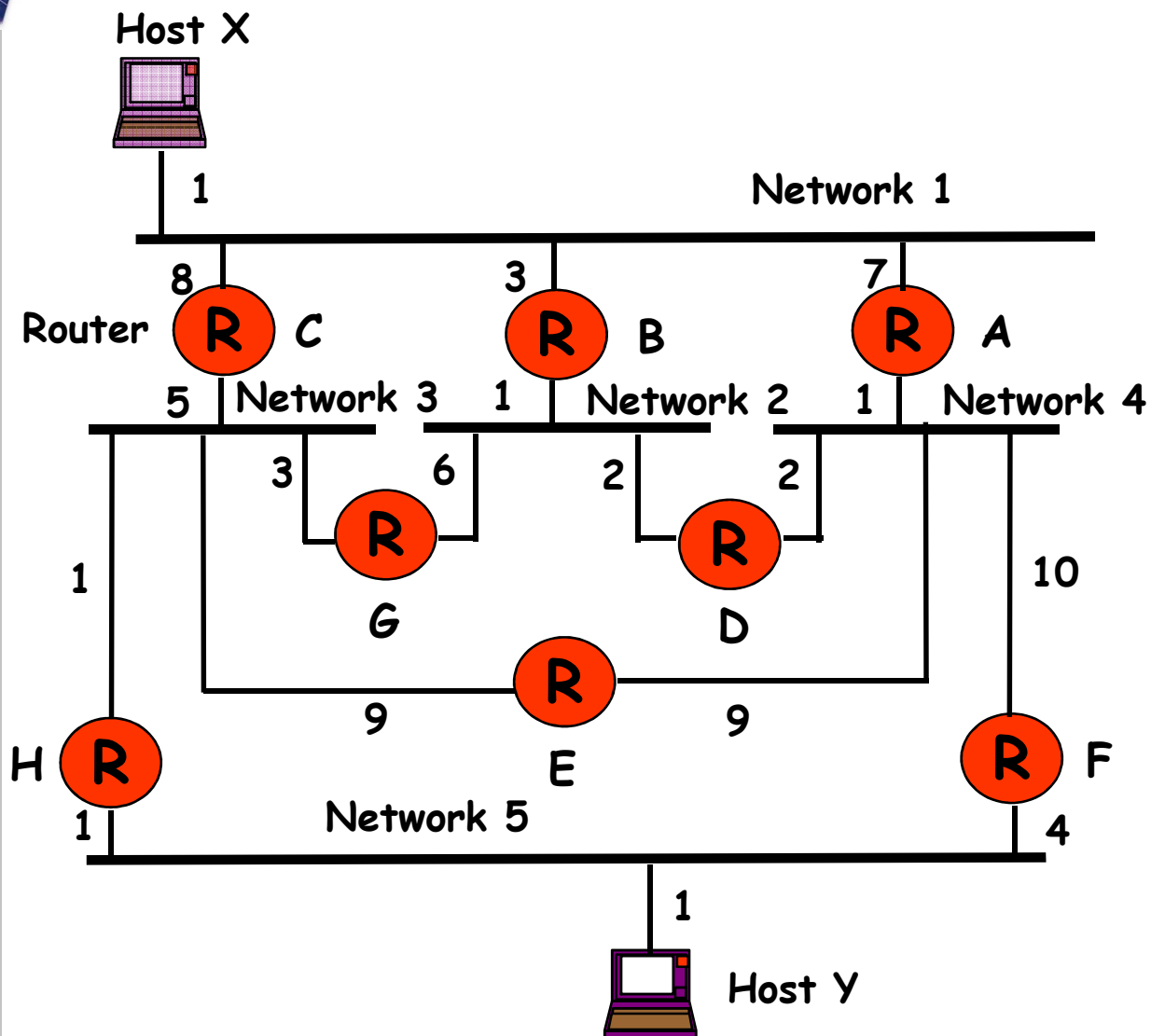
- Un grafo $G(V,E)$ è dato da
 - ✕ un insieme V di nodi o vertici
 - ✕ un insieme E di rami (edge) o archi, ogni ramo connette una coppia di nodi
- La cardinalità $|V|$ dell'insieme dei nodi è detta ordine del grafo G
- La cardinalità $|E|$ dell'insieme dei rami è detta dimensione del grafo G
- Una qualsiasi 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

- 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: esempio





Teoria dei Grafi

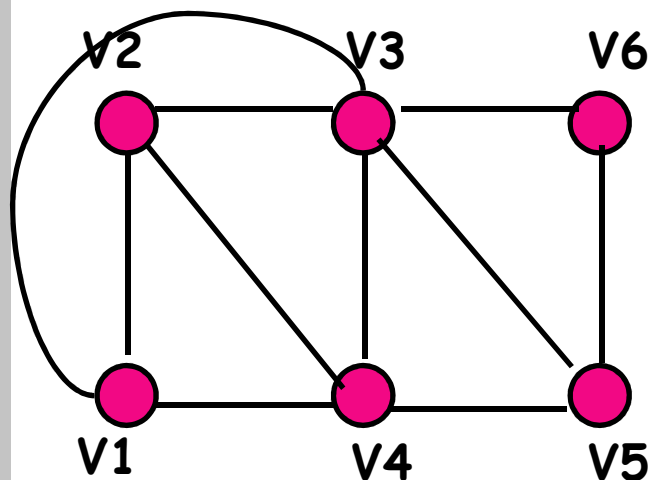
- Un Grafo può essere rappresentato dalla sua Matrice di Adiacenza A , di dimensioni $|V| \times |V|$, il cui generico elemento a_{ij} :

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

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

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

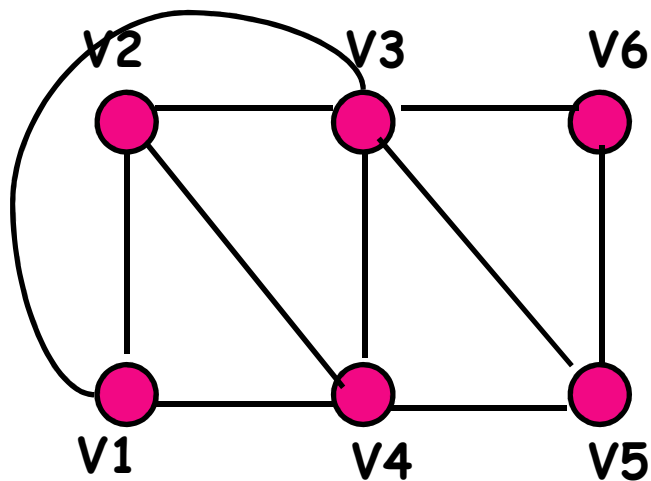
Matrice di adiacenza: esempio



	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



- 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

- 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

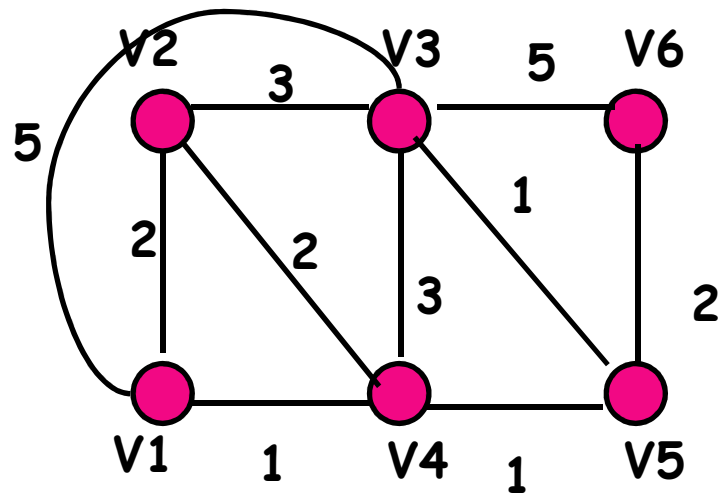


Teoria dei Grafi

- 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



- 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

- 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

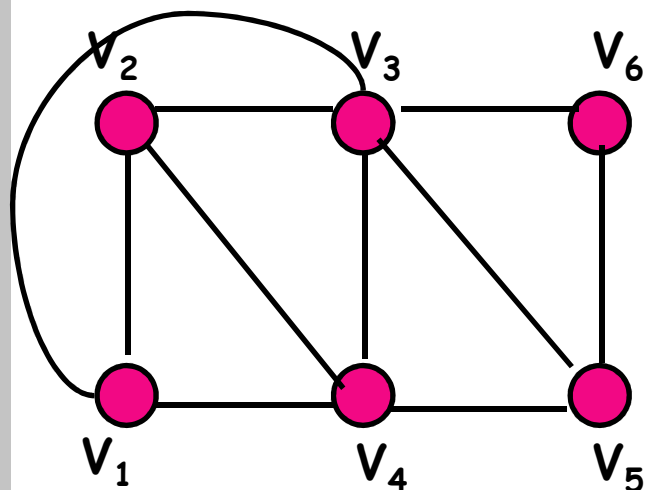


Teoria dei Grafi

- 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)

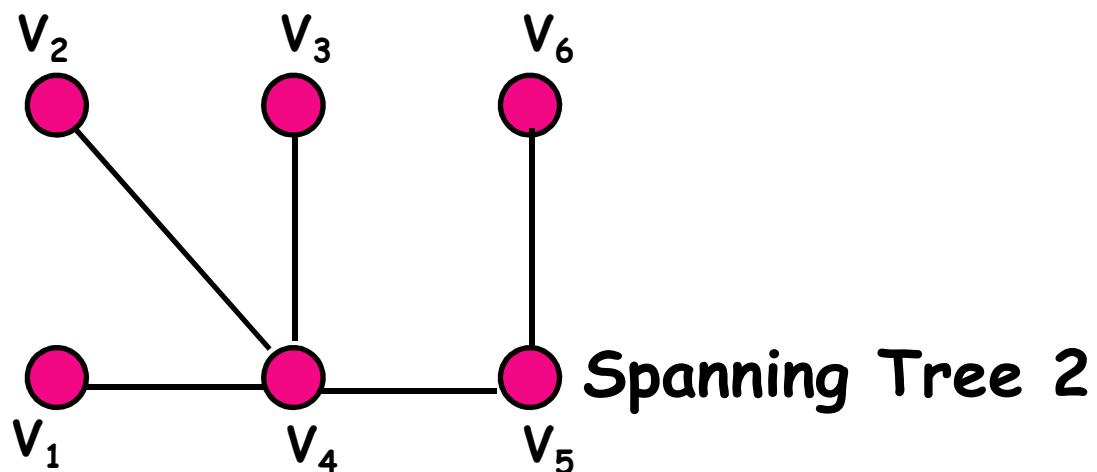
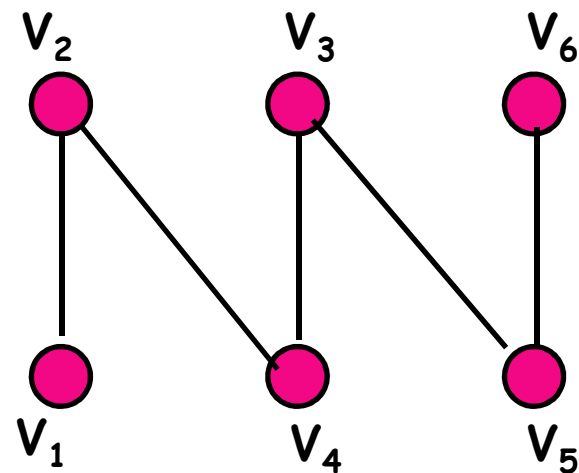


Grafo G



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