



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**
hic sunt futura

TECNOLOGIE WEB E LABORATORIO (a.a. 2022-2023)

INTERNET - PARTE 3

Daniele Salvati

Dipartimento di Scienze Matematiche, Informatiche e Fisiche
Università degli Studi di Udine

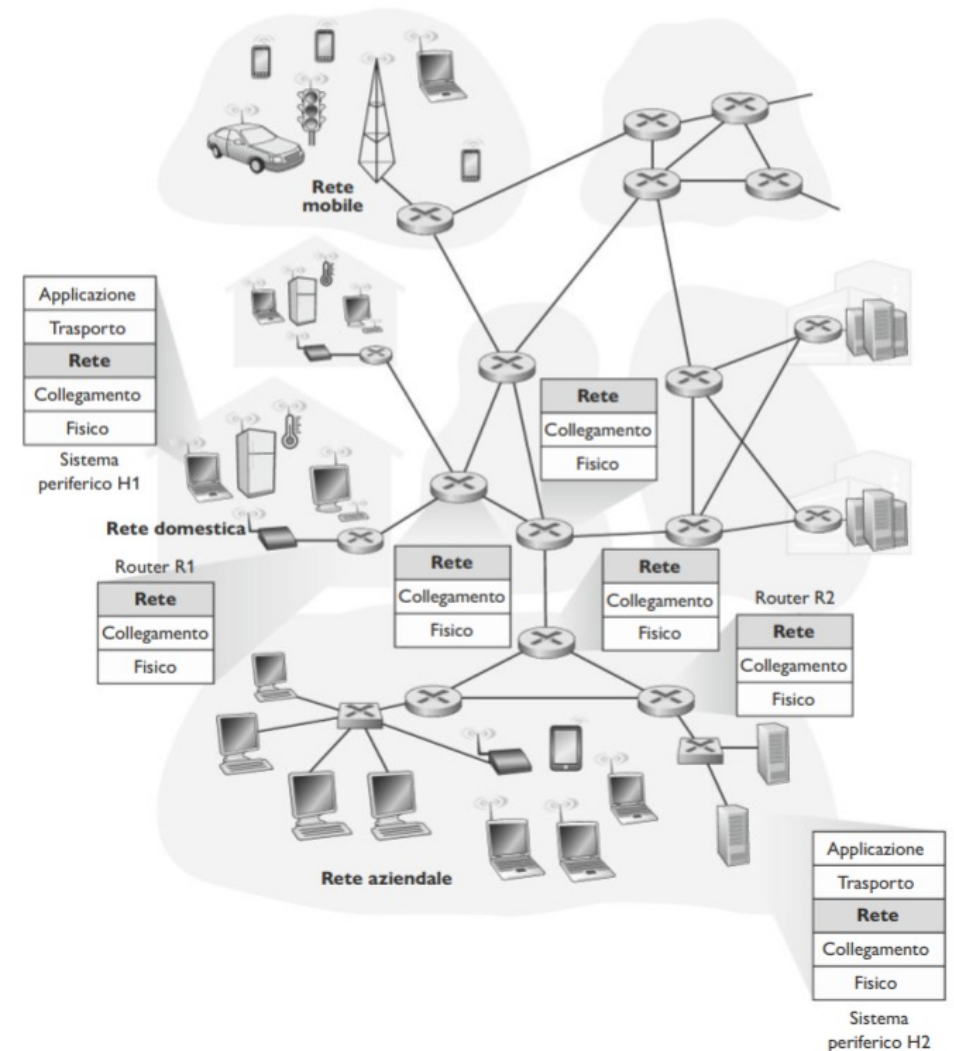
Informazioni slide

- Il materiale contenuto in queste slide è riservato esclusivamente agli studenti del corso di **Tecnologie Web e Laboratorio** del Corso di Studio in **Internet of Things, Big Data, Machine Learning** dell'Università degli Studi di Udine.
- Non è consentita la diffusione del materiale contenuto in queste slide, ma solo l'utilizzo inerente la preparazione dell'esame del suddetto corso.

Livello
di rete

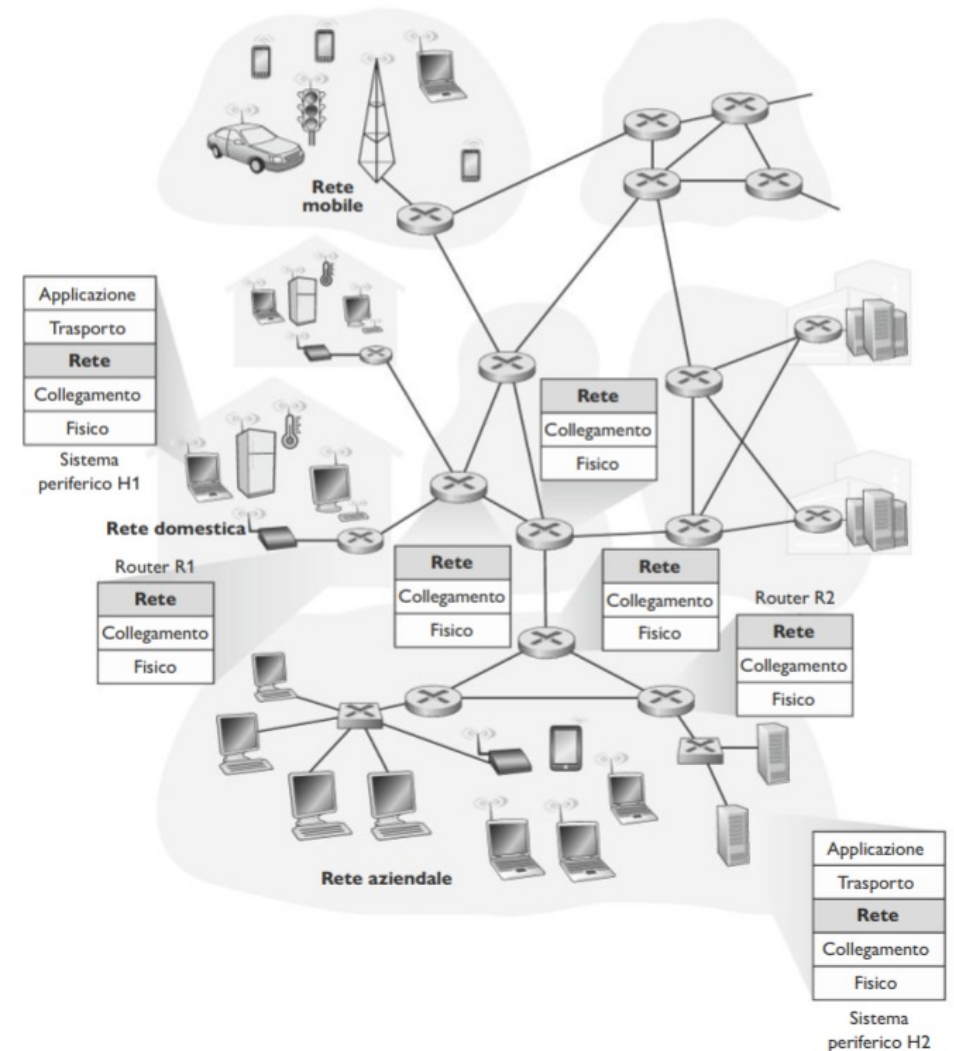
Livello di rete

- **Lato mittente**, il livello di rete in H1 prende i segmenti dal livello di trasporto, li incapsula in un datagramma, cioè un pacchetto a livello di rete, che trasmette al proprio router vicino, R1.
- **Lato destinazione**, il livello di rete in H2 riceve i datagrammi dal proprio router vicino R2, estrae i segmenti e li consegna al livello di trasporto.



Livello di rete (2)

- **Nel tragitto**, il ruolo primario del **piano dei dati** di ciascun router intermedio è quello di inoltrare il datagramma da link d'ingresso a link d'uscita, mentre quello del **piano di controllo** è coordinare queste azioni di inoltramento locali in modo che alla fine i datagrammi vengano instradati da estremo a estremo (*end-to-end*) su percorsi di router tra mittente e destinatario.

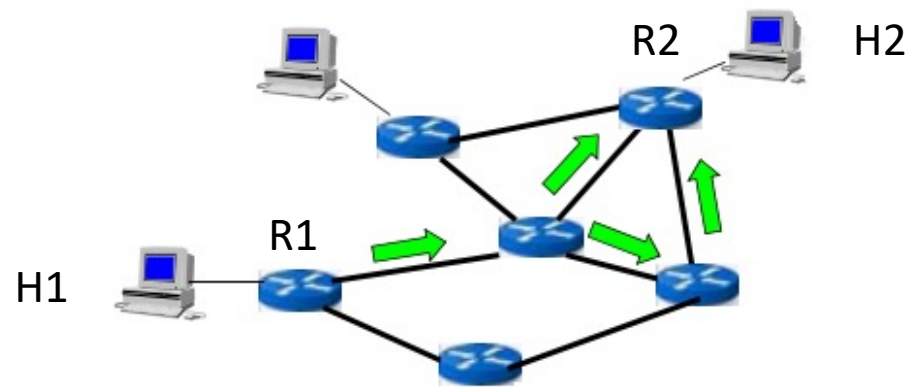


Inoltro

- **Inoltro** (*forwarding o switching*): quando un router riceve un pacchetto, lo deve trasferire sull'appropriato collegamento di uscita.
- L'inoltro è la più importante delle funzioni implementate nel piano dei dati dei router.
- Un pacchetto può anche essere bloccato (per esempio se inviato da un mittente malevolo o destinato a un host vietato) o duplicato e inviato su più collegamenti di uscita.

Instradamento

- **Instradamento** (*routing*): il livello di rete deve determinare il percorso che i pacchetti devono seguire tramite algoritmi di instradamento (**algoritmi di routing**).
- La funzione di instradamento è implementata nel piano di controllo del livello di rete.



Modelli di servizio del livello di rete

- Servizi che il livello di rete **potrebbe** avere:
 - **Consegna garantita** (il pacchetto arriva a destinazione).
 - **Consegna garantita con ritardo limitato** (garantisce la consegna del pacchetto entro un limite di ritardo specificato).
 - **Consegna ordinata** (i pacchetti arrivano a destinazione nell'ordine in cui sono stati inviati).
 - **Banda minima garantita** (finché l'host di invio trasmette bit una velocità inferiore al bit rate specificato, non si verifica perdita di pacchetti).
 - **Servizi di sicurezza** (cifratura e decifratura, garantisce riservatezza dei dati)

Servizio best-effort

- Il **livello di rete di Internet** mette a disposizione un solo servizio, noto come servizio **best-effort**, ossia “**col massimo impegno possibile**”.
- Quindi **non garantisce**:
 - La consegna dei pacchetti
 - L'ordine dei pacchetti
 - Il ritardo end-to-end
 - La larghezza di banda minima necessaria

Router

- L'elemento hardware del livello di rete è il router.
- Il router è formato da:
 - Porte d'ingresso
 - Porte d'uscita
 - Struttura di commutazioni (collega ingressi e uscite)
 - Processore di instradamento

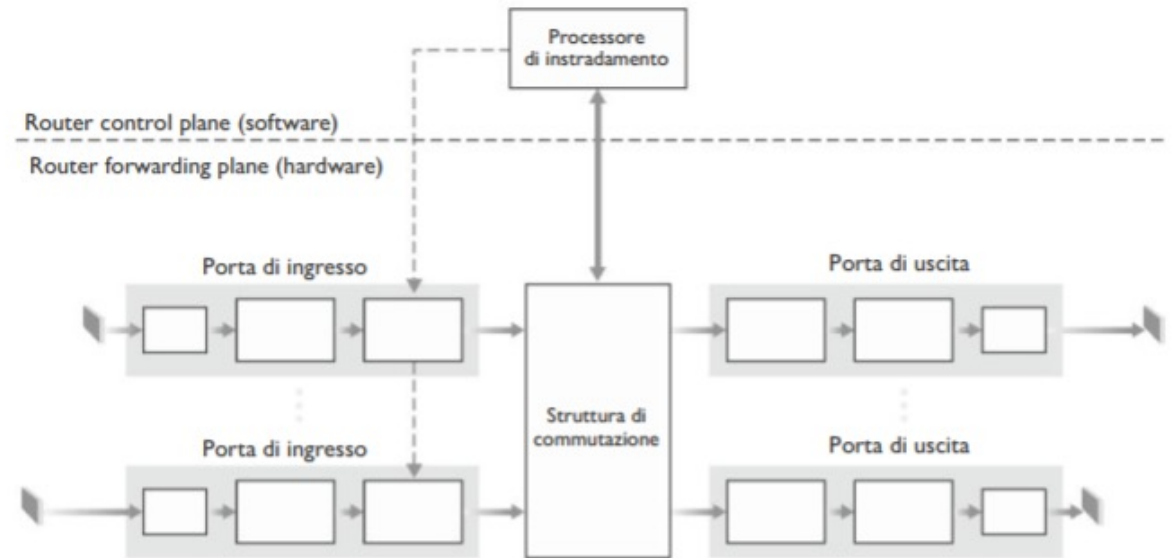


Tabella di inoltra

- Come fa un router a inoltrare un pacchetto (datagramma) in ingresso alla giusta porta di uscita?
- **Tabella di inoltra:** i router estraggono da uno o più campi dell'intestazione del pacchetto (per esempio il campo Indirizzo di destinazione). Questi valori sono utilizzati come indice nella tabella di inoltra. Il risultato indica a quale interfaccia di uscita il pacchetto debba essere diretto.


Tabella di inoltro (2)

- Esempio:
 - Supponiamo che l'indirizzo di destinazione del pacchetto sia:
11001000 00010111 00010110 10100001
 - Tabella di inoltro:

Intervallo degli indirizzi di destinazione					Interfaccia				Corrispondenza di prefisso	Interfaccia
da	11001000	00010111	00010000	00000000	0				11001000 00010111 00010	0
a	11001000	00010111	00010111	11111111						
da	11001000	00010111	00011000	00000000	1				11001000 00010111 00011000	1
a	11001000	00010111	00011000	11111111						
da	11001000	00010111	00011001	00000000	2				11001000 00010111 00011	2
a	11001000	00010111	00011111	11111111						
altrimenti					3				altrimenti	3

Tabella di inoltro (3)

- Il router adotta la regola di **corrispondenza a prefisso più lungo**



11001000 00010111 00010110 10100001

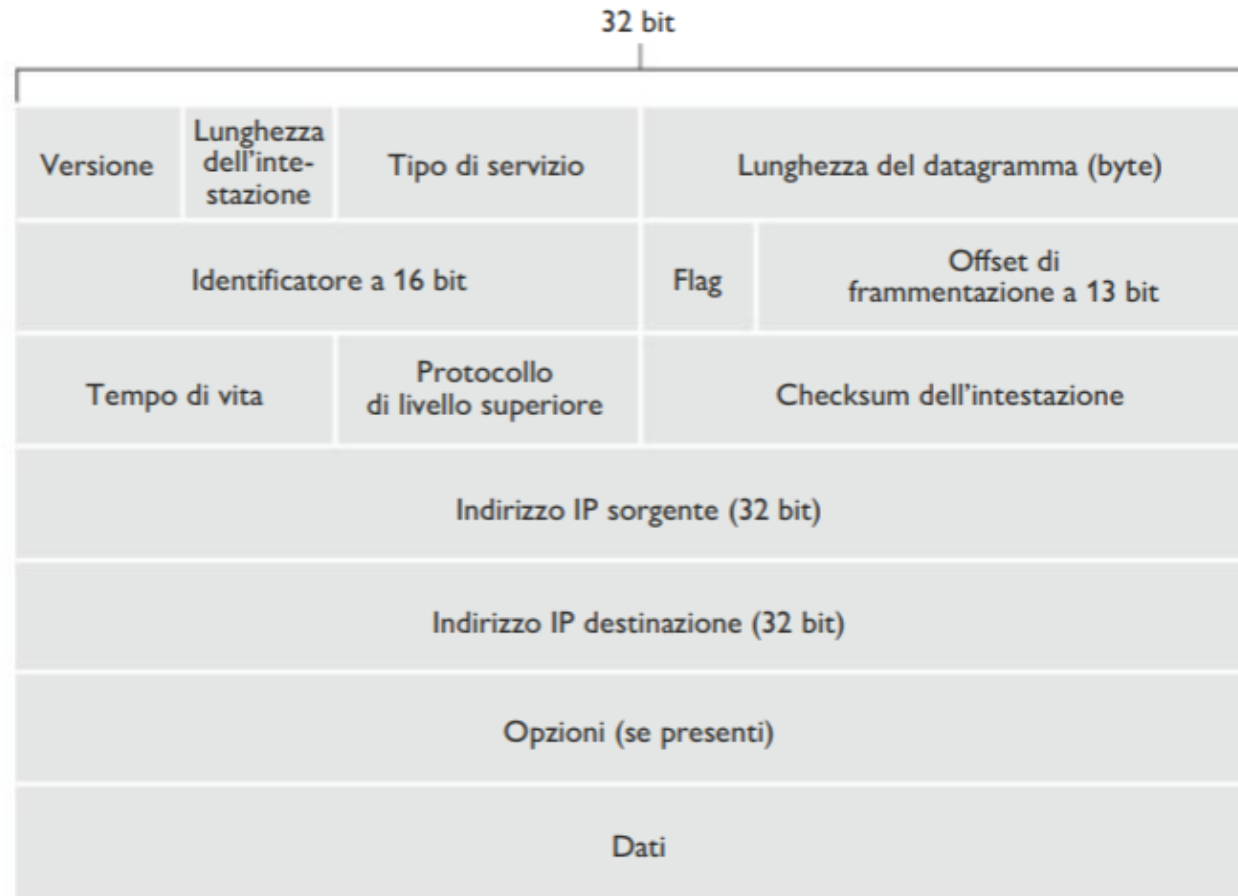
Corrispondenza di prefisso	Interfaccia
11001000 00010111 00010	0
11001000 00010111 00011000	1
11001000 00010111 00011	2
altrimenti	3

Il prefisso a 21 bit dell'indirizzo rispecchia la prima riga nella tabella, il router inoltra il pacchetto all'interfaccia di collegamento 0.

Internet Protocol (IP)

- **Protocollo Internet (IP):** protocollo fondamentale del livello di rete
- Esistono due versioni:
 - **IP versione 4** (**IPv4**, quella maggiormente usata con l'identificazione dell'indirizzo IP a 32 bit)
 - **IP versione 6** (**IPv6**, indirizzo IP a 128 bit)

Formato dei datagrammi IPv4



Dati (payload): il segmento a livello di trasporto (TCP o UDP)

Formato dei datagrammi IPv4 (2)

- **Numero di versione** (quattro bit, che specificano la versione del protocollo IP del datagramma)
- **Lunghezza dell'intestazione** (senza opzioni, l'header ha dimensione 20 byte)
- **Tipo di servizio** (bit relativi al tipo di servizio per distinguere diversi tipi di datagrammi , per esempio, quelli che richiedono basso ritardo, alto throughput o affidabilità).
- **Lunghezza del datagramma** (rappresenta la lunghezza totale del datagramma IP, intestazione più dati, misurata in byte).

Formato dei datagrammi IPv4 (3)

- Considerato che la **Lunghezza del datagramma** è lungo 16 bit, la massima dimensione dei datagrammi IP è

$$2^{16} = 65535 \text{ byte}$$

- Raramente però la lunghezza del datagramma superano i 1500 byte in modo da non superare la lunghezza massima del campo dati dei frame Ethernet.

Formato dei datagrammi IPv4 (4)

- **Identificatore, flag, offset di frammentazione** (servono per la frammentazione)
- **Tempo di vita** (assicura che i datagrammi non restino in circolazione per sempre nella rete)
- **Protocollo** (è usato quando il datagramma raggiunge la destinazione finale, il valore del campo indica lo specifico protocollo a livello di trasporto al quale vanno passati i dati del datagramma)
- **Checksum dell'intestazione** (consente ai router di rilevare gli errori sui bit nei datagrammi ricevuti)

Indirizzo IP

- Gli **indirizzi IP** (IPv4) sono lunghi 32 bit (4 byte) e quindi ci sono in totale 2^{32} indirizzi IP, cioè circa 4 miliardi.
- Gli indirizzi sono scritti nella cosiddetta notazione decimale puntata:
 - Si scrivono come quattro numeri decimali separati dal carattere “.”
 - Ogni numero rappresenta il contenuto di un byte ed è quindi compreso tra 0-255.
 - Esempio:

00001001 00100011 11100001 00101101

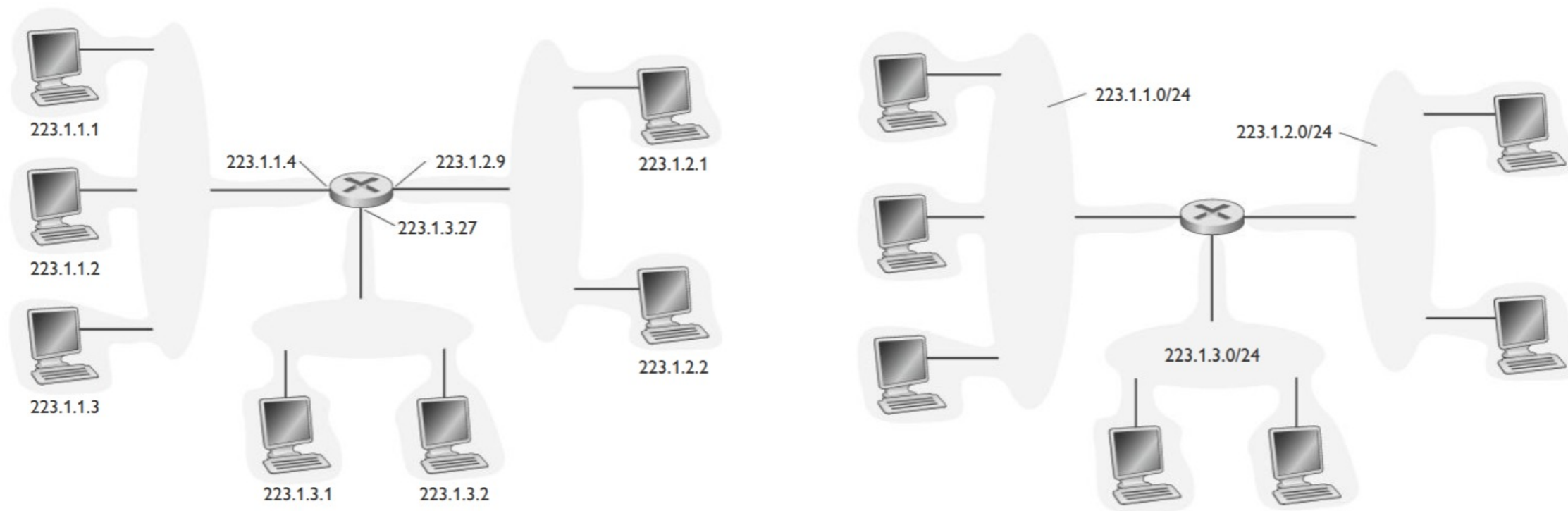


9.35.225.45

Indirizzo IP (2)

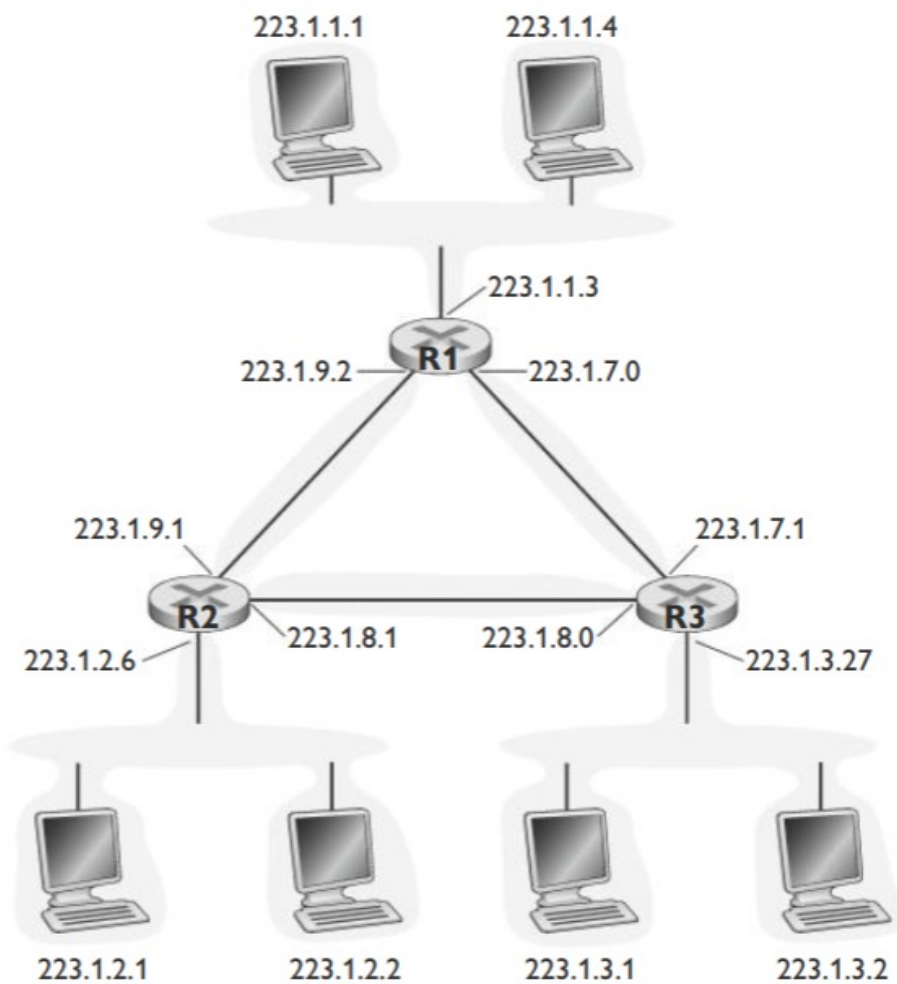
- L'indirizzo IP è tecnicamente associato a un'interfaccia, anziché all'host o al router che la contiene.
- Un'**interfaccia** è il confine tra host e collegamento fisico.
- Un sistema periferico quindi può avere solo un indirizzo IP.
- Per un **router**, l'interfaccia è il **confine tra il nodo è uno dei suoi collegamenti**.
- Un router quindi ha più indirizzi IP.

Sottorete



IP assegna ad una sottorete l'indirizzo 223.1.1.0/24, dove la notazione /24, detta anche **maschera di sottorete** (*subnet mask*), indica che i 24 bit più a sinistra dell'indirizzo definiscono l'indirizzo della sottorete. Di conseguenza, la sottorete 223.1.1.0/24 consiste di tre interfacce di host (223.1.1.1, 223.1.1.2, 223.1.1.3) e di un'interfaccia di router (223.1.1.4).

Sottorete (2)

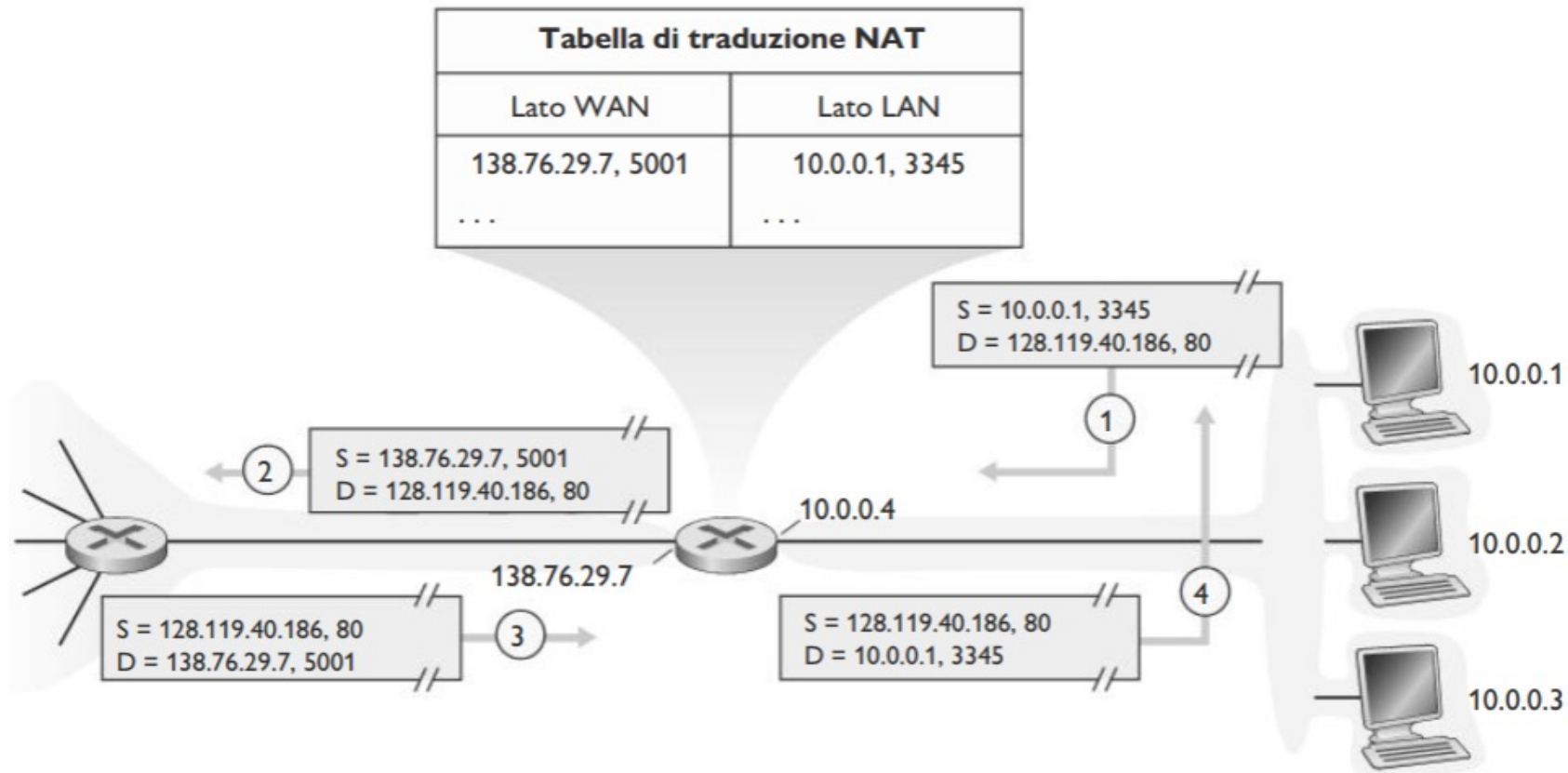


Assegnazione indirizzi IP

- La strategia di assegnazione degli indirizzi Internet è detta **Classless Interdomain Routing (CIDR)**.
- L'indirizzo IP viene diviso in due parti e mantiene la forma decimale puntata **a.b.c.d/x**, dove **x** (**/x maschera di sottorete**) indica il numero di bit nella prima parte dell'indirizzo.

	Maschera	Host	
/17	255.255.128.0	32768	(ISP / grandi aziende)
/24	255.255.255.0	256	(LAN)

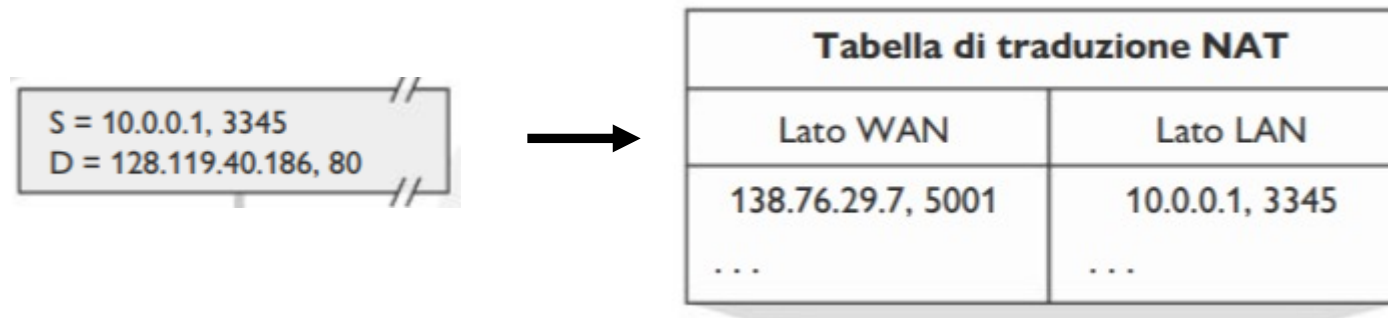
NAT (Network Address Translation)



Il router abilitati al **NAT** assegnano ad una intera **Local Area Network (LAN)** un solo indirizzo IP lato **Wide Area Network (WAN)**.

NAT (Network Address Translation) (2)

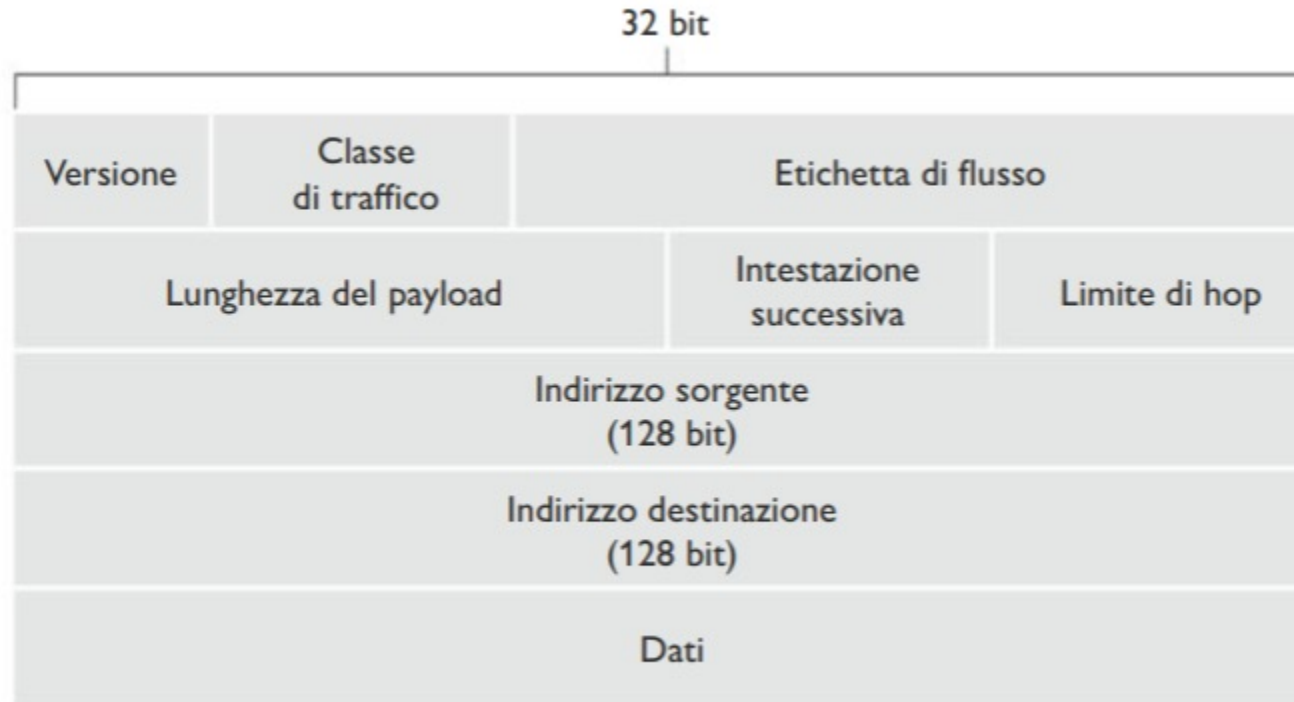
- Come apprende il router a quale host interno dovrebbe essere inoltrato un determinato datagramma?
- Utilizzando una **tabella di traduzione NAT** (*NAT translation table*) nel router NAT e nell'includere nelle righe di tale tabella i numeri di porta oltre che gli indirizzi IP.
- Ad ogni richiesta il router NAT genera un nuovo indirizzo di porta in ingresso e uscita.



NAT (Network Address Translation) (3)

- Il router NAT può selezionare qualsiasi numero di porta che attualmente non si trova nella tabella di traduzione NAT.
- Essendo il campo numero di porta lungo 16 bit, il protocollo NAT può supportare più di 60000 connessioni simultanee con un solo indirizzo IP sul lato WAN relativo al router.

Formato dei datagrammi IPv6



- Indirizzi di 16 byte (2^{128} circa 3.4×10^{38} indirizzi IP possibili)
- IPv6 ha un header più semplice rispetto IPv4
- Intestazione ottimizzata di 40 byte fissi

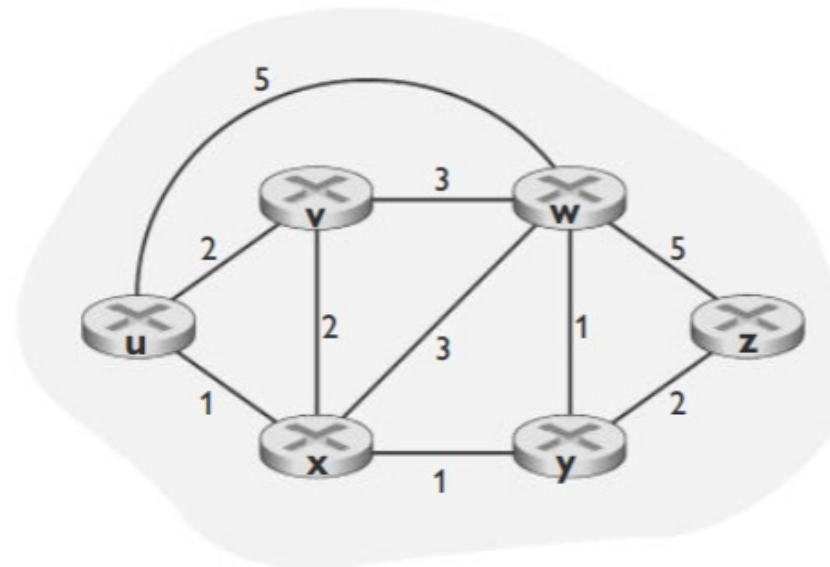
Formato dei datagrammi IPv6 (2)

- **Classe di traffico:** può essere utilizzato per attribuire priorità a determinati datagrammi all'interno di un flusso o provenienti da una specifica applicazione.
- **Etichettatura dei flussi:** definizione elusiva di flusso. L'etichettatura di pacchetti che appartengono a flussi particolari per i quali il mittente richiede una gestione speciale, come una qualità di servizio diversa da quella di default o un servizio in tempo reale.
- **Intestazione successiva:** identifica il protocollo a cui verranno consegnati i contenuti (campo dati) del datagramma.
- **Limite di hop:** il contenuto di questo campo è decrementato di 1 da ciascun router che inoltra il datagramma. Quando il suo valore raggiunge 0, il datagramma viene eliminato.

Algoritmi di instradamento

- Gli **algoritmi di instradamento** (*routing algorithm*) hanno lo scopo di determinare i percorsi tra le sorgenti e i destinatari, attraverso la rete di router.
- Tipicamente, il percorso migliore è quello che ha costo minimo.
- Modello a grafo di una rete:

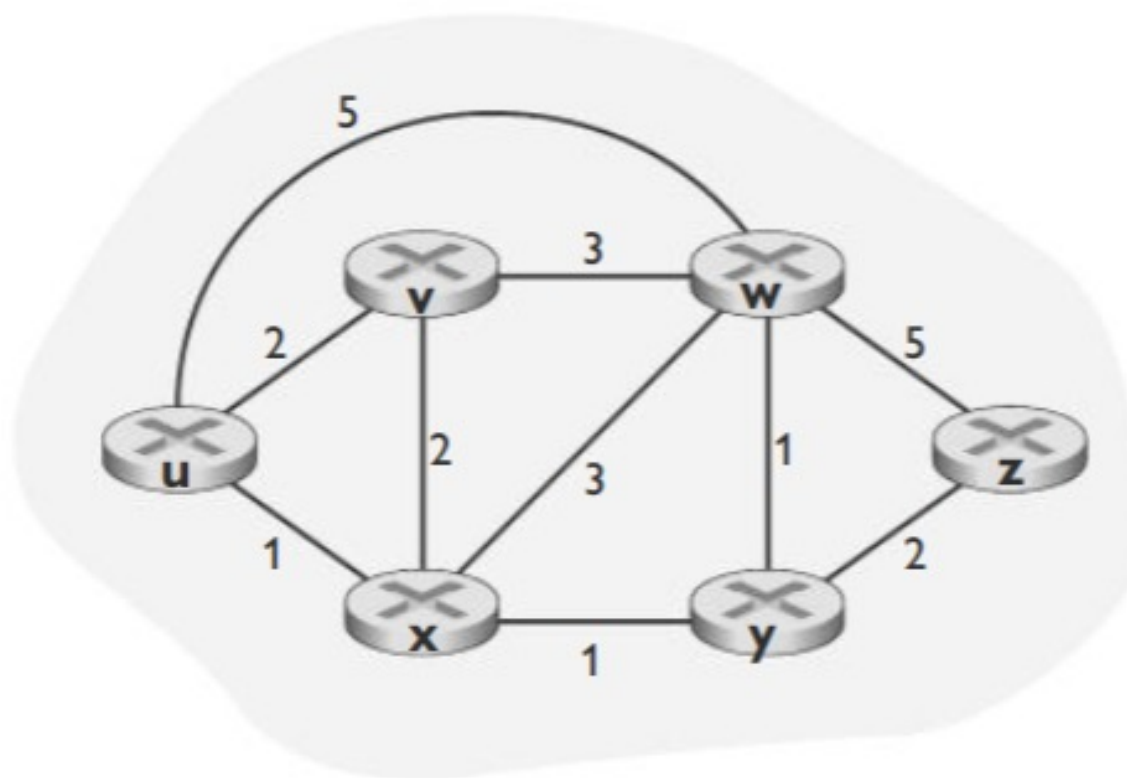
Il valore in un collegamento indica il costo.



Algoritmi di instradamento (2)

- In genere, il costo di un collegamento può riflettere la lunghezza fisica del collegamento corrispondente, la velocità del collegamento o il suo prezzo.
- Uno o più di tali percorsi rappresenta un percorso a costo minimo (*least-cost path*).
- Il problema è quindi determinare un percorso tra l'origine e la destinazione che abbia il costo minimo.

Algoritmi di instradamento (2)



Costo minimo tra u e w è 3 (u, x, y, w)

Tipi di algoritmi di instradamento

- Un **algoritmo di instradamento centralizzato** calcola il percorso a costo minimo tra una sorgente e una destinazione avendo una conoscenza globale e completa della rete.
- Un **algoritmo di instradamento decentralizzato** calcola il percorso a costo minimo in modo distribuito e iterativo. Nessun nodo possiede informazioni complete sul costo di tutti i collegamenti di rete.

Tipi di algoritmi di instradamento (2)

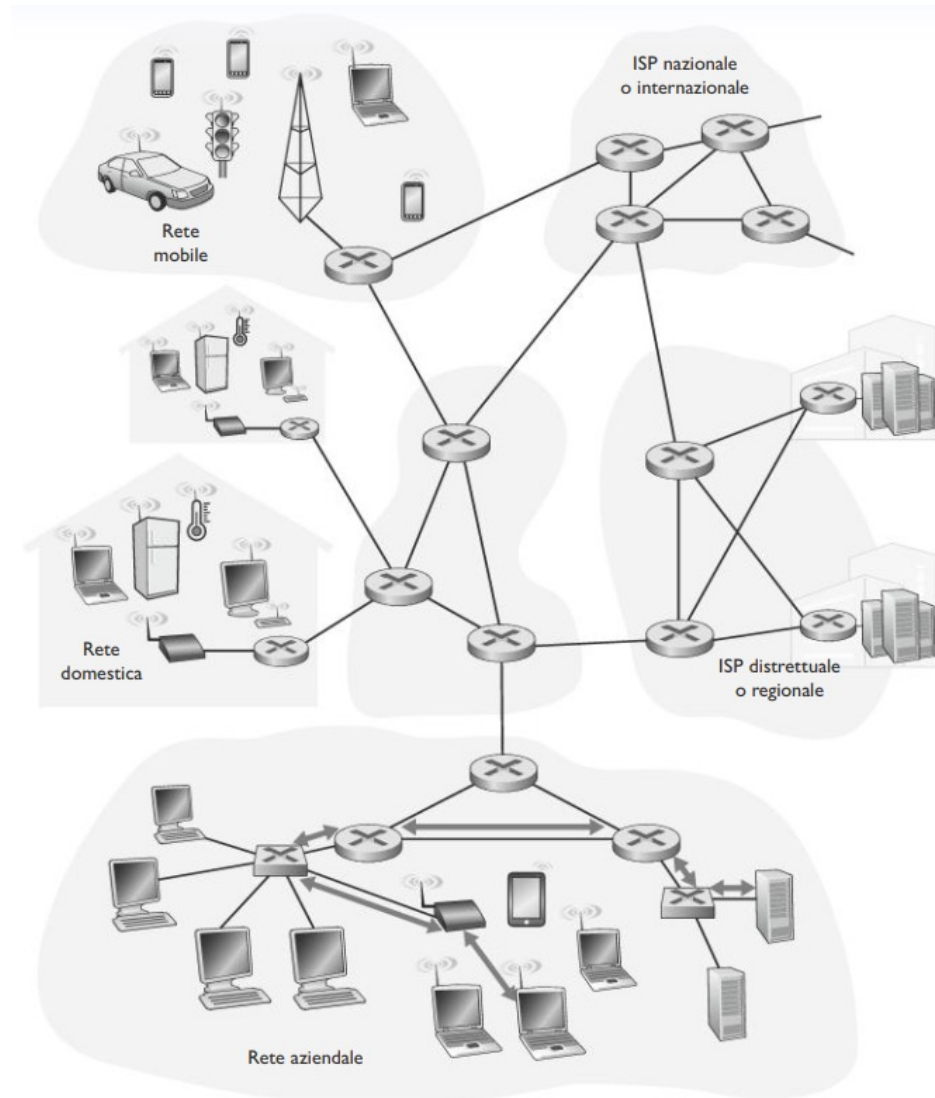
- Inoltre si possono avere:
 - **Algoritmi di instradamento statici:** i percorsi cambiano molto raramente, spesso come risultato di un intervento umano.
 - **Algoritmi di instradamento dinamici:** determinano gli instradamenti al variare del volume di traffico o della topologia della rete (modello geometrico della rete, il grafo).
- Oppure:
 - **Algoritmi sensibili al carico:** i costi dei collegamenti variano dinamicamente per riflettere il livello corrente di congestione.
 - **Algoritmi insensibili al carico:** dato che il costo di un collegamento non riflette esplicitamente il suo attuale (o recente) livello di congestione.

Livello
di collegamento

Livello di collegamento

- I **collegamenti** (*link*) sono i **canali di comunicazione**, che collegano nodi adiacenti lungo un cammino. I datagrammi del livello di rete che devono essere trasferiti da un host sorgente a uno di destinazione devono essere trasportati lungo ciascun collegamento nel percorso da un estremo all'altro.
- Su ogni collegamento, un nodo trasmittente incapsula il datagramma in un **frame** del **livello di collegamento** (*link-layer frame*) e lo trasmette lungo il collegamento stesso.

Livello di collegamento (2)

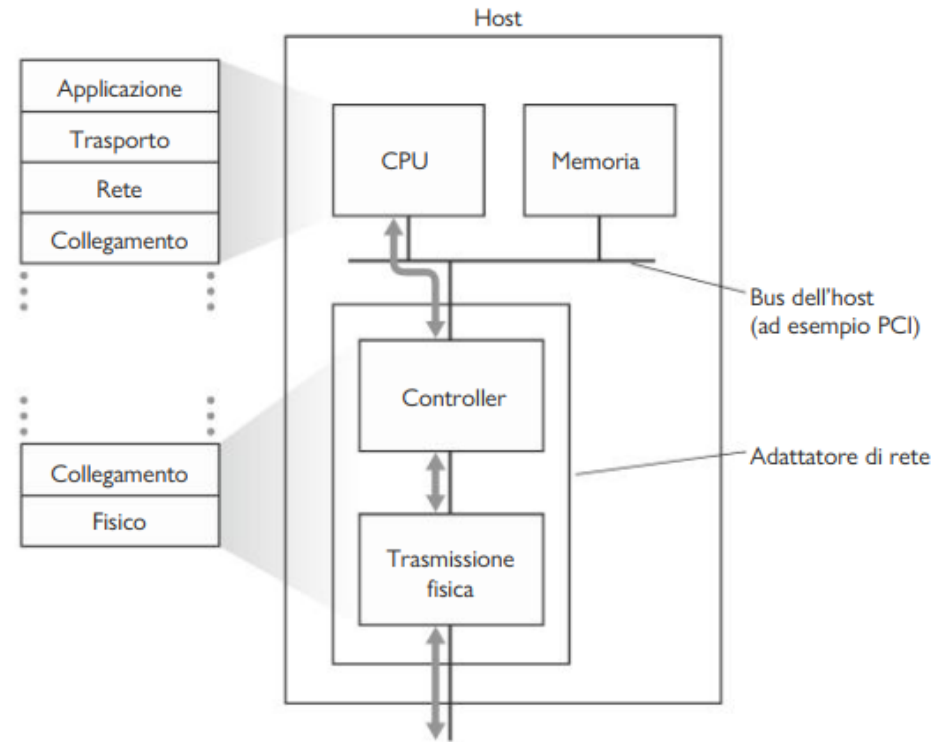


Servizi del livello di collegamento

- **Framing:** quasi tutti i protocolli incapsulano i datagrammi del livello di rete all'interno di un frame a livello di collegamento, prima di trasmetterlo.
- **Accesso al collegamento:** un protocollo che controlla l'accesso al mezzo trasmissivo (**MAC**, *medium access control*) specifica le regole con cui immettere i frame nel collegamento.
- **Consegna affidabile:** i protocolli a livello di collegamento che forniscono un servizio di consegna affidabile garantiscono il trasporto senza errori di ciascun datagramma.
- **Rilevazione e correzione degli errori:** il nodo ricevente può decidere erroneamente che un bit in un frame, trasmesso come un 1, sia uno 0 e viceversa. Gli errori di bit sono causati dall'attenuazione di segnale e dai disturbi elettromagnetici.

Adattatore di rete

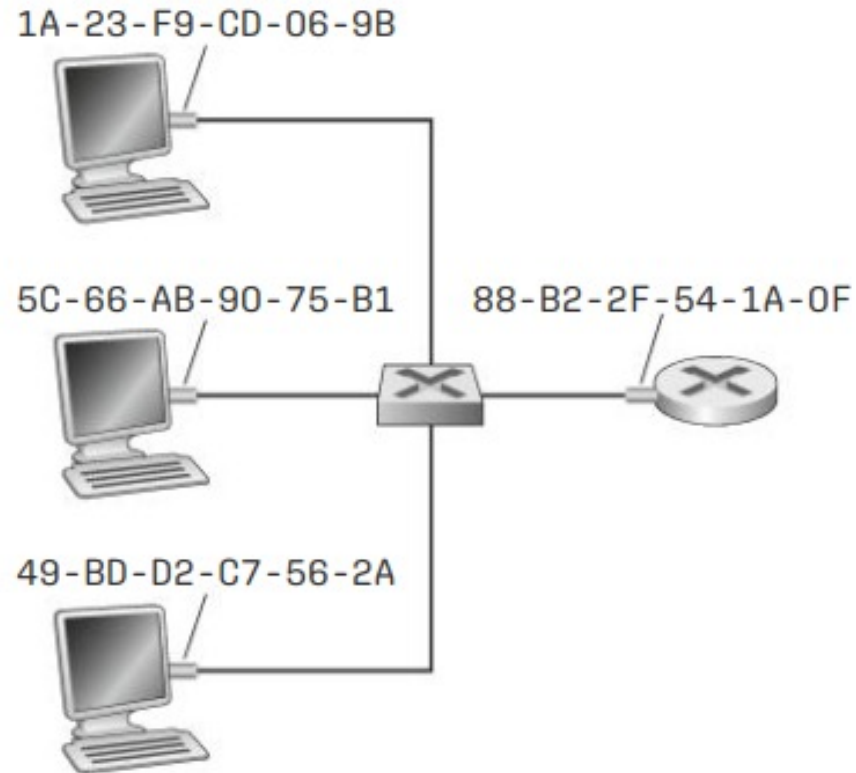
- Il protocollo del livello di collegamento è sostanzialmente realizzato da un **adattatore di rete** (*network adapter*), noto anche come **scheda di rete**.



Indirizzi MAC

- Le **schede di rete** possiedono **indirizzi a livello di collegamento**, gli **indirizzi MAC**.
- Un host o un router con più interfacce di rete avrà **più indirizzi** a livello di collegamento associati a esse.
- Gli **switch a livello di collegamento** **non hanno indirizzi** a livello di collegamento associati alle loro interfacce che connettono a host e router. Questo avviene perché il compito degli switch è trasportare i frame tra host e router.

Indirizzi MAC (2)



Usano 6 byte (48 bit) rappresentati
come 6 coppie di cifre esadecimali.

Non esistono due schede di rete con lo stesso indirizzo MAC!

Protocollo per la risoluzione degli indirizzi

- Il **protocollo di risoluzione degli indirizzi (ARP, *address resolution protocol*)** ha il compito di mappare gli indirizzi del livello di rete (come gli **indirizzi IP** di Internet) agli indirizzi del livello di collegamento (gli **indirizzi MAC**).
- Un modulo ARP nel nodo sorgente riceve in input un indirizzo IP della stessa LAN e restituisce l'indirizzo MAC corrispondente.

Protocollo per la risoluzione degli indirizzi (2)

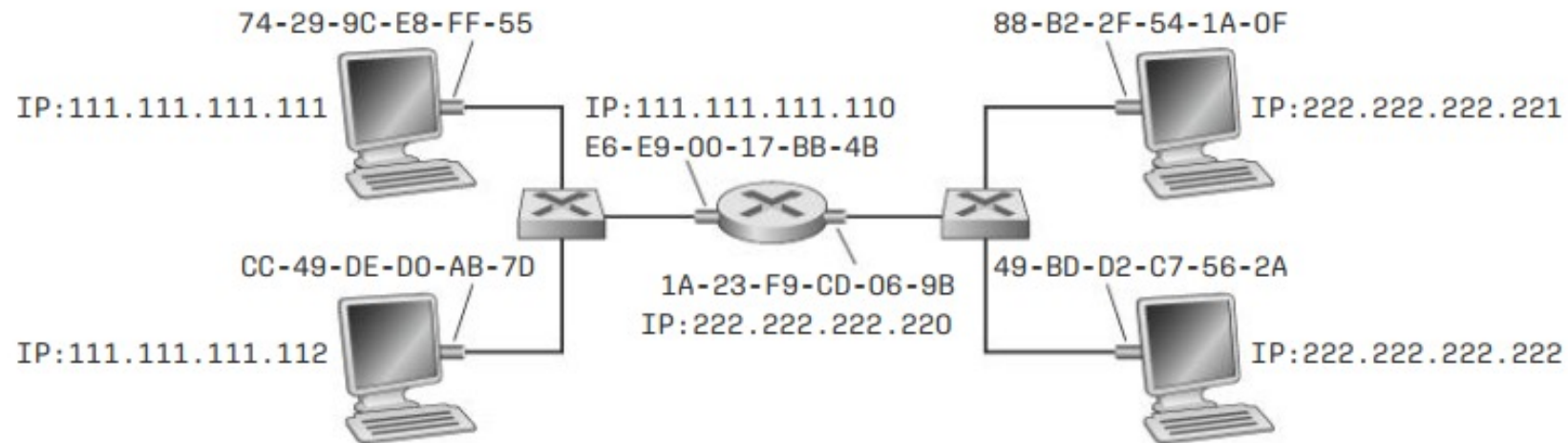
- Esempio di tabella ARP in una LAN:

Indirizzo IP	Indirizzo MAC	TTL
222.222.222.221	88-B2-2F-54-1A-0F	13:45:00
222.222.222.223	5C-66-AB-90-75-B1	13:52:00

La tabella contiene un valore relativo al TTL (time-to-live, tempo di vita), che indica quando bisognerà eliminare una data voce dalla tabella.

Protocollo per la risoluzione degli indirizzi (3)

- Esempio con due sottoreti:



Ethernet

- **Ethernet** è un insieme di tecnologie e protocolli per reti locali (LAN).
- Struttura di un **frame Ethernet**:



Frame Ethernet

- **Campo dati** (da 46 a 1500 byte): contiene il datagramma IP. Dato che l'**unità massima di trasmissione** (**MTU**, *maximum transfer unit*) per Ethernet è di 1500 byte, se il datagramma IP supera questo valore, l'host deve frammentare il datagramma. Altrimenti, se il datagramma IP è inferiore alla dimensione minima del campo dati, equivalente a 46 byte, il campo dovrà essere "riempito" fino a raggiungere quel dato valore.
- **Indirizzo destinazione** (6 byte): l'indirizzo MAC della scheda di rete di destinazione.
- **Indirizzo sorgente** (6 byte): l'indirizzo MAC della scheda di rete che trasmette il pacchetto.

Frame Ethernet (2)

- **Tipo (2 byte)**: consente a Ethernet di supportare vari protocolli di rete (non solo IP).
- **Controllo a ridondanza ciclica (CRC) (4 byte)**: consente alla scheda di rete ricevente di rilevare la presenza di un errore nei bit del frame.
- **Preambolo (8 byte)**: sincronizza il clock della schede di rete del ricevente con quello del trasmittente.

Frame Ethernet (3)

- Tutte le tecnologie Ethernet forniscono **un servizio senza connessione**.
- Quando una scheda di rete vuole inviare un datagramma a un host della rete non fa altro che incapsularlo in un frame Ethernet e immetterlo nella LAN.
- Tutte le tecnologie Ethernet forniscono un **servizio non affidabile** al livello di rete. In particolare, quando la scheda di rete B riceve un frame da A, lo sottopone a un controllo, ma non invia un acknowledgement né se il frame supera il controllo né in caso contrario: semplicemente lo scarta.

Controllo a ridondanza ciclica (CRC)

- **Controllo a ridondanza ciclica (CRC):** tecnica di rilevamento degli errori su una sequenza di bit.
- I codici CRC sono anche detti codici polinomiali, in quanto è possibile vedere la stringa di bit da trasmettere come un polinomio i cui coefficienti sono i bit della stringa, con le operazioni sulla stringa di bit interpretate come aritmetica polinomiale.

Controllo a ridondanza ciclica (CRC) (2)

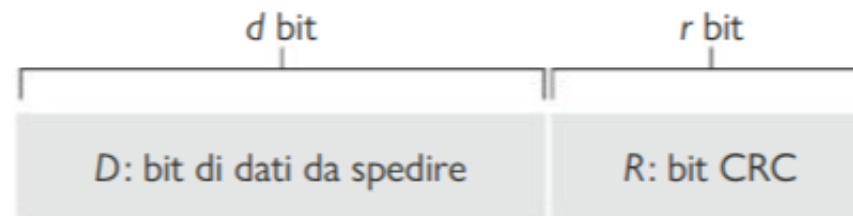
- **Funzionamento:**

- Consideriamo d bit costituenti i dati D da trasmettere e supponiamo che sorgente e destinazione si siano accordate su una stringa di $r + 1$ bit, conosciuta come generatore, che indicheremo con G .
- Dato un blocco di dati, D , il mittente sceglierà r bit aggiuntivi, R , e li unirà a D in modo da ottenere una stringa di $d + r$ bit che, interpretata come numero binario, sia esattamente divisibile per G (nell'aritmetica modulo 2). Il processo di controllo del CRC è semplice: se la divisione $(d + r)/G$ ha un resto diverso da 0, il ricevente sa che si è verificato un errore; altrimenti i dati sono accettati come corretti.

Controllo a ridondanza ciclica (CRC) (3)

- Tutti i calcoli di CRC sono eseguiti in aritmetica modulo 2 senza riporti nelle addizioni e prestiti nelle sottrazioni. Questo significa che addizione e sottrazione sono operazioni identiche e che entrambe equivalgono a un'operazione di OR esclusivo (XOR) sui bit degli operandi.
- Il trasmettitore imposta R con la seguente formula: $R = \text{resto di } (D \times 2^r / G)$

1011 XOR 0101 = 1110
1001 XOR 1101 = 0100



$D \cdot 2^r \text{ XOR } R$

Formula matematica

Controllo a ridondanza ciclica (CRC) (4)

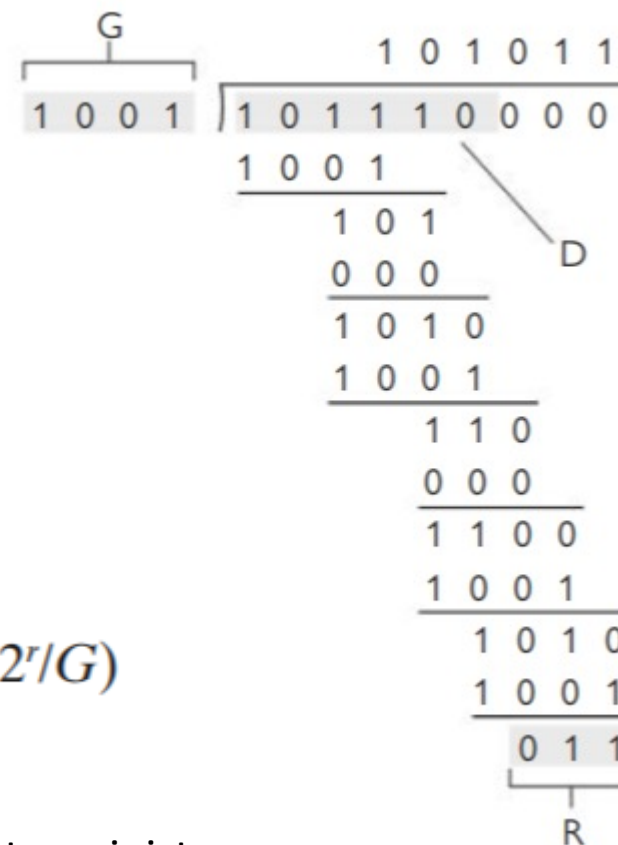
- Esempio:

$D = 101110$, $d = 6$, $G = 1001$, $r = 3$ (il generatore G ha dimensione $r+1$)

Usando la formula per R si trova che vale 011, quindi la sequenza inviata è 101110011 ($D+R$).

$$R = \text{resto di } (D \times 2^r / G)$$

La moltiplicazione di una stringa per 2^k corrisponde allo slittamento a sinistra della stringa di k posizioni.



Switch a livello di collegamento

- Il ruolo dello switch è ricevere i frame in ingresso e inoltrarli sui collegamenti in uscita verso il router.
- Il **filtraggio** (*filtering*) è la funzionalità dello switch che determina se un frame debba essere inoltrato a una qualche interfaccia o scartato.
- L'**inoltro** (*forwarding*) consiste nell'individuazione dell'interfaccia verso cui il frame deve essere diretto e, quindi, nell'inviarlo a quell'interfaccia.
- Le operazioni di filtraggio e inoltro di uno switch sono eseguite mediante una **tabella di commutazione** (*switch table*).

Switch a livello di collegamento (2)

- Esempio di tabella di commutazione:

Indirizzo	Interfaccia	Tempo
62-FE-F7-11-89-A3	1	9:32
7C-BA-B2-B4-91-10	3	9:36
....

- Uno switch ha la proprietà di costruire automaticamente, dinamicamente e in modo autonomo le proprie tabelle.

Livello
fisico

Livello fisico

- Il **livello fisico** si occupa della **trasmissione di sequenze di bit** sul canale fisico di comunicazione (mezzi vincolati e mezzi non vincolati).
- Il livello specifica:
 - **Codifiche dei bit** (quanti volt rappresentano un bit 0 e quanti un bit 1, quanti nanosecondi deve durare un bit).
 - **Caratteristiche dei cavi e dei connettori** (quanti contatti deve avere il connettore di rete, quale funzione deve avere ciascun contatto).
 - **Caratteristiche della trasmissione**: simplex (in una sola direzione), half duplex (nelle due direzioni ma non contemporaneamente), full duplex (nelle due direzioni contemporaneamente).
 - **Gestione degli effetti del canale sul segnale** (es. attenuazione, distorsione, rumore).

Larghezza di banda

- Ogni segnale può essere rappresentato come una somma di segnali elementari di tipo sinusoidale – ossia $y(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \theta)$ - ciascuno caratterizzato da una frequenza di oscillazione $f = 1/T$ (cicli al secondo o hertz) dove T è il periodo del segnale .
- Ogni segnale è quindi caratterizzato dalle frequenze di cui è composto. Esempio: la voce umana contiene tutte le frequenze nell'intervallo 80-8000 Hz.
- Ogni canale è caratterizzato da una **larghezza di banda** che specifica l'intervallo di frequenze che il canale lascia passare senza apprezzabile distorsione.

Larghezza di banda (2)

- È importante **confrontare le frequenze contenute in un segnale con la larghezza di banda del canale** che si intende usare per la sua trasmissione per vedere se tale **canale è adeguato o meno**.
- Esempio: un segnale TV che contiene frequenze nell'intervallo 0-7 MHz viene fortemente distorto se trasmesso attraverso un doppino che ha una larghezza di banda di 2 MHz.
- La **larghezza di banda** influisce sulla **velocità massima di trasmissione**. Maggiore è la larghezza di banda, maggiore è la velocità massima di trasmissione (teorico).