

Università di Roma Tor Vergata
Corso di Laurea triennale in Informatica
Sistemi operativi e reti
A.A. 2022-2023

Pietro Frasca

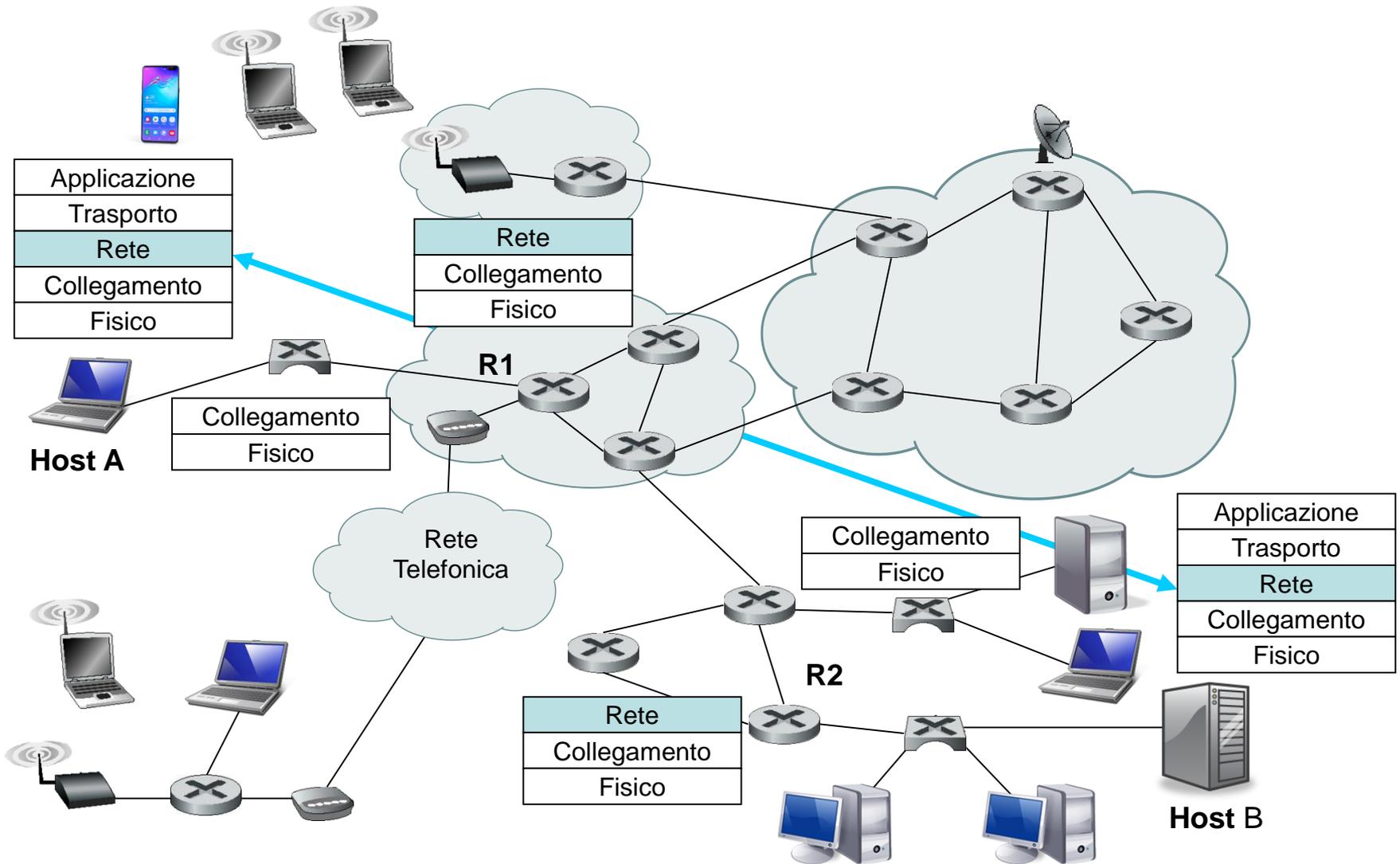
Parte II: Reti di calcolatori
Lezione 16 (40)

Giovedì 11-05-2023

Livello di rete

- Il compito dello strato di rete è trasportare datagram da un host mittente a un host destinatario. Per farlo, possono essere identificate tre principali funzioni dello strato di rete.
 - ***Determinazione del percorso (routing)***. Lo strato di rete deve determinare il percorso che seguiranno i pacchetti da un mittente a un destinatario. Gli algoritmi che determinano questi percorsi prendono il nome di **algoritmi di instradamento**.
 - ***Inoltro (forwarding)***. Quando un pacchetto arriva a una porta d'ingresso di un router, questo deve essere trasferito al giusto link in uscita.
 - ***Instaurazione della connessione***. alcune architetture dello strato di rete (per esempio, X.25) eseguono una procedura di **instaurazione della connessione** (call setup) prima che inizi il trasferimento di dati. Questa procedura è analoga a quella di handshake del TCP. **Lo strato di rete dell'architettura di Internet non effettua la procedura di instaurazione della connessione.**

- Consideriamo la figura seguente e consideriamo i compiti svolti dal livello di rete per la trasmissione di dati da **A** a **B**.
- Lo strato di rete nel host mittente **A** incapsula il segmento che riceve dallo strato di trasporto in un **datagram** (**3-PDU**) e lo passa allo strato di collegamento.
- Se l'host destinatario si trova in una rete diversa dalla rete cui è connesso il mittente, il datagram è inviato al suo router di default (nella figura R1).
- Nel host destinatario **B**, lo strato di rete riceve il pacchetto dal suo router di default (in questo caso, **R2**) e consegna il pacchetto allo strato di trasporto.
- Il lavoro principale svolto dai router è di instradare i pacchetti dal link d'ingresso a un link di uscita.



Reti datagram e a circuito virtuale

- In tutte le principali architetture di reti di calcolatori, come Internet, X.25, frame-relay, etc., il livello di rete offre un servizio da host a host o **senza connessione** o un servizio **con connessione**.
- Le reti dotate di servizio con connessione sono chiamate reti a **circuito virtuale (virtual circuit)** mentre quelle che offrono il servizio senza connessione sono dette **reti datagram**.
- Reti a circuito virtuale sono l'X.25, il frame relay.
- **Internet è una rete datagram.**

Reti a commutazione di pacchetto a circuito virtuale

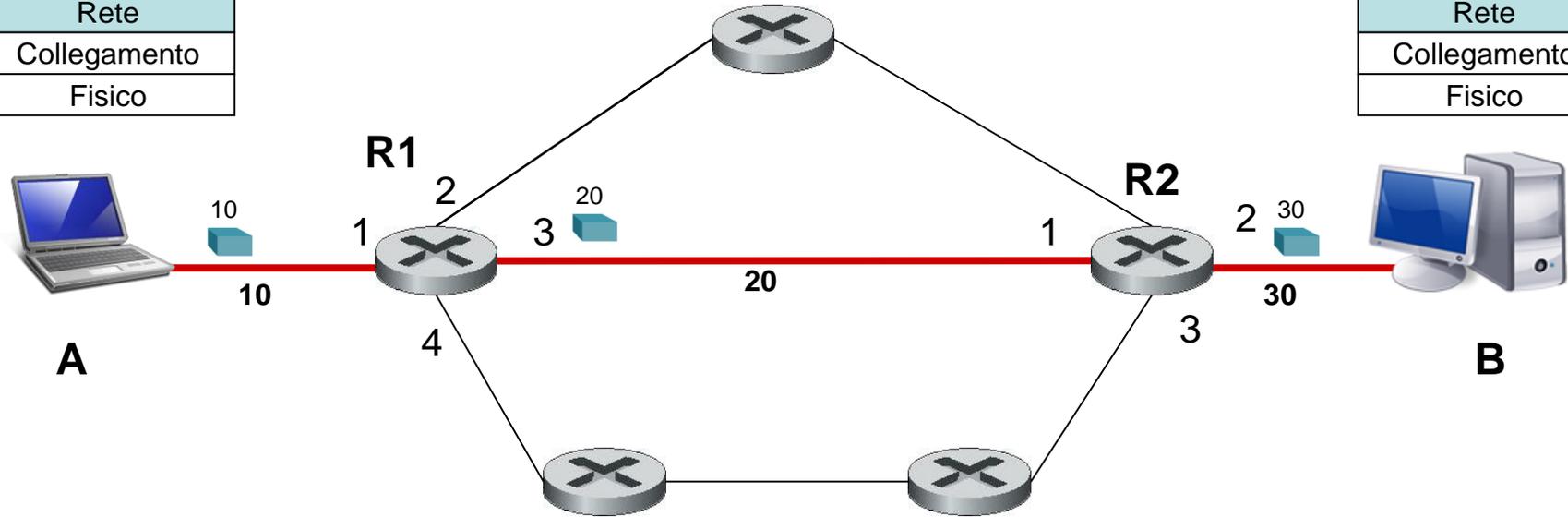
- una rete a commutazione di pacchetto a ***circuito virtuale (CV)*** funziona in modo analogo alla rete telefonica, che usa "circuiti reali" invece dei "circuiti virtuali". Un circuito virtuale può essere visto come una connessione virtuale tra un host mittente e un host destinatario.
- Un circuito virtuale (CV) è costituito da
 - **un percorso**, costituito da una serie di linee di comunicazione e router tra host sorgente e destinazione;
 - **numeri del circuito virtuale**, un numero di identificazione per ogni collegamento lungo il percorso;
 - **tabella di conversione** dei numeri di CV in ciascun router lungo il percorso.
- In un circuito virtuale la trasmissione dei pacchetti si realizza in tre fasi:
 - ***Instaurazione del CV***. Durante la fase di instaurazione, il mittente specifica l'indirizzo del destinatario e attende un tempo (di setup) necessario allo strato di rete per creare il CV. In questa fase vengono aggiornate le tabelle dei router sul percorso.

Durante l'instaurazione del CV, lo strato di rete può riservare risorse (per esempio, larghezza di banda) lungo il percorso del CV.

- **Trasferimento dei dati.** Una volta stabilito il CV, inizia il trasferimento dei dati.
- **Interruzione del CV.** Quando un lato della connessione vuole chiudere la comunicazione, lo strato di rete segnalerà all'altro lato l'interruzione del CV e aggiornerà le tabelle in ogni router eliminando in ciascuna tabella la riga relativa al CV da chiudere.

Applicazione
Trasporto
Rete
Collegamento
Fisico

Applicazione
Trasporto
Rete
Collegamento
Fisico



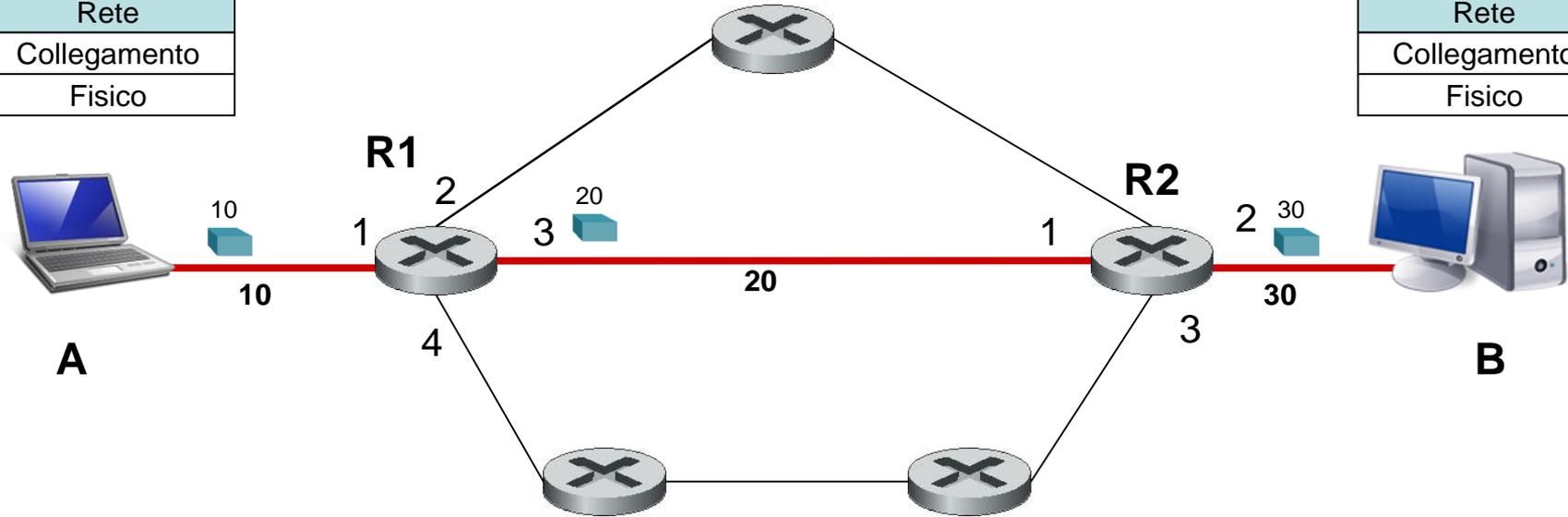
Interfaccia ingresso	Numero CV ingresso	Interfaccia uscita	Numero CV uscita
1	10	3	20
2	22	4	55
3	44	1	33

Rete a circuito virtuale.

- Per illustrare il funzionamento consideriamo la rete in figura. Supponiamo che l'host **A** voglia comunicare con l'host **B**.
- Durante la **fase di setup**, lo strato di rete crea un **CV** tra A e B. Supponiamo che la rete attivi il percorso **A-R1-R2-B** e assegni i numeri di **CV 10, 20, 30** ai tre link sul percorso. Quindi, quando un pacchetto parte da A, il valore del campo *numero di CV* è 10; quando parte da R1 il valore è 20, e quando parte da R2 il valore è 30.
- Un router, in una rete a circuito virtuale mantiene informazioni di stato per le connessioni in corso.
- Ciascun router possiede una tabella di conversione dei numeri di CV. Per esempio, la tabella di conversione dei numeri di CV in R1 potrebbe essere come quella della figura seguente.
- Quando viene stabilito un nuovo CV attraverso un router, viene aggiunta una riga alla tabella dei numeri di CV. Quando si elimina un CV, le righe corrispondenti in ciascuna tabella lungo il suo percorso vengono rimosse.

Applicazione
Trasporto
Rete
Collegamento
Fisico

Applicazione
Trasporto
Rete
Collegamento
Fisico



Interfaccia ingresso	Numero CV ingresso	Interfaccia uscita	Numero CV uscita
1	10	3	20
2	22	4	55
3	44	1	33

Rete a circuito virtuale.

Reti datagram

- Le reti a commutazione di pacchetto di tipo datagram sono analoghe al servizio postale.
- In una rete datagram, ogni pacchetto spedito contiene nella sua **intestazione** un campo che specifica **l'indirizzo del destinatario** e un campo che indica l'indirizzo del mittente.
- L'indirizzo ha una struttura gerarchica: una parte specifica la rete cui l'host destinatario appartiene e una seconda parte specifica l'host stesso. I router hanno una **tabella di instradamento** che mette in corrispondenza la parte dell'indirizzo relativo alla rete con un link in uscita.
- Nelle **reti datagram**, i router non mantengono alcuna informazione di stato relativa alla connessione ma instradano il pacchetto verso la destinazione **in base al suo indirizzo di destinazione**.
- Dato che le tabelle di instradamento possono essere modificate nel tempo, i pacchetti inviati da un host a un altro **possono seguire percorsi differenti** attraverso la rete e arrivare fuori ordine.

Rete datagram

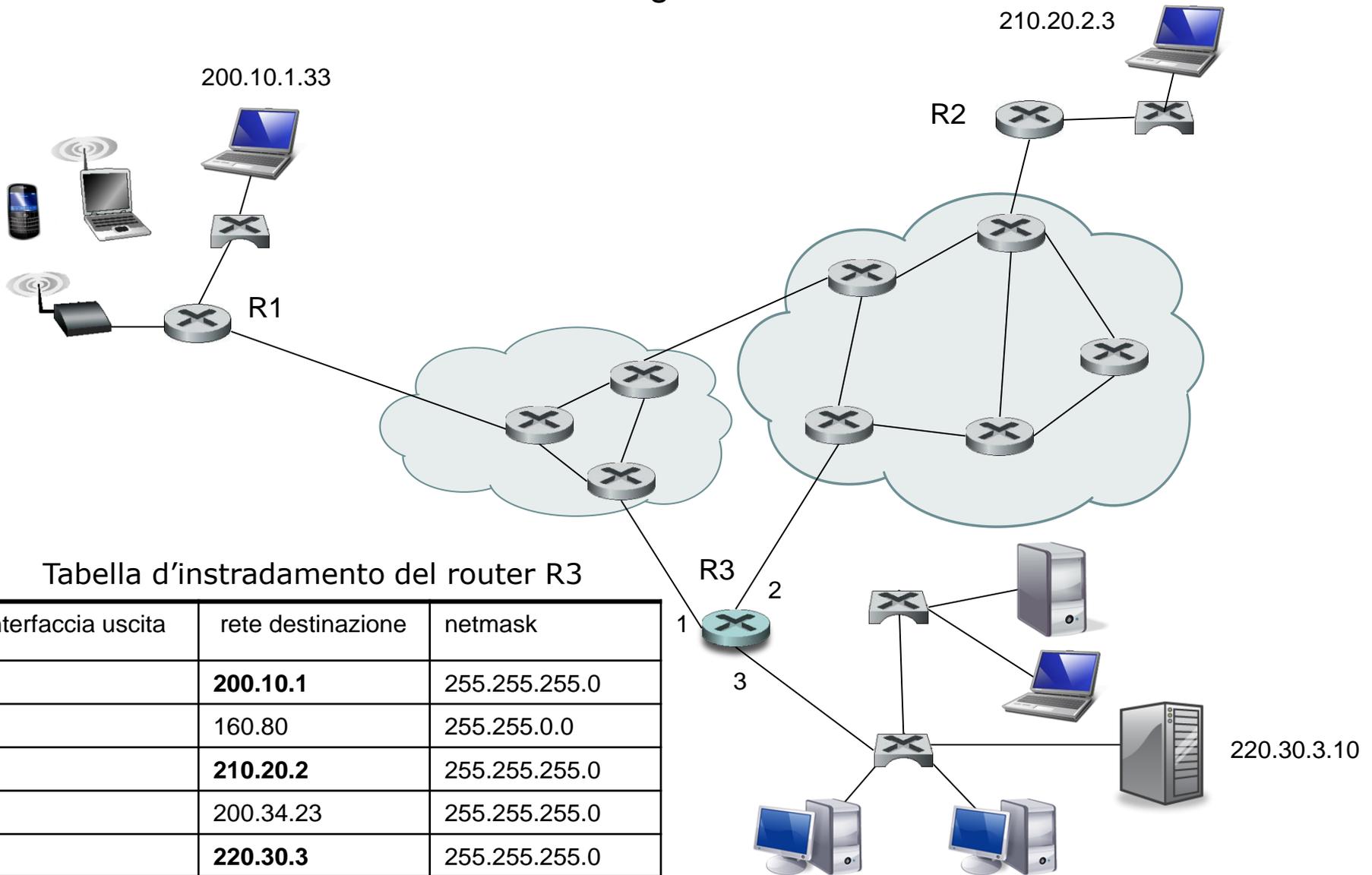


Tabella d'instradamento del router R3

Interfaccia uscita	rete destinazione	netmask
1	200.10.1	255.255.255.0
2	160.80	255.255.0.0
2	210.20.2	255.255.255.0
1	200.34.23	255.255.255.0
3	220.30.3	255.255.255.0

Protocollo Internet (IP)

- Come mostrato nella figura seguente, lo strato di rete di Internet ha tre componenti principali.
- Il primo componente è il **protocollo IP (Internet Protocol)**, che definisce il formato degli indirizzi dello strato di rete, i campi nel datagram e le operazioni che i router e gli host devono eseguire in base ai valori dei campi del datagram.
- Attualmente si usano due versioni del protocollo IP. La versione più usata è l'**IPv4**; la versione **IPv6**, dovrebbe sostituire, gradualmente, la versione 4 nei prossimi anni.
- Il secondo componente è costituito dai **protocolli di instradamento** che determina il percorso che un datagram segue dalla sorgente alla destinazione.
- Il terzo componente è il protocollo **ICMP (Internet Control Message Protocol)** per la notifica degli errori e delle informazioni, relativi allo strato di rete.

Strato di trasporto: TCP, UDP

Protocollo IP

- formato indirizzo
- formato datagram
- Azioni sui datagram

Protocollo ICMP

- Notifica degli errori
- Segnalazioni dei router

Protocolli di instradamento

- RIP
- OSPF
- BGP
- Altri protocolli proprietari

Tabella d'instradamento



Strato di collegamento

Strato fisico

Strato di rete di Internet.

Formato del datagram IPv4

- Il formato del datagram di **IPv4** è mostrato nella figura. I campi sono i seguenti:

0	4	8	16	31
versione	Lung intestaz	Tipo servizio	Lunghezza datagram	
Identificatore frammento			flag	Offset frammento (13 bit)
Tempo di vita (TTL)	Protocollo		Checksum dell'intestazione	
Indirizzo IP sorgente				
Indirizzo IP destinazione				
opzioni				
Dati				

- **Versione.** (quattro bit) Specifica la versione del protocollo IP. Attualmente, oltre alla versione IPv4 è utilizzata la nuova versione **IPv6**.
- **Lunghezza dell'intestazione.** (*quattro bit*) Poiché è presente un campo opzioni che può contenere un numero variabile di valori questo campo determina l'inizio del campo dati. Generalmente le opzioni sono usate raramente e quindi il **datagram tipico ha un'intestazione di 20 byte**.
- **Tipo di servizio (TOS, Type Of Service).** Questo campo permette di distinguere i diversi "tipi" di datagram IP (per esempio ai datagram che richiedono basso ritardo, alto throughput). Potrebbe anche essere utilizzato per distinguere i datagram in tempo reale (per esempio, usati da un'applicazione di telefonia su IP). *Ad esempio*, la Cisco usa i primi tre bit TOS per definire diversi livelli dei servizi che possono essere forniti dai router. Lo specifico livello di servizio fornito è un elemento di policy (politica) ed è stabilito dall'amministratore di rete.

- **Lunghezza del datagram.** (16 bit) Indica la lunghezza totale del datagram IP (intestazione più dati) misurata in byte. La lunghezza massima di un datagram IP è quindi 2^{16} (65536) byte anche se raramente supera i 1500 byte e spesso ha una lunghezza di 576 byte.
- **Identificatore , flag e offset di frammento.** Questi tre campi riguardano la frammentazione IP. La nuova versione IPv6, non permette la frammentazione ai router. Il campo **flag** è di 3 bit:
 - **Riservato** - sempre settato a 0.
 - **DF** (*Don't Fragment*) - se settato a 1 indica ai router che il datagramma non deve essere frammentato. Se tale datagramma non può essere inoltrato senza essere frammentato, viene scartato. Questo può risultare utile per misurare l'MTU del percorso.
 - **MF** (*More Fragments*) - se settato a 0 indica che il datagramma è l'ultimo frammento o il solo frammento del datagramma originario, pertanto tutti gli altri suoi frammenti hanno il bit MF settato a 1. Naturalmente, questo bit sarà sempre 0 anche in tutti i datagrammi che non sono stati frammentati.

- **Offset frammento** (13 bit) - Indica l'offset (espresso in blocchi di 8 byte) di un frammento relativamente all'inizio del datagramma IP originale: il primo frammento ha offset 0. L'offset massimo risulta pertanto pari a 65528 byte che, includendo l'intestazione, potrebbe eccedere la dimensione massima di 65535 byte di un datagramma IP.
- **Tempo di vita. (TTL, Time-To-Live)**. Serve per evitare che i datagrammi siano rinviati troppe volte dai router, viaggiando pertanto per un tempo troppo lungo. Questo problema può verificarsi, per esempio, a causa di un percorso ciclico di lunga durata nella rete. È un campo di tipo *contatore* che viene decrementato di 1 ogni volta che un datagramma è elaborato da un router. Quando il campo TTL assume il valore 0, il router scarta il datagramma.
- **Protocollo**. Questo campo è usato quando un datagramma IP arriva a destinazione. Il valore di questo campo specifica il **protocollo dello strato di trasporto** a cui il **campo dati** dovrà essere consegnato. Per esempio, il **valore 6** indica che il campo dati deve essere passato al **TCP** mentre il **valore 17** indica che i dati devono essere passati all'**UDP**.

Questo campo ha un ruolo analogo al campo **numero di porta** nell'intestazione del segmento dello strato di trasporto (UDP e TCP). Il numero di protocollo lega tra loro gli strati di rete e di trasporto, mentre il numero di porta unisce gli strati di trasporto e di applicazione.

- **Checksum dell'intestazione.** La checksum consente ai router di rilevare gli errori nei bit in un datagram IP ricevuto. Questa somma, **detta checksum di Internet**, è posta nel campo checksum. Un router calcola la checksum per ogni datagram ricevuto e rileva una condizione d'errore se la checksum memorizzata nel datagram è diversa da quella calcolata. I router, di solito, scartano i datagram errati. **La checksum deve essere calcolata e riscritta in ogni router**, in quanto il **campo TTL** e i possibili campi opzione possono cambiare.
- Si noti che sia i protocolli TCP e UDP nello strato di trasporto, sia IP nello strato di rete, eseguono un controllo degli errori. Il motivo principale che giustifica questa ripetizione è dovuto al fatto che, TCP e UDP non

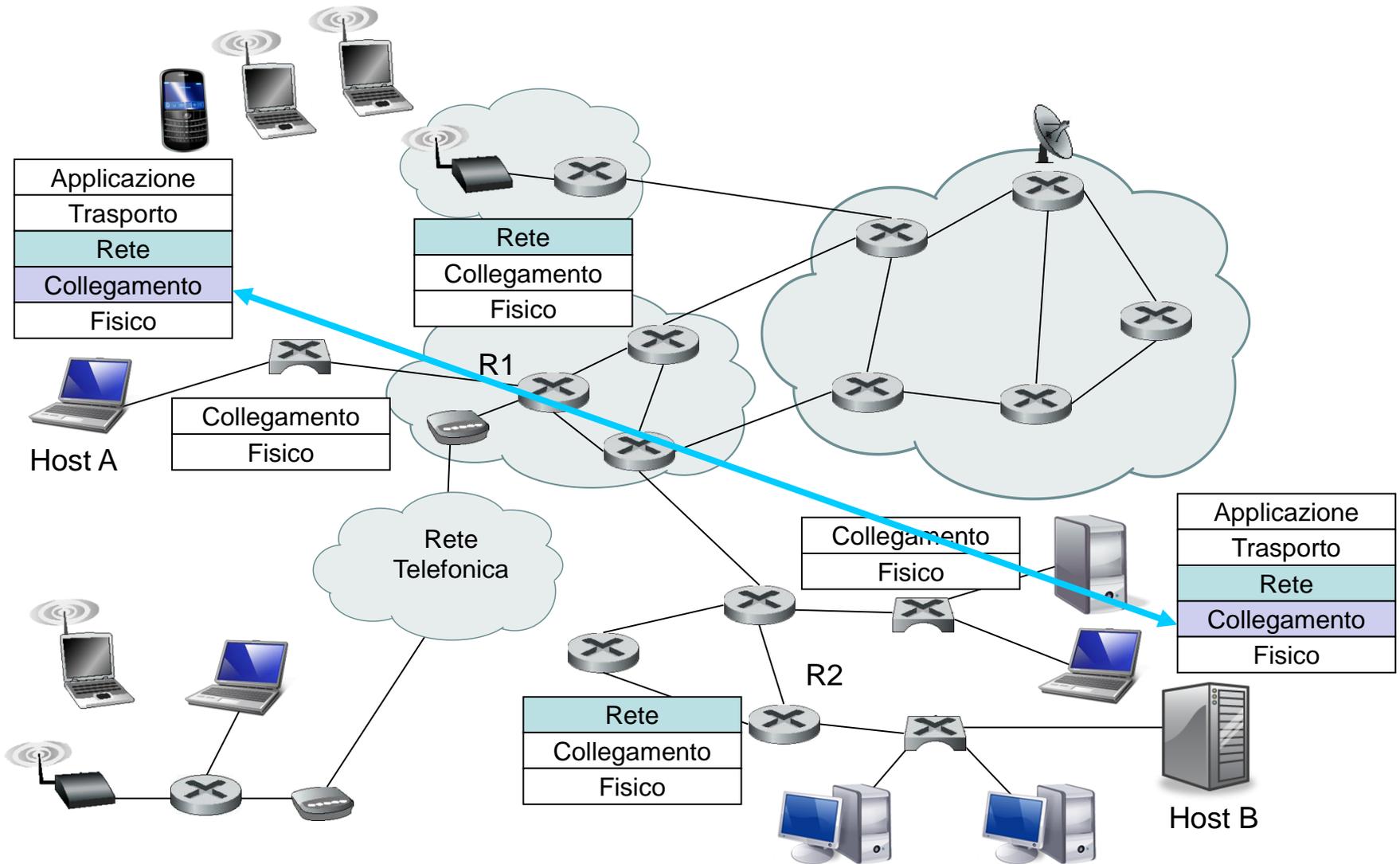
appartengono allo stesso livello protocollare di IP. Il TCP può funzionare su un protocollo diverso, per esempio su ATM e l'IP può trasportare dati che potrebbero essere passati a protocolli diversi da TCP e UDP.

- **Indirizzi IP di sorgente e di destinazione.** Questi campi contengono gli indirizzi IP del mittente e del destinatario.
- **Opzioni.** Il campo opzioni permette a un'intestazione IP di essere estesa. **Le opzioni dell'intestazione sono raramente usate.** La presenza di opzioni rende l'elaborazione del datagram complicata. Inoltre, poiché alcuni datagram possono richiedere l'elaborazione di opzioni e altri no, l'intervallo di tempo richiesto per elaborare un datagram IP in un router può variare in modo consistente. Queste considerazioni diventano importanti specie per l'elaborazione IP in router e host ad alte prestazioni. **Le opzioni IP sono state eliminate dall'intestazione di IPv6.**

- **Dati** (*carico utile, payload*). Generalmente, il campo dati di un datagram IP contiene i segmenti dello strato di trasporto (TCP o UDP) da inviare alla destinazione. Comunque, il campo dati può contenere altri tipi di dati, come i **messaggi ICMP**.
- Se non ci sono opzioni, l'intestazione di un datagram IP è di 20 byte. Se il datagram trasporta un segmento TCP, allora un datagram (non frammentato) trasporta un totale di 40 byte di intestazione (20 byte di intestazione IP e 20 di intestazione TCP) insieme al messaggio (o parte del messaggio) dello strato di applicazione. Se il datagram trasporta un segmento UDP allora l'intestazione totale è di 28 byte (20 byte di intestazione IP e 8 byte di intestazione UDP).

Frammentazione del datagram IP

- I protocolli dello strato di collegamento trasportano payload di diversa dimensione. Per esempio, i frame Ethernet possono contenere al massimo 1500 byte di dati, mentre frame di altri protocolli utilizzati nelle reti di area estesa (WAN) possono portare al massimo 576 byte.
- La massima quantità di dati che un frame dello strato di collegamento può trasportare è detta **MTU** (***Maximum Transfer Unit, Unità Massima Trasferita***).
- Poiché un datagram IP è incapsulato all'interno di un frame di un protocollo dello strato di collegamento, per il trasporto da un router al successivo, l'MTU del protocollo dello strato di collegamento limita la dimensione di un datagram IP.
- Un problema è che ciascuno dei link lungo il percorso tra mittente e destinatario può usare differenti protocolli dello strato di collegamento, e ciascuno di questi protocolli può avere un diverso MTU.

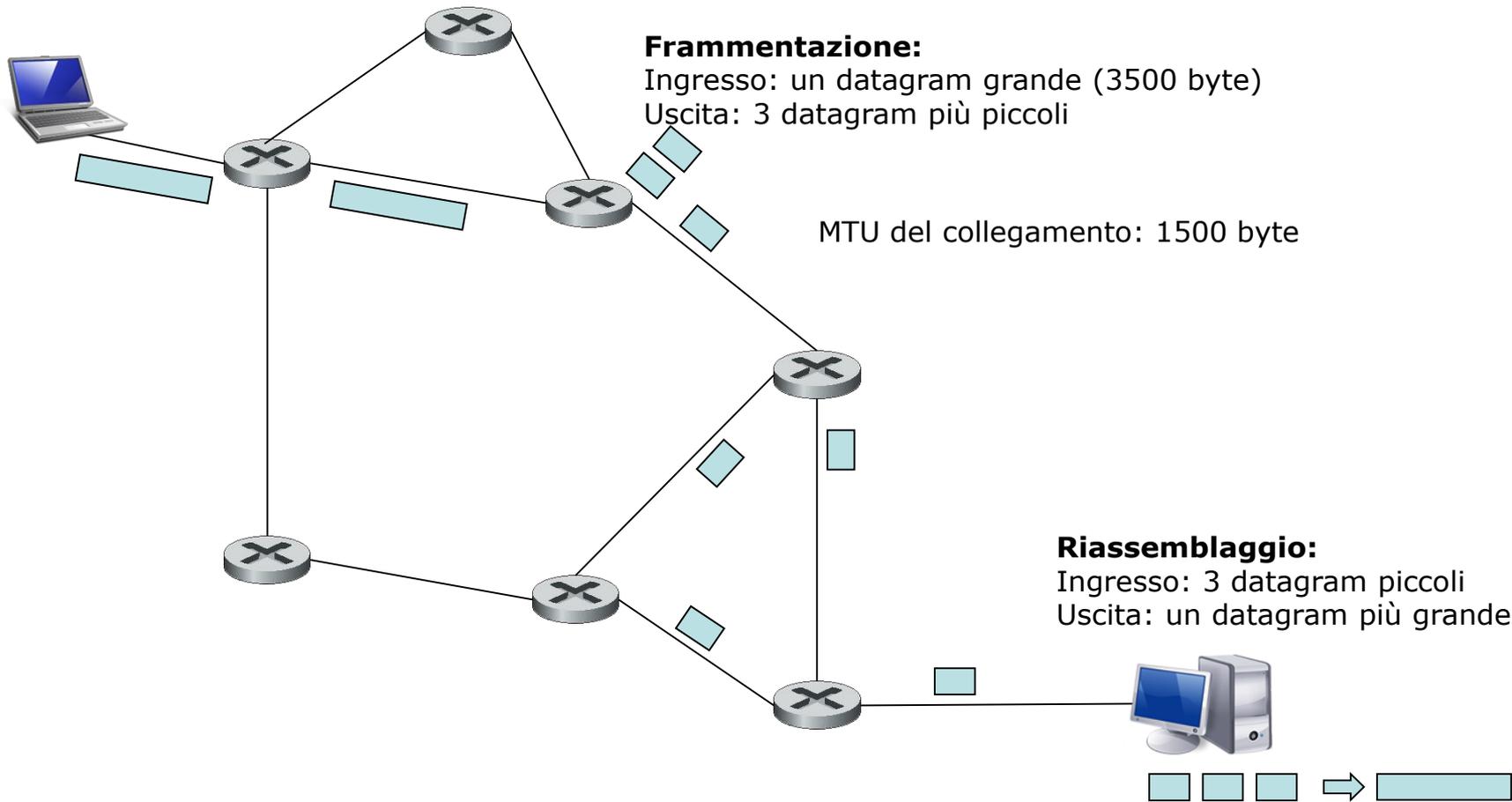


- La soluzione di questo problema si ha frammentando il datagram IP in più datagram IP di dimensioni minori, e quindi inoltrare questi datagram più piccoli sul link in uscita. Questi datagram più piccoli prendono il nome di **frammenti**.
- I frammenti dovranno poi essere rimessi insieme, nello giusto ordine, prima di essere consegnati allo strato di trasporto del host destinatario.
- Quando un host riceve una serie di datagram da uno stesso mittente, deve verificare se alcuni di questi datagram sono frammenti di qualche datagram originale. Se stabilisce che alcuni datagram sono frammenti, deve poter ricostruire la giusta sequenza con cui i frammenti devono essere ricomposti per formare il datagram originale. Per consentire all'host destinatario di eseguire la corretta ricostruzione, il datagram IP contiene i campi **Identificatore** , **flag** e **offset di frammento**

- Quando l'host mittente crea un datagram, lo identifica con un numero. L'host mittente incrementa il numero di identificazione di ogni datagram che invia. Quando un router frammenta un datagram, ogni frammento è etichettato con il numero di identificazione del datagram intero originale e con gli indirizzi IP dell'host mittente e dell'host destinatario.
- Quando il destinatario riceve una serie di datagram provenienti dallo stesso host, può esaminare i numeri di identificazione dei datagram per determinare quali sono i frammenti di uno stesso datagram più grande. L'ultimo frammento ha il bit indicatore (*flag bit*) posto a 0 mentre tutti gli altri frammenti hanno il flag bit posto a 1.
- Inoltre, per riassemblare i frammenti nel giusto ordine, l'host di destinazione utilizza il campo offset il quale consente anche di stabilire se un frammento si è perso.

- La figura mostra un esempio. Un datagram di 3500 byte arriva a un router, e deve essere inoltrato su un link con un MTU di 1500 byte. Questo implica che i 3480 byte di dati (20 byte sono di intestazione) del datagram originale siano allocati in tre frammenti.
- Supponiamo che il datagram originale abbia numero di identificazione 123. Le caratteristiche dei tre frammenti sono mostrate nella tabella seguente.

Frammento	Dati (Byte)	ID frammento	Offset	Flag
1	1480	123	0	MF=1
2	1480	123	1480	MF=1
3	520 (=3480 - 1480 - 1480)	123	2960	MF=0



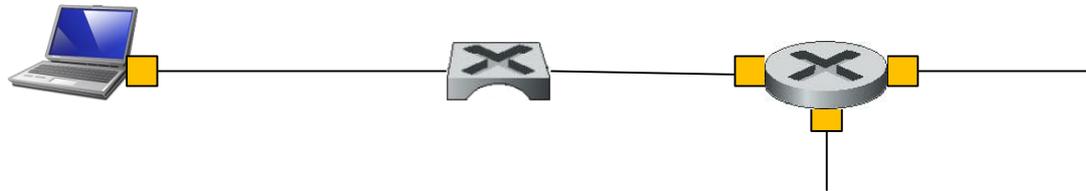
Frammentazione e riassemblaggio IP

- Il campo dati del datagram viene passato allo strato di trasporto della destinazione una volta che l'IP ha completamente ricostruito il datagram IP originale.
- Se uno o più dei frammenti non arrivano a destinazione, il datagram è scartato e non viene passato allo strato di trasporto. La frammentazione e la ricostruzione portano un ulteriore carico sui router (frammentazione di datagram) e sugli host destinatari (assemblaggio dei frammenti). Per queste ragioni è conveniente mantenere al minimo la frammentazione. Questo spesso si ottiene creando segmenti TCP e UDP di dimensioni sufficientemente piccole per evitare la frammentazione. In pratica, dato che tutti i protocolli dello strato di collegamento supportati da IP hanno un MTU di almeno 576 byte, la frammentazione può essere eliminata usando un MSS di 536 byte, 20 byte di intestazione del segmento TCP e 20 byte di intestazione del datagram IP.
- Il seguente esempio mostra l'uso di ping per determinare la dimensione del MTU di un percorso tra sorgente e destinazione.

- C:\Users\pietro>ping -f -l 1470 www.google.it
- Esecuzione di Ping www-cctld.l.google.com [173.194.35.151] con 1470 byte di dati:
- Risposta da 82.59.193.71: E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- Statistiche Ping per 173.194.35.151:
- Pacchetti: Trasmessi = 3, Ricevuti = 1,
- Persi = 2 (66% persi),
- Control-C
- ^C
- C:\Users\pietro>ping www.google.it -f -l 1465
- Esecuzione di Ping www-cctld.l.google.com [173.194.35.151] con 1465 byte di dati:
- E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- E' necessario frammentare il pacchetto ma DF è attivo.
- Statistiche Ping per 173.194.35.151:
- Pacchetti: Trasmessi = 3, Ricevuti = 0,
- Persi = 3 (100% persi),
- Control-C
- ^C
- C:\Users\pietro>ping www.google.it -f -l 1464
- Esecuzione di Ping www-cctld.l.google.com [173.194.35.151] con 1464 byte di dati:
- Risposta da 173.194.35.151: byte=1464 durata=88ms TTL=53
- Risposta da 173.194.35.151: byte=1464 durata=93ms TTL=53
- Risposta da 173.194.35.151: byte=1464 durata=100ms TTL=53
- Risposta da 173.194.35.151: byte=1464 durata=99ms TTL=53
- Statistiche Ping per 173.194.35.151:
- Pacchetti: Trasmessi = 4, Ricevuti = 4,
- Persi = 0 (0% persi),
- Tempo approssimativo percorsi andata/ritorno in millisecondi:
- Minimo = 88ms, Massimo = 100ms, Medio = 95ms

Indirizzamento IPv4

- Prima di parlare dell'indirizzamento IP, è necessario chiarire come host e router sono connessi in rete.
- Generalmente un host è collegato tramite un'interfaccia (scheda) di rete ad un dispositivo di interconnessione, come ad esempio uno switch, mediante un mezzo trasmissivo.

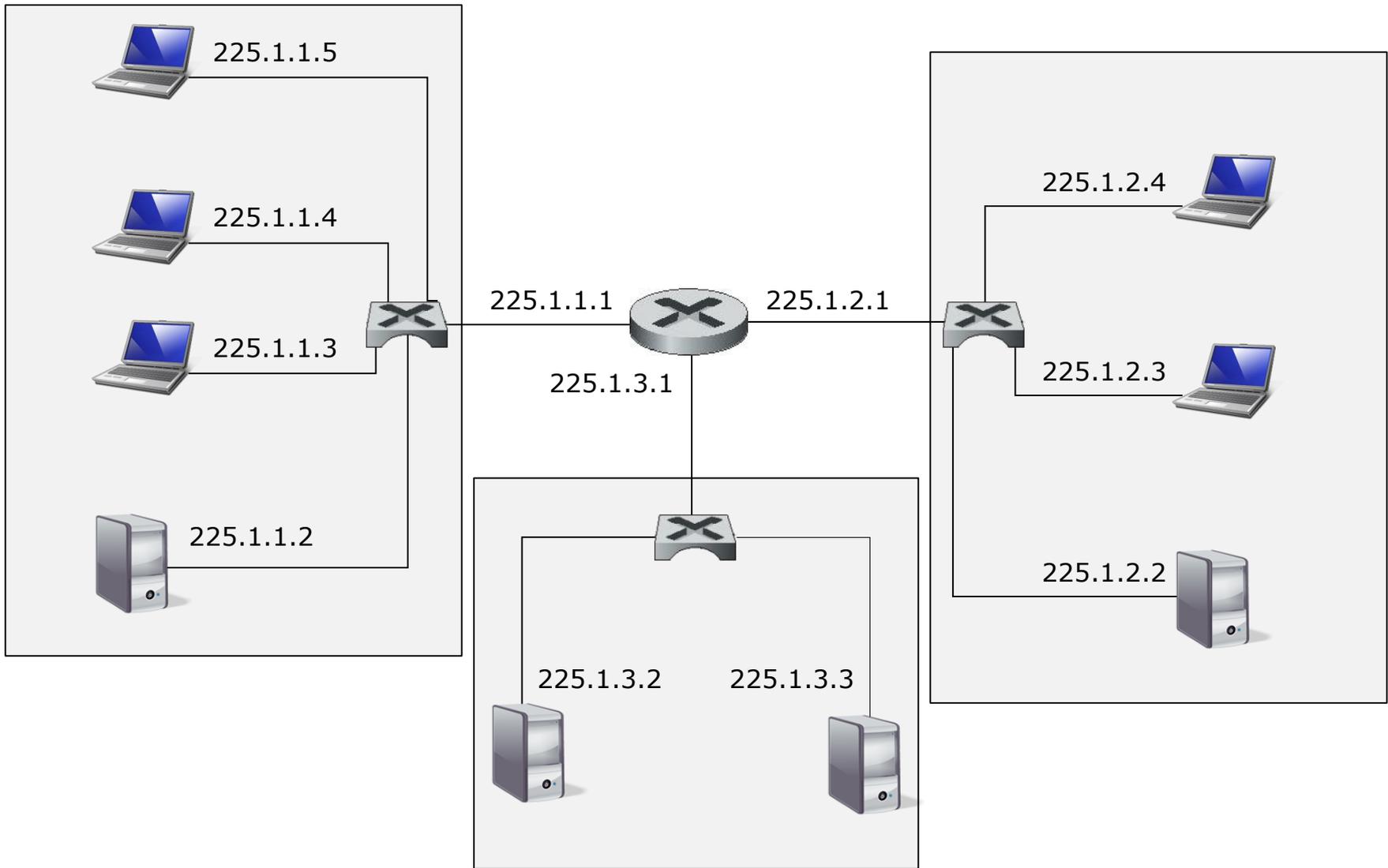


- Un router ovviamente, deve essere collegato a due o più link mediante le relative interfacce.
- Un **indirizzo IP è associato a un'interfaccia**, piuttosto che all'host o al router a cui appartiene l'interfaccia.
- Ogni interfaccia di rete deve avere un indirizzo che è globalmente unico.

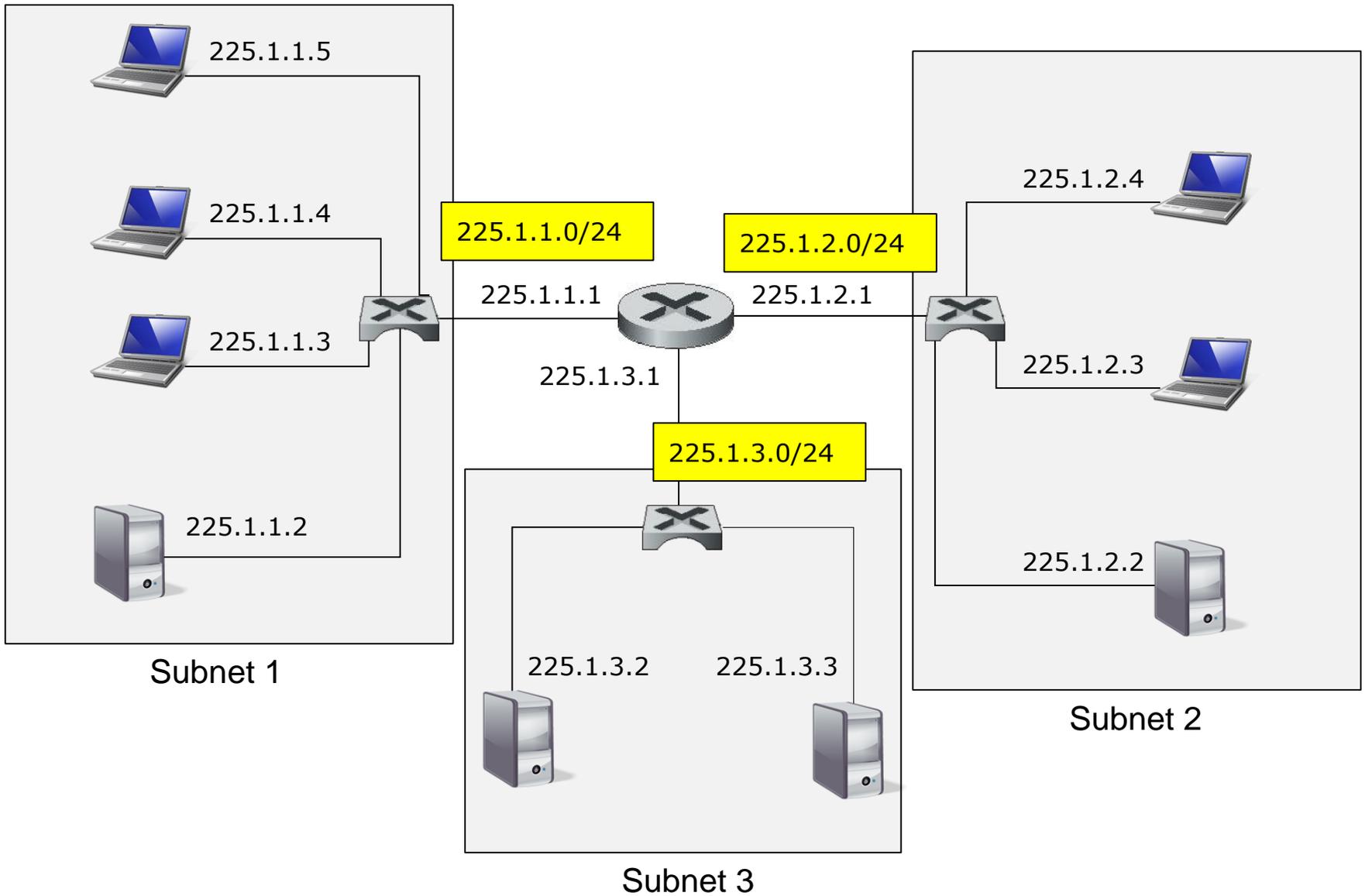
- Un **indirizzo IP** è di 32 bit (4 byte) e ci sono, quindi, in totale **2^{32} (4.294.967.296) possibili indirizzi IP**.
- Gli indirizzi IP sono espressi in notazione decimale puntata, nella quale ciascun byte dell'indirizzo è espresso in decimale ed è separato da un punto dagli altri byte dell'indirizzo. Per esempio, l'indirizzo IP **160.80.1.113, in forma decimale puntata**, corrisponde in notazione binaria a:

10100000 01010000 00000001 01110001

- Un indirizzo IP è suddiviso in due parti: una parte di esso è relativo alla "**rete**" cui l'interfaccia è collegata e una parte, "**host**", che specifica la singola interfaccia all'interno della particolare rete.
- La figura seguente mostra un esempio di indirizzamento IP e alcune interfacce.



Indirizzi delle interfacce.

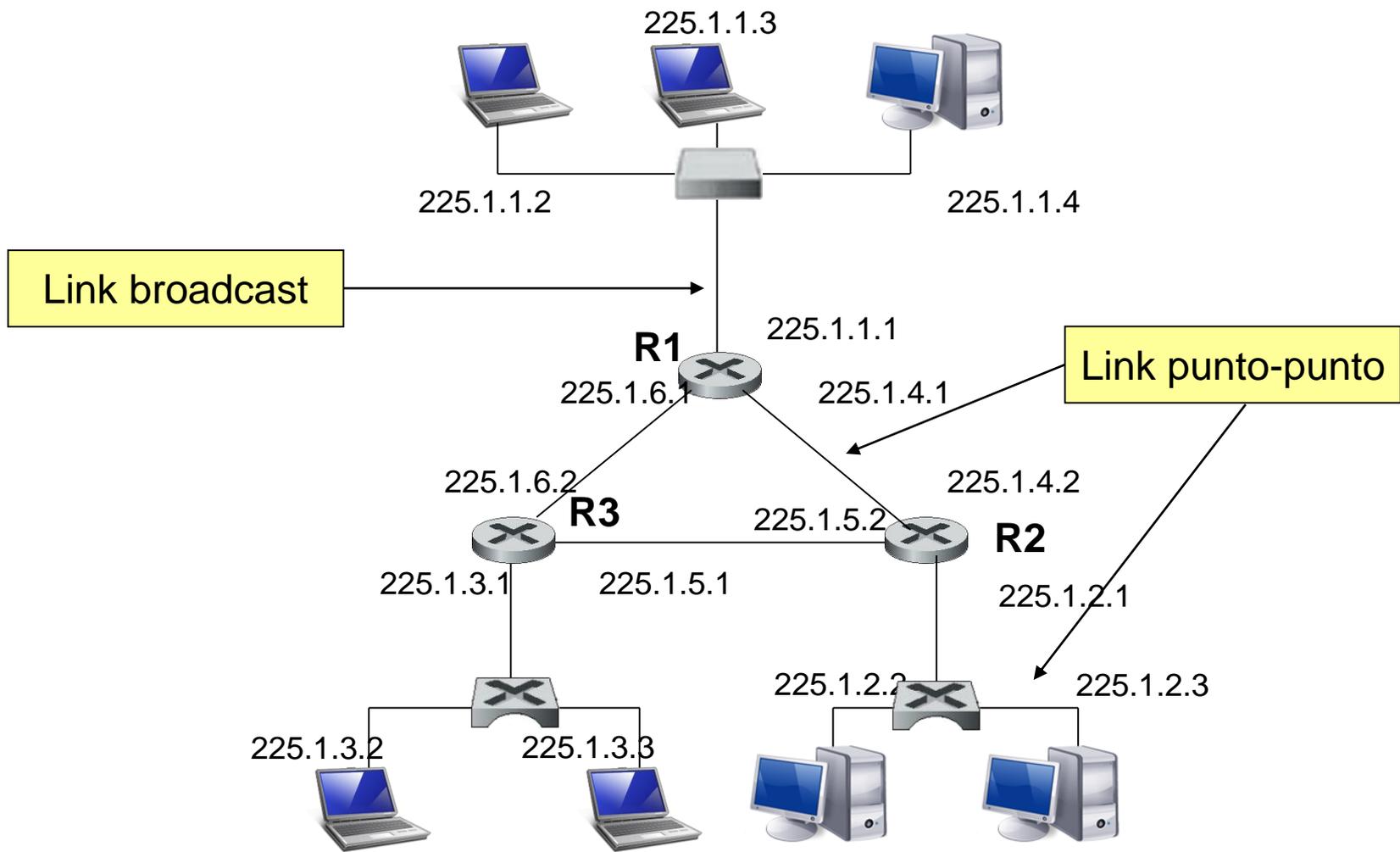


Indirizzi di subnet.

- Nella subnet 1, i quattro host e un'interfaccia del router, collegati tramite uno switch, hanno tutti un indirizzo IP nel formato **225.1.1.xxx**. Essi hanno in comune i 24 bit più significativi del loro indirizzo IP.
- Le interfacce di questi host e l'interfaccia sinistra del router formano una rete IP. I 24 bit dell'indirizzo che hanno in comune, detto **prefisso di rete**, formano la parte "**rete**" dell'indirizzo IP, mentre i restanti otto bit sono la parte "**host**" dell'indirizzo IP.
- La stessa rete è identificata da un indirizzo: **225.1.1.0/24**, dove la notazione **"/24"**, specifica la **net mask (maschera di rete)** che per questo esempio indica che i 24 bit più a sinistra dei 32 bit definiscono l'indirizzo della rete.
- Generalmente nell'IPv4 le netmask sono espresse in notazione decimale puntata. Pertanto **"/24"** significa che i primi 24 bit sono posti a 1 e i restanti 8 bit dell'indirizzo sono posti a 0 (11111111 11111111 11111111 00000000). Pertanto la corrispondente notazione decimale puntata di **"/24"** è **255.255.255.0**.

- Nell'esempio, alla rete 225.1.1.0/24, appartengono le quattro interfacce degli host (225.1.1.2, 225.1.1.3, 225.1.1.4 e 225.1.1.5) e un'interfaccia del router 225.1.1.1. Altri host che saranno collegati alla rete 225.1.1.0/24 dovranno avere tutti lo stesso prefisso di rete, cioè indirizzi nella forma 225.1.1.xxx. Il primo numero di un blocco di indirizzi è riservato per identificare la rete; l'ultimo numero del blocco è riservato a uno speciale numero detto numero di broadcast.
- La figura seguente mostra tre router che sono collegati tra loro con link **punto-punto**. Ogni router ha tre interfacce, una per ogni link punto-punto, e una per il link broadcast che collega direttamente il router a un gruppo di host.
- In questo esempio ci sono tre reti **225.1.1.0/24**, **225.1.2.0/24** e **225.1.3.0/24** del tipo visto nella figura precedente.

- Inoltre ci sono tre reti punto-punto: una rete, **225.1.4.0/24**, per le interfacce che collegano i router **R1** e **R2**; un'altra rete **225.1.5.0/24** per le interfacce che collegano i router **R2** e **R3**; e una terza rete **223.1.6.0/24**, per le interfacce che collegano i router **R3** e **R1**.
- La figura mostra 6 reti: 3 reti punto-punto e 3 reti broadcast (LAN).



3 router e 6 host. 6 reti: 3 reti punto-punto, 3 reti broadcast