



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Δίκτυα Επικοινωνιών Ι

Ενότητα 6: Επίπεδο Ζεύξης:
Ζεύξεις, Δίκτυα Πρόσβασης,
Δίκτυα Τοπικής Περιοχής

Διδάσκων: Νάσος Βάιος

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

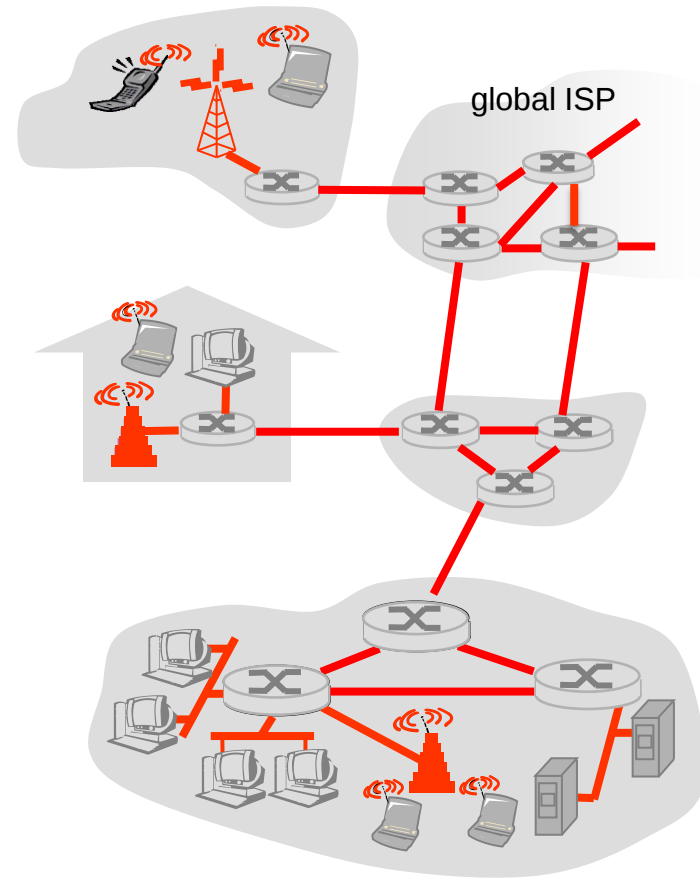
Επίπεδο ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας αίτησης web

Επίπεδο ζεύξης: Εισαγωγή

Ορολογία:

- οι υπολογιστές και οι δρομολογητές είναι **κόμβοι (nodes)**
- τα κανάλια επικοινωνίας που ενώνουν γειτονικούς κόμβους κατά μήκος της διαδρομής επικοινωνίας είναι **ζεύξεις (links)**
 - ενσύρματες ζεύξεις
 - ασύρματες ζεύξεις
 - LANs
- το πακέτο επιπέδου 2 ονομάζεται **πλαίσιο (frame)**, ενθυλακώνει datagram



το επίπεδο ζεύξης δεδομένων
έχει την ευθύνη μεταφοράς των
datagrams από έναν κόμβο σε
φυσικά γειτονικό κόμβο πάνω
από μία ζεύξη

Επίπεδο ζεύξης: πλαίσιο

- Το datagram μεταφέρεται από διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης σε διαφορετικές ζεύξεις:
 - π.χ., Ethernet στην πρώτη ζεύξη, frame relay σε ενδιάμεσες ζεύξεις, 802.11 στην τελευταία ζεύξη
- Κάθε πρωτόκολλο ζεύξης παρέχει διαφορετικές υπηρεσίες
 - π.χ., ενδέχεται να παρέχει ή να μην παρέχει απομακρυσμένη μετάδοση δεδομένων (remote data transmission - rdt) πάνω από τη ζεύξη

Αναλογία με μεταφορές

- Ταξίδι από το Πρίνστον στη Λωζάνη
 - **Ταξί**: Πρίνστον ως JFK
 - **Αεροπλάνο**: JFK ως Γενεύη
 - **Τρένο**: Γενεύη ως Λωζάνη
- Τουρίστας = **datagram**
- Τμήμα μεταφοράς = **ζεύξη επικοινωνίας**
- Τρόπος μεταφοράς = **πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης**
- Ταξιδιωτικός πράκτορας = **αλγόριθμος δρομολόγησης**

Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης

□ Πλαισίωση, πρόσβαση στη ζεύξη:

- ενθυλακώνει το datagram σε πλαίσιο, προσθέτοντας κεφαλίδα, ουρά
- πρόσβαση στο κανάλι στην περίπτωση κοινόχρηστου μέσου
- χρησιμοποιούνται "MAC" (medium access control) διευθύνσεις στις κεφαλίδες των πλαισίων για την αναγνώριση πηγής, προορισμού
 - διαφορετικές από τις διευθύνσεις IP !

□ Αξιόπιστη παράδοση μεταξύ γειτονικών κόμβων

- μάθαμε ήδη πώς γίνεται (Κεφάλαιο 3)!
- σπάνια χρησιμοποιείται σε ζεύξεις με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων bit (ίνες, κάποια συνεστραμμένα ζεύγη)
- ασύρματες ζεύξεις: υψηλοί ρυθμοί σφαλμάτων
 - Ε: γιατί αξιοπιστία και σε επίπεδο ζεύξης και από άκρο σε άκρο;

Υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης

❑ Έλεγχος ροής:

- ρύθμιση ρυθμού μεταξύ γειτονικών κόμβων αποστολής και λήψης

❑ Ανίχνευση σφαλμάτων :

- σφάλματα που προκαλούνται από εξασθένιση του σήματος, θόρυβο
- ο δεκτής ανιχνεύει την ύπαρξη σφαλμάτων:
 - ειδοποιεί τον αποστολέα για αναμετάδοση ή απορρίπτει το πλαίσιο

❑ Διόρθωση σφαλμάτων:

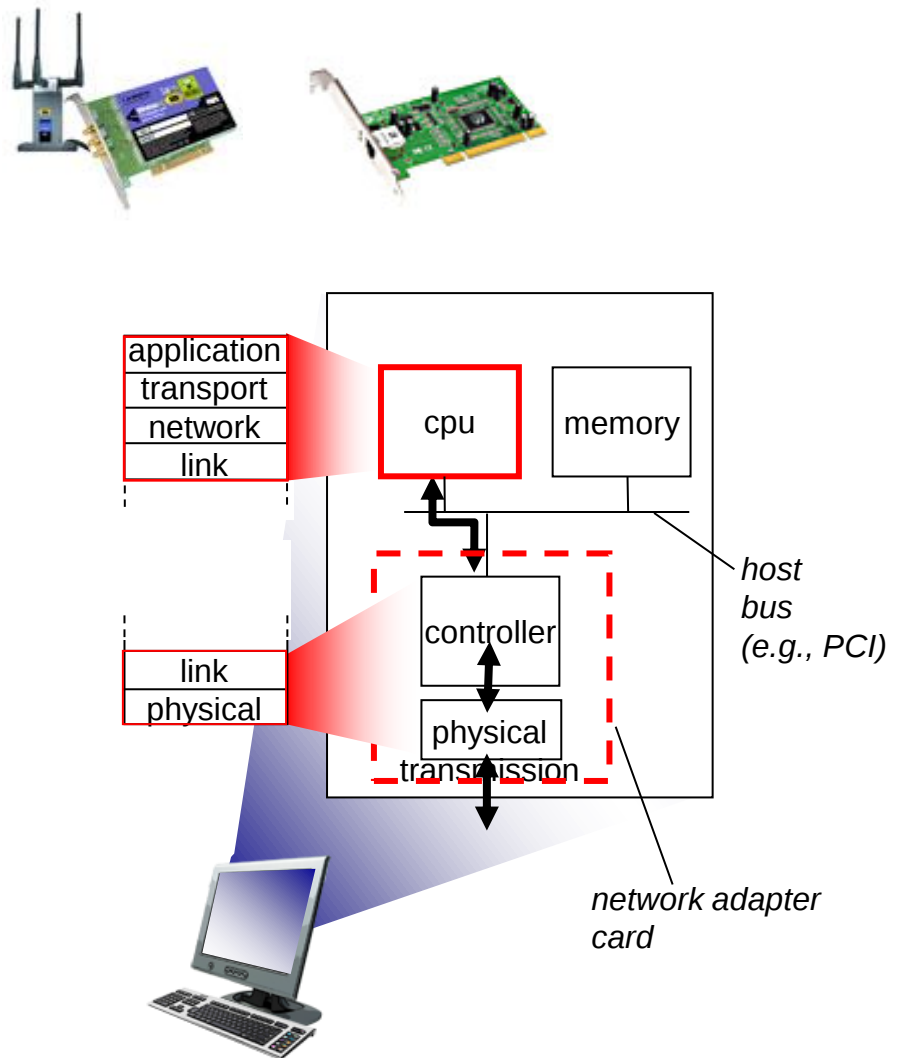
- ο δέκτης αναγνωρίζει και διορθώνει σφάλματα bit χωρίς να καταφεύγει στην αναμετάδοση

❑ Ημι-αμφίδρομη (Half-duplex) και αμφίδρομη (Full-duplex)

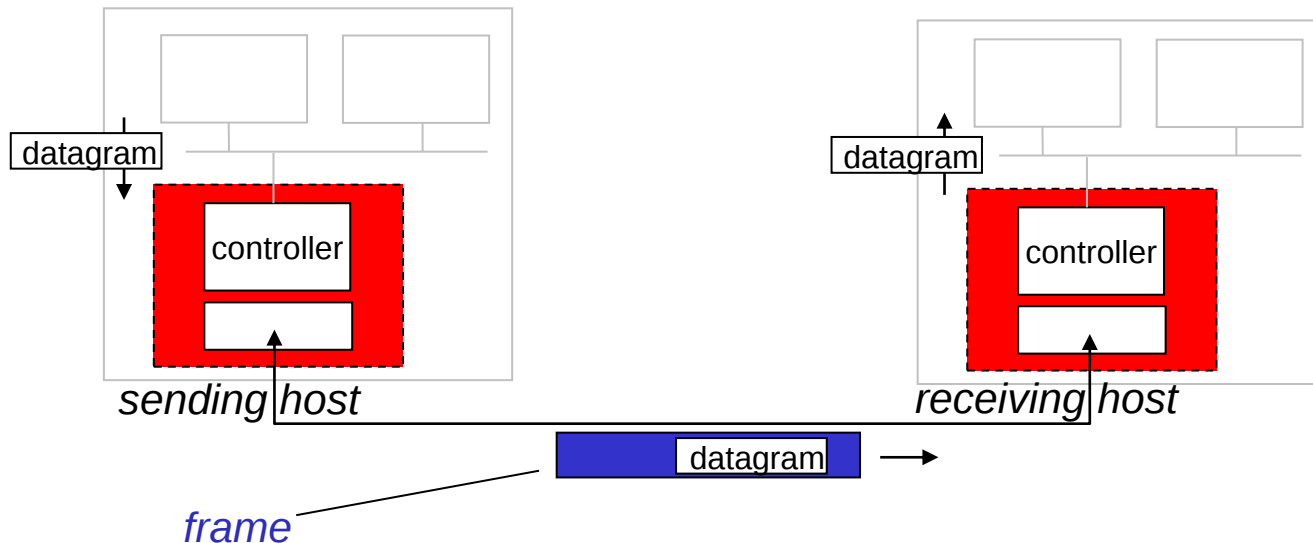
- με half duplex, οι κόμβοι και στα δυο άκρα της ζεύξης μπορούν να μεταδώσουν, αλλά όχι ταυτόχρονα

Πού υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης;

- σε κάθε υπολογιστή
- σε «προσαρμογέα» δικτύου (δηλ. **κάρτα δικτύου** (*network interface card* - NIC)) ή σε chip
 - κάρτα Ethernet, κάρτα 802.11, Ethernet chipset
 - υλοποιεί τη ζεύξη, φυσικό επίπεδο
- συνδέεται στο δίαυλο συστήματος του υπολογιστή
- συνδυασμός hardware, software, firmware



Προσαρμογείς που επικοινωνούν



□ πλευρά αποστολής:

- ενθυλακώνει το datagram σε πλαίσιο (*frame*)
- προσθέτει bits ελέγχου σφάλματος, αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων (rdt), ελέγχου ροής, κ.τ.λ.

□ πλευρά λήψης

- ελέγχει για σφάλματα, rdt, έλεγχος ροής, κ.τ.λ.
- εξαγεί το datagram, το παραδίδει στο ανώτερο επίπεδο στην πλευρά λήψης

Επίπεδο Ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας web αίτησης

Πρωτόκολλα και ζεύξεις πολλαπλής πρόσβασης

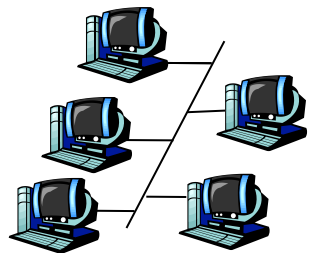
Δύο είδη "ζεύξεων":

□ **σημείο προς σημείο**

- PPP για πρόσβαση dial-up
- σημείο προς σημείο ζεύξη μεταξύ μεταγωγού Ethernet και υπολογιστή

□ **ευρυ-εκπομπής (broadcast)** (καλώδιο ή μέσο κοινής χρήσης)

- παραδοσιακό Ethernet
- upstream HFC
- 802.11 wireless LAN



shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared RF
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF
(satellite)



humans at a
cocktail party
(shared air, acoustical)

Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης

- ❑ μοναδικό broadcast κανάλι κοινής χρήσης
- ❑ δύο ή περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις από τους κόμβους: παρεμβολές
 - Σύγκρουση (collision) αν ο κόμβος λάβει δύο ή περισσότερα σήματα ταυτόχρονα

Πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

- ❑ κατανεμημένος αλγόριθμος που καθορίζει πώς οι κόμβοι μοιράζονται το κανάλι, π.χ., καθορίζει πότε ο κόμβος μπορεί να μεταδώσει
- ❑ η επικοινωνία για την κοινή χρήση του καναλιού πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο το κανάλι!
 - Δεν υπάρχει εκτός ζώνης (out-of-band) κανάλι για συντονισμό!

Ιδανικό πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

Δίνεται: Κανάλι ευρυ-εκπομπής (broadcast) ρυθμού R

Ζητούμενο:

- ❑ όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει μπορεί να στείλει με ρυθμό R .
- ❑ όταν M κόμβοι θέλουν να μεταδώσουν, ο καθένας μπορεί να στείλει με μέσο ρυθμό R/M
- ❑ πλήρως αποκεντρωμένο:
 - ❑ χωρίς κάποιος ειδικός κόμβος να συντονίζει τις μεταδόσεις
 - ❑ χωρίς συγχρονισμό ρολογιών, θυρίδων
- ❑ απλό

Πρωτόκολλα ΜΑC: μια ταξινόμηση

Τρεις ευρείες κατηγορίες:

❑ διαμέριση καναλιού

- διαιρεί το κανάλι σε μικρότερα "κομμάτια" (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες)
- εκχώρηση κομματιού σε κόμβο για αποκλειστική χρήση

❑ τυχαία πρόσβαση

- το κανάλι δε διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις
- "ανάνηψη" από συγκρούσεις

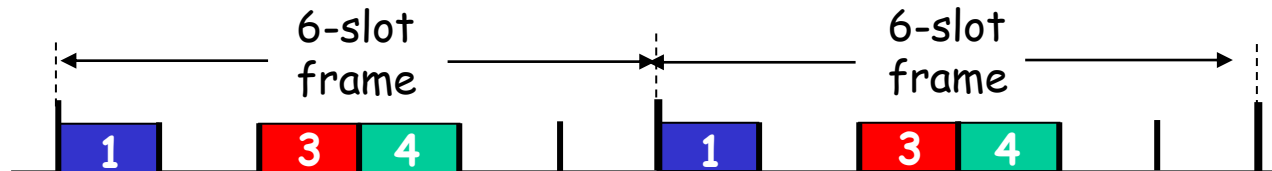
❑ εκ περιτροπής λειτουργία

- οι κόμβοι μεταδίδουν με τη σειρά, αλλά οι μεταδόσεις των κόμβων που έχουν να στείλουν περισσότερα μπορεί να διαρκέσουν περισσότερο

Πρωτόκολλα MAC διαμέρισης καναλιού: TDMA

TDMA: πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (time division multiple access)

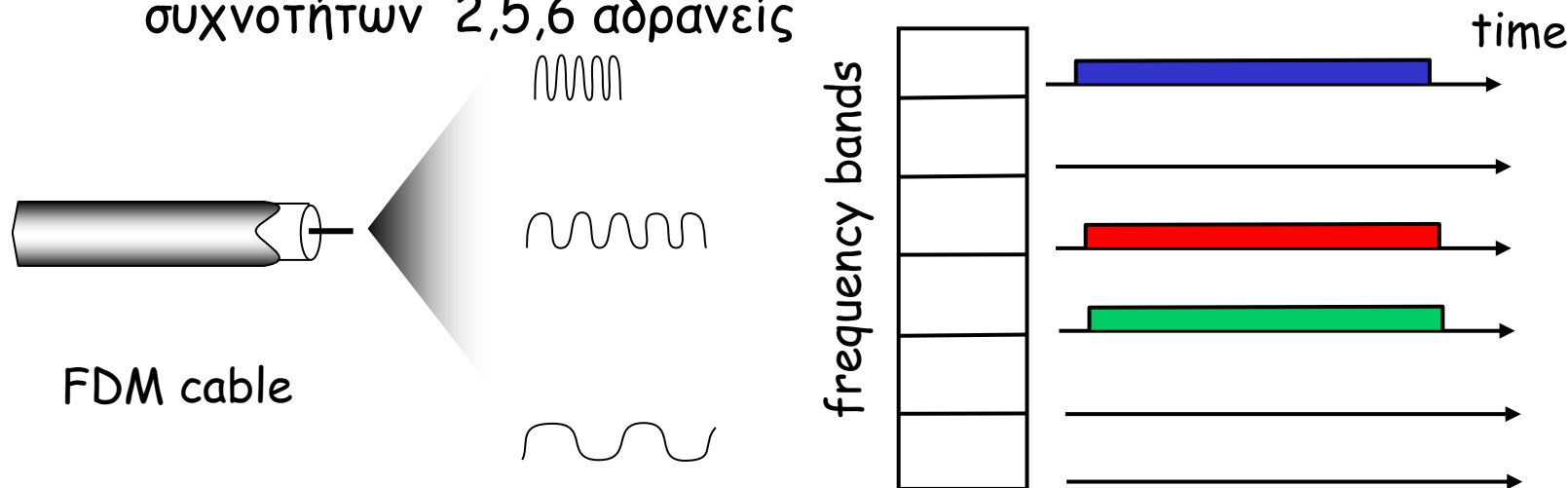
- ❑ πρόσβαση στο κανάλι σε "γύρους"
- ❑ κάθε σταθμός παίρνει θυρίδα σταθερού μήκους (μήκος = χρόνος μετάδοσης πακέτου) σε κάθε γύρο
- ❑ Θυρίδες που δεν χρησιμοποιούνται παραμένουν αδρανείς
- ❑ παράδειγμα: 6 σταθμοί LAN, 1,3,4 έχουν πακέτα, θυρίδες 2,5,6 ανενεργές



Πρωτόκολλα MAC κατάτμησης καναλιού: FDMA

FDMA: πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (frequency division multiple access)

- το φάσμα του καναλιού διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων
- σε κάθε σταθμό εκχωρείται μια σταθερή ζώνη συχνοτήτων
- ο χρόνος μετάδοσης που δεν χρησιμοποιείται στις ζώνες συχνοτήτων παραμένει αδρανής
- παράδειγμα: 6 σταθμοί LAN, 1,3,4 έχουν πακέτα, οι ζώνες συχνοτήτων 2,5,6 αδρανείς



Πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης

- ❑ Όταν ο κόμβος έχει πακέτο προς αποστολή
 - μεταδίδει με τον πλήρη ρυθμό του καναλιού R .
 - χωρίς *a priori* συντονισμό μεταξύ των κόμβων
- ❑ Δύο ή περισσότεροι κόμβοι που μεταδίδουν → “σύγκρουση”
- ❑ το πρωτόκολλο **MAC τυχαίας πρόσβασης** καθορίζει:
 - πώς να ανιχνεύονται οι συγκρούσεις
 - πώς να γίνεται η ανάνηψη από συγκρούσεις (π.χ., μέσω καθυστερημένων αναμεταδόσεων)
- ❑ Παραδείγματα πρωτοκόλλων **MAC τυχαίας πρόσβασης**:
 - Θυριδωτό ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Θυριδωτό ALOHA (Slotted ALOHA)

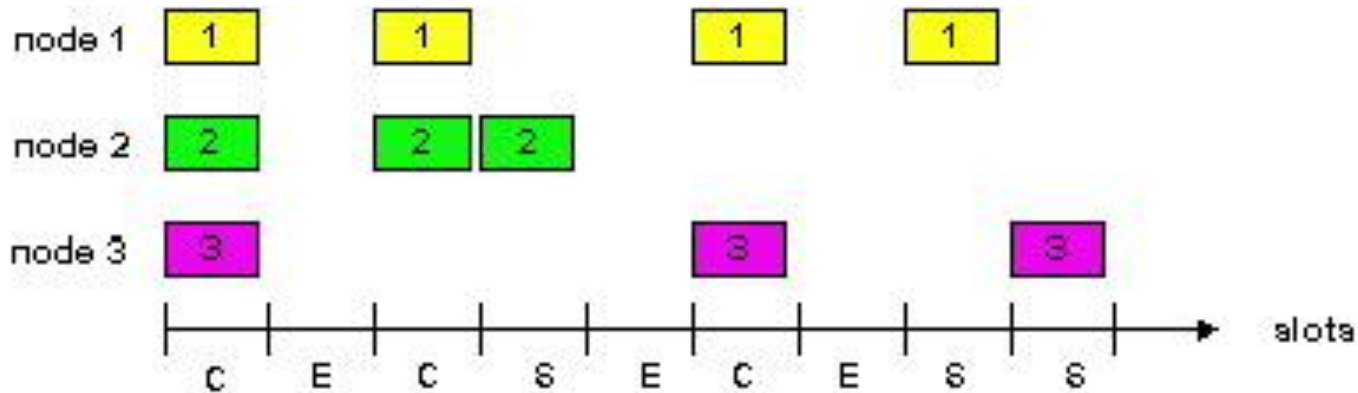
Υποθέσεις:

- ❑ όλα τα πλαίσια έχουν το ίδιο μέγεθος
- ❑ ο χρόνος διαιρείται σε ίσου μεγέθους θυρίδες (χρόνος μετάδοσης 1 πλαισίου)
- ❑ οι κόμβοι ξεκινούν να μεταδίδουν πλαίσια μόνο στην αρχή των θυρίδων
- ❑ οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι
- ❑ αν 2 ή περισσότεροι κόμβοι μεταδώσουν σε μια θυρίδα, όλοι οι κόμβοι ανιχνεύουν τη σύγκρουση

Λειτουργία:

- ❑ όταν ο κόμβος έχει νέο πλαίσιο το μεταδίδει στην επόμενη θυρίδα
 - αν όχι σύγκρουση: ο κόμβος μπορεί να στείλει νέο πλαίσιο στην επόμενη θυρίδα
 - αν σύγκρουση: ο κόμβος αναμεταδίδει το πλαίσιο σε κάθε επόμενη θυρίδα με πιθανότητα p μέχρι την επιτυχία

Θυριδωτό ALOHA



Πλεονεκτήματα

- αν μόνο ένας κόμβος είναι ενεργός μπορεί να μεταδίδει διαρκώς στον πλήρη ρυθμό του καναλιού
- σε μεγάλο βαθμό αποκεντρωμένο: μόνο οι θυρίδες στους κόμβους χρειάζεται να είναι συγχρονισμένες
- απλό

Μειονεκτήματα

- συγκρούσεις, χάνονται θυρίδες
- αδρανείς θυρίδες
- οι κόμβοι ενδέχεται να μπορούν να ανιχνεύσουν σύγκρουση σε λιγότερο από το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου
- συγχρονισμός ρολογιού

Αποδοτικότητα του Θυριδωτού Aloha

Αποδοτικότητα : ποσοστό επιτυχημένων θυρίδων σε βάθος χρόνου (πολλοί κόμβοι, όλοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή)

- **Υπόθεση**: N κόμβοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή, ο καθένας μεταδίδει σε μια θυρίδα με πιθανότητα p
- πιθανότητα ένας συγκεκριμένος κόμβος να επιτύχει σε μια θυρίδα $= p(1-p)^{N-1}$
- πιθανότητα κάποιος κόμβος να επιτύχει $= Np(1-p)^{N-1}$

- **Μέγιστη αποδοτικότητα**: βρες το p^* που μεγιστοποιεί το $Np(1-p)^{N-1}$
- Για πολλούς κόμβους, το όριο του $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ καθώς το N πάει στο άπειρο, δίνει **μέγιστη αποδοτικότητα** $= 1/e = 0.37$

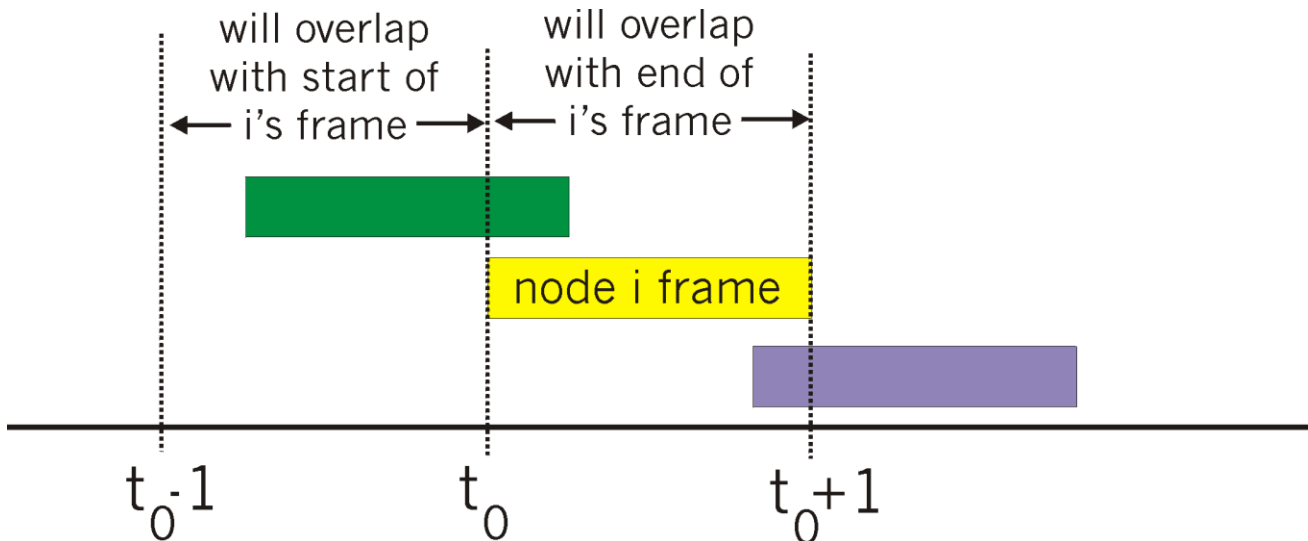
Στην καλύτερη περίπτωση:

το κανάλι χρησιμοποιείται για ωφέλιμες μεταδόσεις το 37% του χρόνου!



Απλό (χωρίς θυρίδες) ALOHA

- ❑ ALOHA χωρίς θυρίδες: απλούστερο, χωρίς συγχρονισμό
- ❑ όταν το πλαίσιο φτάνει για πρώτη φορά
 - μετάδωσε αμέσως
- ❑ η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνει:
 - το πλαίσιο που στέλνεται στο t_0 συγκρούεται με άλλα πλαίσια που στέλνονται στο $[t_0-1, t_0+1]$



Αποδοτικότητα του απλού Aloha

$$\begin{aligned} P(\text{επιτυχία από συγκεκριμένο κόμβο}) &= P(\text{ο κόμβος μεταδίδει}) * \\ &\quad P(\text{κανένας άλλος κόμβος δεν μεταδίδει στο } [t_0-1, t_0]) * \\ &\quad P(\text{κανένας άλλος κόμβος δεν μεταδίδει στο } [t_0, t_0+1]) \\ &= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\ &= p \cdot (1-p)^{2(N-1)} \end{aligned}$$

... διαλέγοντας το βέλτιστο p και αφήνοντας $N \rightarrow \infty$...

$$= 1/(2e) = 0.18$$

Ακόμα χειρότερα από το θυριδωτό!

Πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος (CSMA - Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: άκου πριν μεταδώσεις:

- Αν το κανάλι ανιχνευτεί ανενεργό, μετάδωσε ολόκληρο το πλαίσιο

Αν το κανάλι ανιχνευτεί απασχολημένο, ανάβαλε τη μετάδοση

- Ανθρώπινη αναλογία: μη διακόπτεις τους άλλους!

Συγκρούσεις στο CSMA

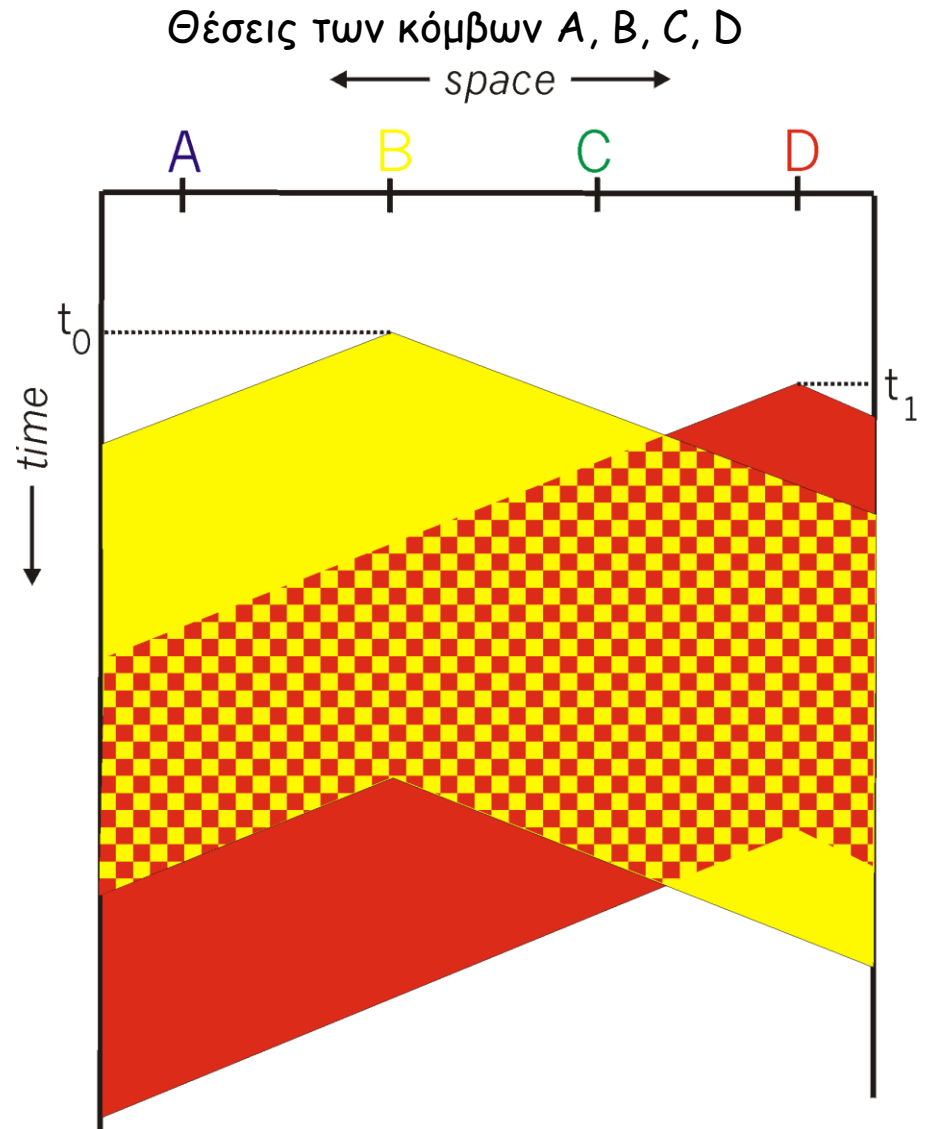
και πάλι μπορεί να εμφανιστούν
συγκρούσεις:

λόγω της καθυστέρησης διάδοσης,
δύο κόμβοι μπορεί να μην άκουσαν ο
ένας τη μετάδοση του άλλου

σύγκρουση:

χάνεται ολόκληρος ο χρόνος
μετάδοσης του πακέτου

- είναι εμφανής ο ρόλος της απόστασης και της καθυστέρησης διάδοσης στον καθορισμό της πιθανότητας σύγκρουσης



CSMA/CD (Ανίχνευση Σύγκρουσης)

CSMA/CD: ανίχνευση φέροντος, αναβολή μετάδοσης (όπως στο CSMA)

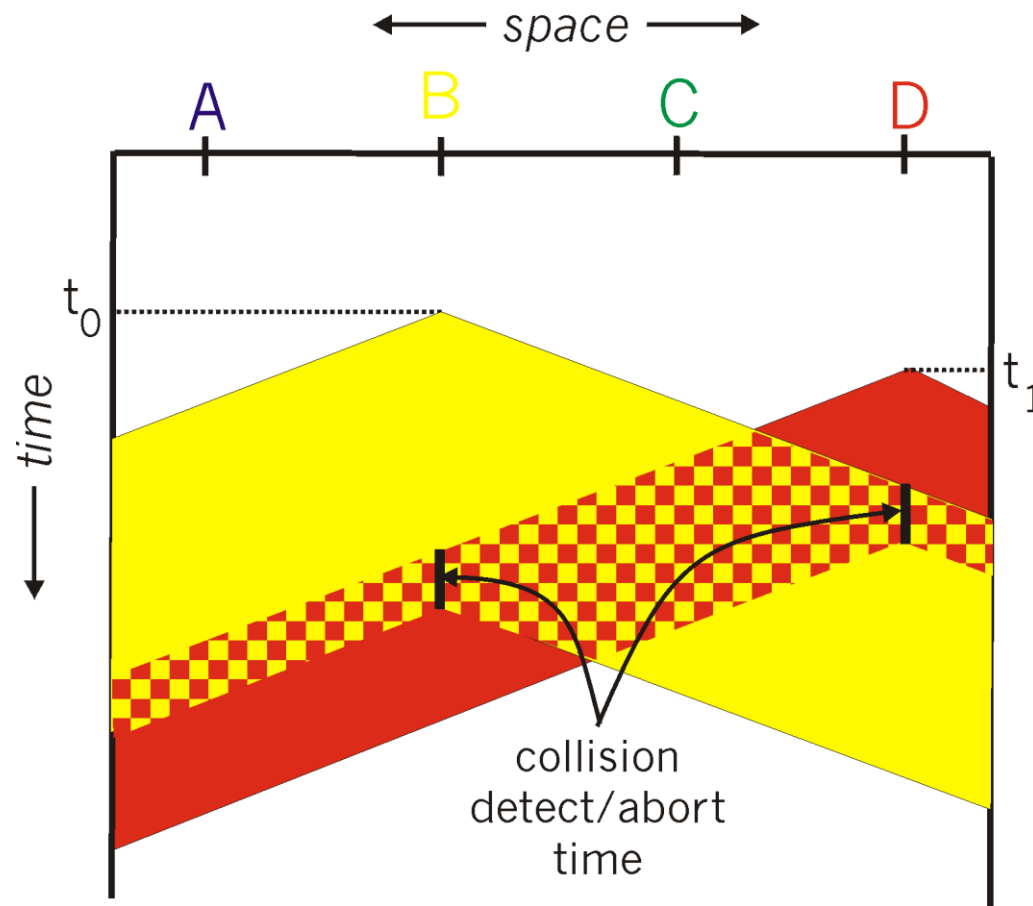
- οι συγκρούσεις ανιχνεύονται γρήγορα
- οι μεταδόσεις που συγκρούονται διακόπτονται, μειώνοντας το χαμένο χρόνο του καναλιού

□ ανίχνευση σύγκρουσης:

- εύκολη στα ενσύρματα LANs: μέτρηση ισχύος σήματος, σύγκριση μεταδιδόμενων, λαμβανόμενων σημάτων
- δύσκολη στα ασύρματα LANs: η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος «καλύπτεται» από την ισχύ της τοπικής μετάδοσης

□ ανθρώπινη αναλογία: ο ευγενικός συνομιλητής

CSMA/CD ανίχνευση σύγκρουσης



Ethernet CSMA/CD αλγόριθμος

1. Η κάρτα διεπαφής δικτύου (Network Interface Card - NIC) λαμβάνει το datagram από το επίπεδο δικτύου και δημιουργεί το πλαίσιο (frame)
2. Αν η NIC αισθανθεί το κανάλι αδρανές, αρχίζει τη μετάδοση του πλαισίου. Αν το αισθανθεί κατειλημμένο, περιμένει μέχρι να γίνει αδρανές και τότε μεταδίδει
3. Αν η NIC μεταδώσει όλο το πλαίσιο χωρίς να εντοπίσει άλλη μετάδοση, τότε έχει τελειώσει με το πλαίσιο!
4. Αν η NIC εντοπίσει άλλη μετάδοση ενώ μεταδίδει, διακόπτει και στέλνει ένα **jam** σήμα
5. Αφού διακόψει, η NIC εισάγει **δυναδική (εκθετική) οπισθοχώρηση:**
 - μετά τη m -οστή σύγκρουση, η NIC επιλέγει ένα **τυχαίο K** στο διάστημα $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$. Περιμένει για $K * 512$ bit χρόνους και επιστρέφει στο Βήμα 2
 - μεγαλύτερο διάστημα οπισθοχώρησης με περισσότερες συγκρούσεις

Ρυθμαπόδοση CSMA/CD

- t_{prop} = μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ 2 κόμβων στο LAN
- t_{trans} = χρόνος για τη μετάδοση του πλαισίου μέγιστου μεγέθους

$$\text{ρυθμαπόδοση} = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

- ρυθμαπόδοση πάει στο 1
 - όσο το t_{prop} πάει στο 0
 - όσο το t_{trans} πάει στο άπειρο
- καλύτερη απόδοση από το ALOHA: και απλό, φθηνό, αποκεντρωμένο!

Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Πρωτόκολλα MAC με διαμέριση του καναλιού:

- μοιράζουν το κανάλι αποτελεσματικά και δίκαια σε υψηλό φορτίο
- αναποτελεσματικά σε χαμηλό φορτίο: καθυστέρηση στην πρόσβαση στο κανάλι, εκχώρηση $1/N$ -οστού του εύρους ζώνης ακόμη και αν ένας μόνο ενεργός κόμβος!

Πρωτόκολλα MAC τυχαίας πρόσβασης

- αποτελεσματικά για χαμηλό φορτίο: ένας κόμβος μόνος του μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως το κανάλι
- υψηλό φορτίο: overhead συγκρούσεων

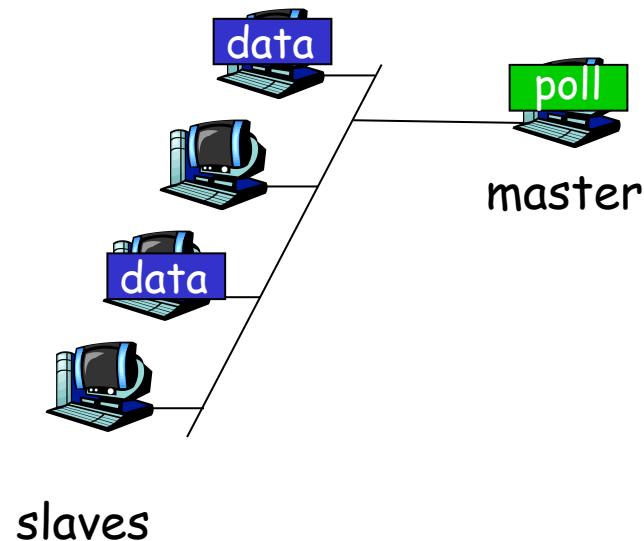
Πρωτόκολλα λειτουργίας εκ περιτροπής

αναζητώντας τα καλύτερα από τους δυο κόσμους!

Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Σταθμοσκόπηση:

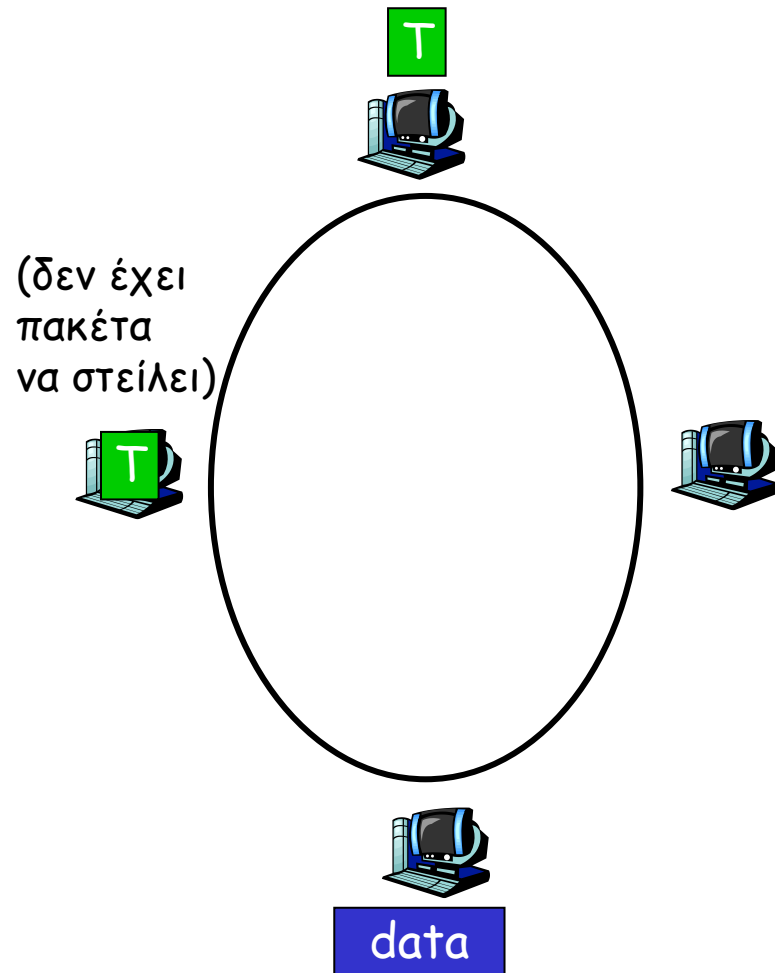
- ❑ ο master κόμβος "προσκαλεί" τους κόμβους slaves να μεταδώσουν με τη σειρά
- ❑ συνήθως χρησιμοποιείται με "χαζές" slave συσκευές
- ❑ προβληματισμοί:
 - overhead σταθμοσκόπησης
 - καθυστέρηση
 - μοναδικό σημείο αποτυχίας (master)



Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

Μεταβίβασης σκυτάλης:

- ❑ σκυτάλη (**token**) ελέγχου που μεταβιβάζεται από τον έναν κόμβο στον επόμενο σειριακά
- ❑ πλαίσιο σκυτάλης
- ❑ προβληματισμοί:
 - overhead σκυτάλης
 - καθυστέρηση
 - μοναδικό σημείο αποτυχίας (σκυτάλη)



Επίπεδο ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας web αίτησης

Διευθύνσεις MAC και ARP

□ Διευθύνσεις IP 32-bit:

- διεύθυνση επιπέδου δικτύου για τη διεπαφή
- χρησιμοποιείται για προώθηση επιπέδου 3 (επίπεδο δικτύου)

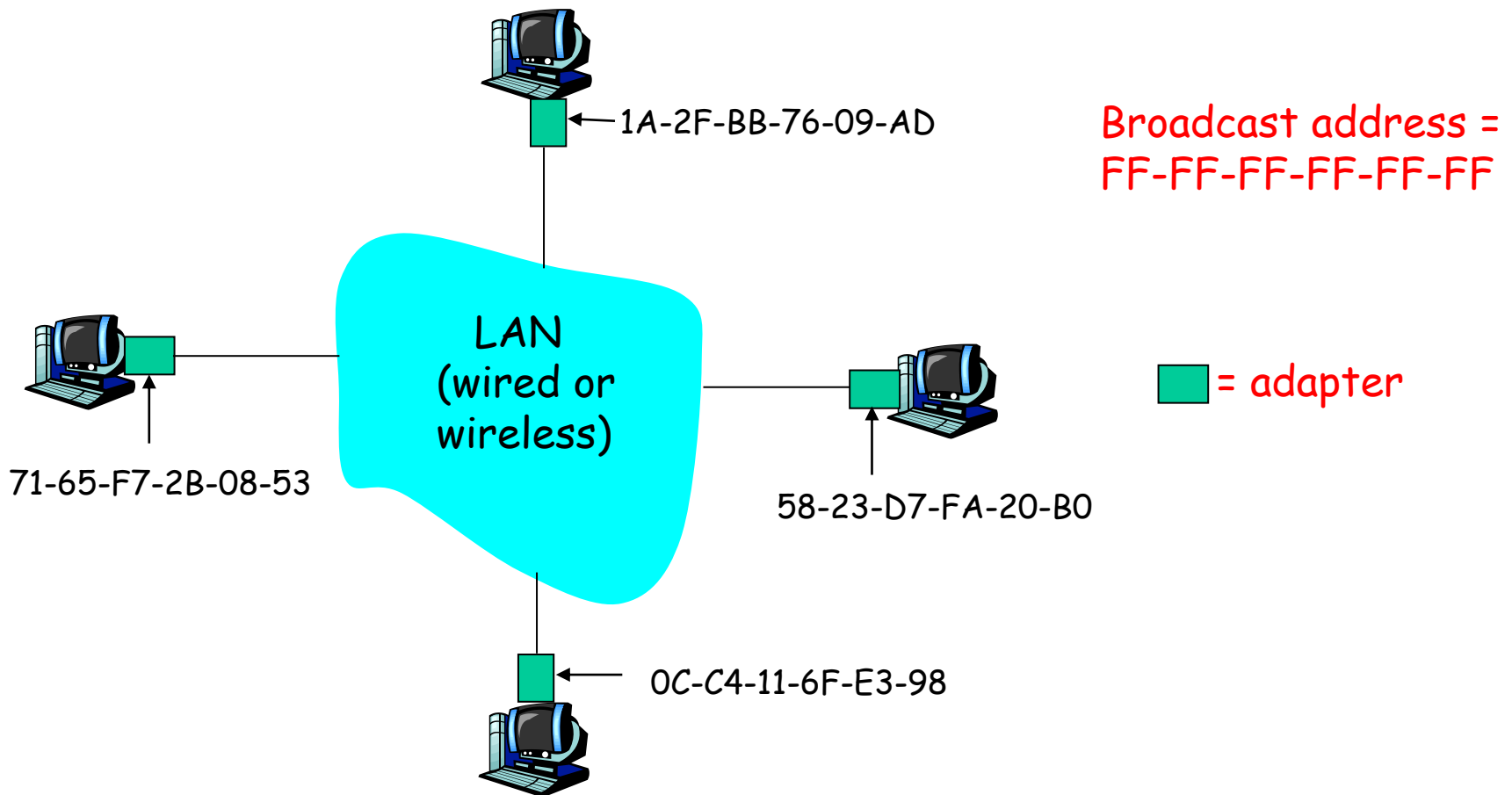
□ Διεύθυνση MAC (ή LAN ή φυσική ή Ethernet) :

- Λειτουργία: **χρησιμοποιείται "τοπικά" για να πάει το πλαίσιο από τη μια διεπαφή σε μια άλλη φυσικά συνδεδεμένη διεπαφή (ίδιο δίκτυο, υπό την έννοια της IP διευθυνσιοδότησης)**
- 48 bit διεύθυνση MAC (για τα περισσότερα LANs) αποθηκευμένη στη ROM του προσαρμογέα (NIC ROM)
- π.χ.: 1A-2F-BB-76-09-AD

δεκαεξαδικός (βάση 16) συμβολισμός
(κάθε "νούμερο" αντιπροσωπεύει 4 bits)

Διευθύνσεις LAN

Κάθε προσαρμογέας (adapter) του LAN έχει μοναδική διεύθυνση **LAN**



LAN διευθύνσεις (συν.)

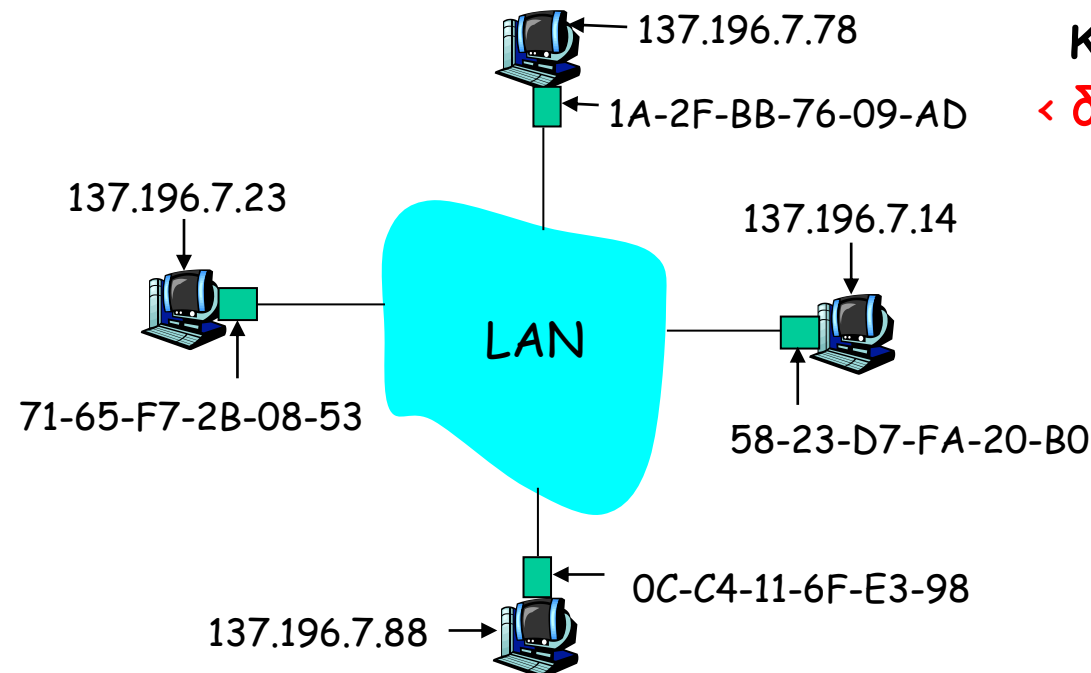
- ❑ το ΙΕΕΕ διαχειρίζεται την εκχώρηση MAC διευθύνσεων
- ❑ ένας κατασκευαστής αγοράζει τμήμα του χώρου των MAC διευθύνσεων (για να διασφαλιστεί μοναδικότητα)
- ❑ Αναλογία:
 - (α) διεύθυνση MAC: όπως ο αριθμός κοινωνικής ασφάλισης
 - (b) διεύθυνση IP: όπως η ταχυδρομική διεύθυνση
- ❑ επίπεδη διεύθυνση MAC → φορητότητα
 - μπορεί να μετακινηθεί η κάρτα LAN από το ένα LAN στο άλλο
- ❑ η ιεραρχική IP διεύθυνση δεν είναι φορητή
 - εξαρτάται από το δίκτυο IP στον οποίο ο κόμβος είναι συνδεδεμένος

ARP: Address Resolution Protocol

(Πρωτόκολλο διεύθυνσης διευθύνσεων)

Ερώτηση: πώς να βρούμε τη MAC διεύθυνση μιας διεπαφής γνωρίζοντας την IP διεύθυνση της;

- Κάθε IP κόμβος (υπολογιστής, δρομολογητής) στο LAN έχει **πίνακα ARP**
- πίνακας ARP: αντιστοίχιση διευθύνσεων IP/MAC για κάποιους κόμβους του LAN
 - < **διεύθυνση IP, διεύθυνση MAC, TTL** >
 - TTL (Time To Live - διάρκεια ζωής): χρόνος μετά τον οποίο η αντιστοίχιση διευθύνσεων θα έχει «ξεχαστεί» (τυπικά 20 λεπτά)



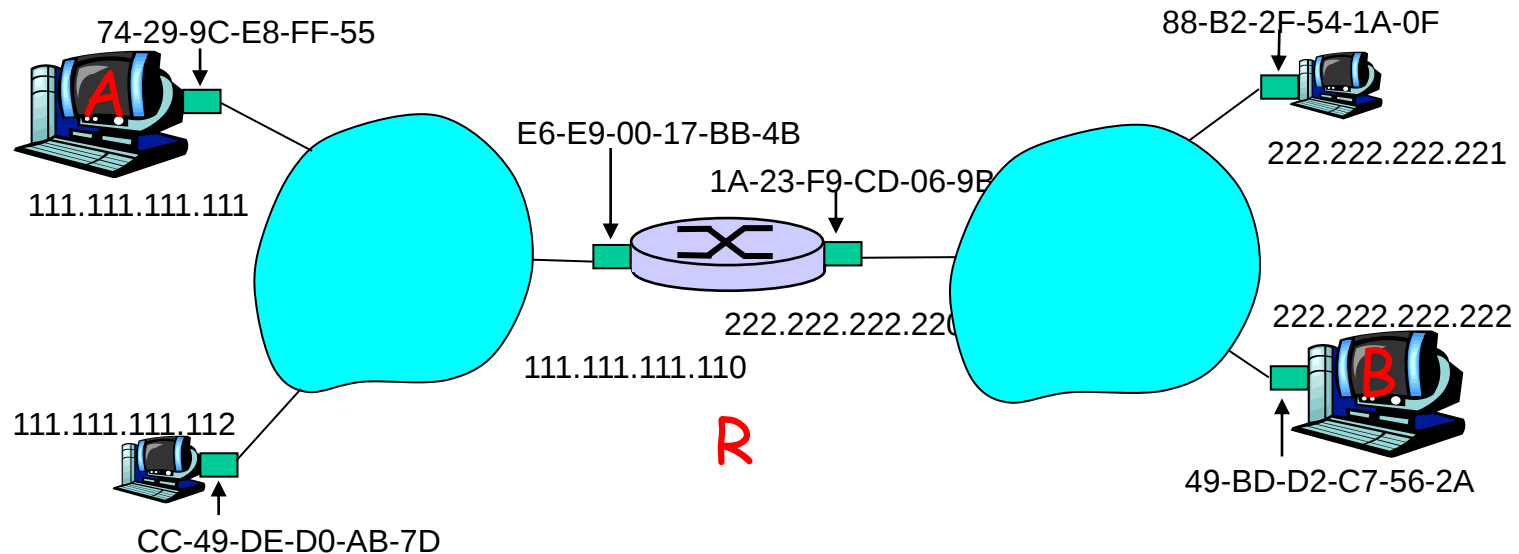
Πρωτόκολλο ARP: ίδιο LAN (δίκτυο)

- ❑ Ο Α θέλει να στείλει datagram στον Β
 - η διεύθυνση MAC του Β δεν είναι στον πίνακα ARP του Α.
- ❑ Ο Α **ευρυεκπέμπει** πακέτο ARP ερωτήματος, που περιέχει τη διεύθυνση IP του Β
 - dest MAC address = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Όλοι οι κόμβοι στο LAN λαμβάνουν το ερώτημα ARP
- ❑ Ο Β λαμβάνει το πακέτο ARP, απαντά στον Α με τη δική του (του Β) διεύθυνση MAC
 - Το πλαίσιο στέλνεται στη διεύθυνση MAC του Α (unicast)
- ❑ Ο Α αποθηκεύει (caches) το ζεύγος διευθύνσεων IP-σε-MAC στον πίνακα ARP μέχρι η πληροφορία να παλιώσει (λήξη χρόνου)
 - soft state: η πληροφορία διαγράφεται (όταν υπάρχει λήξη χρόνου) εκτός αν ανανεωθεί
- ❑ Το ARP είναι "plug-and-play":
 - Οι κόμβοι δημιουργούν τους πίνακες ARP τους χωρίς την παρέμβαση του διαχειριστή του δικτύου

Διευθυνσιοδότηση: δρομολόγηση σε άλλο LAN

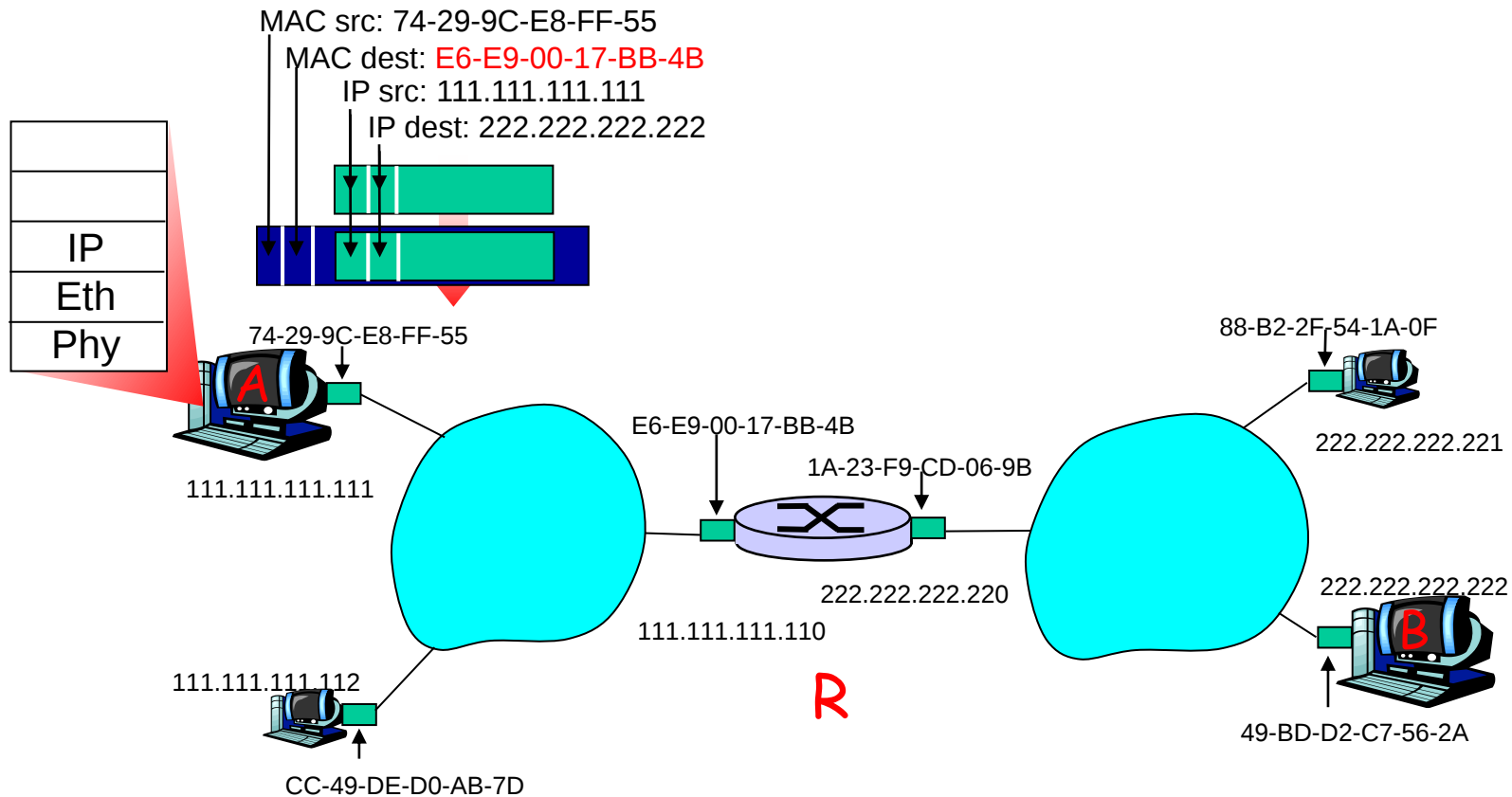
Διέλευση: **στείλε το datagram από τον A στο B μέσω του R**

- εστίασε στη διευθυνσιοδότηση - στο IP (datagram) και MAC επίπεδο (frame - πλαίσιο)
- υποθέτοντας πως ο A γνωρίζει τη διεύθυνση IP του B
- υποθέτοντας πως ο A γνωρίζει την IP διεύθυνση του δρομολογητή πρώτου άλματος, R (πώς;)
- υποθέτοντας πως ο A γνωρίζει τη MAC διεύθυνση του R (πώς;)



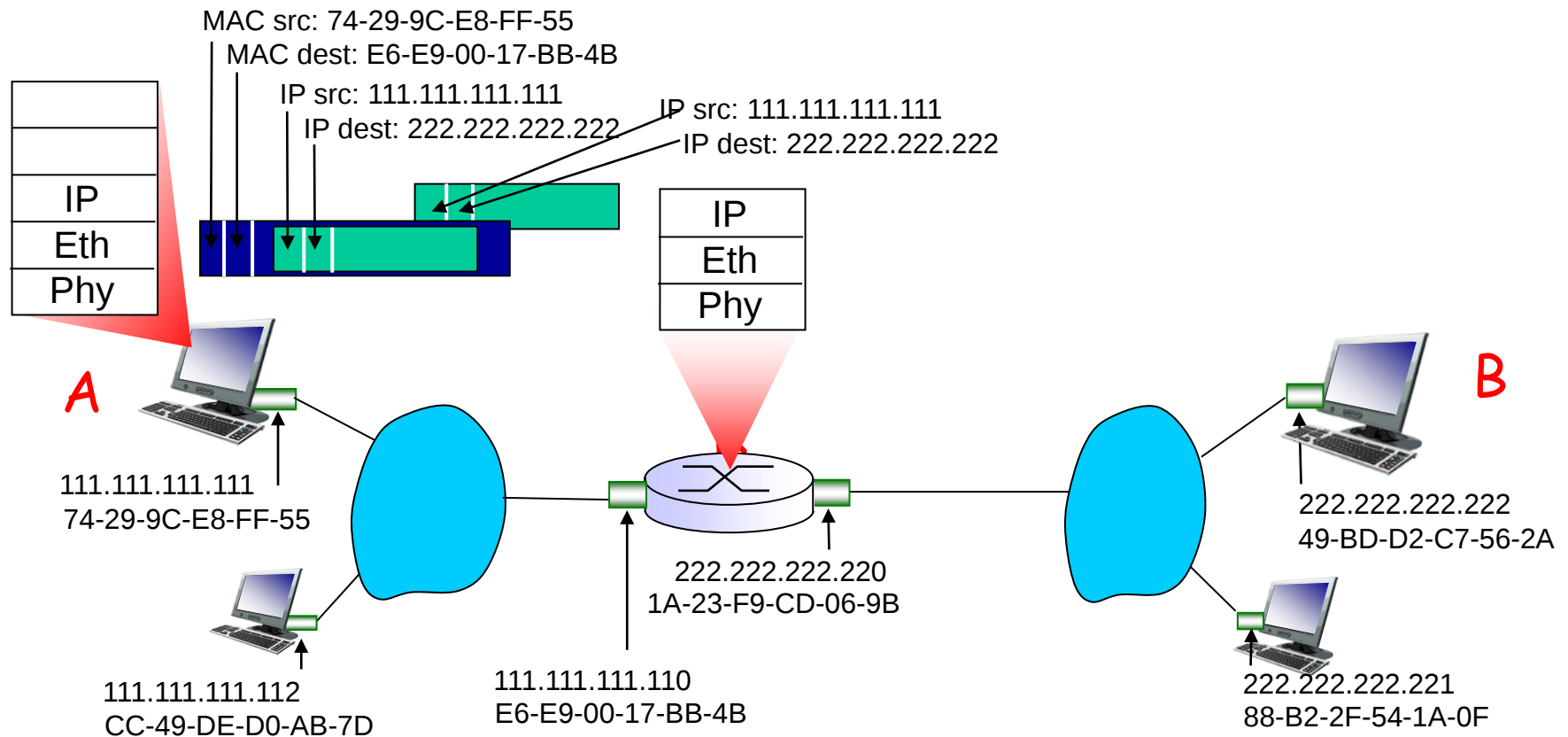
Διευθυνσιοδότηση: δρομολόγηση σε άλλο LAN

- ❑ Ο Α δημιουργεί datagram με πηγή Α, και προορισμό Β
- ❑ Ο Α δημιουργεί πλαίσιο επιπέδου ζεύξης με τη διεύθυνση MAC του R σαν προορισμό, το πλαίσιο περιέχει το IP datagram από Α προς Β



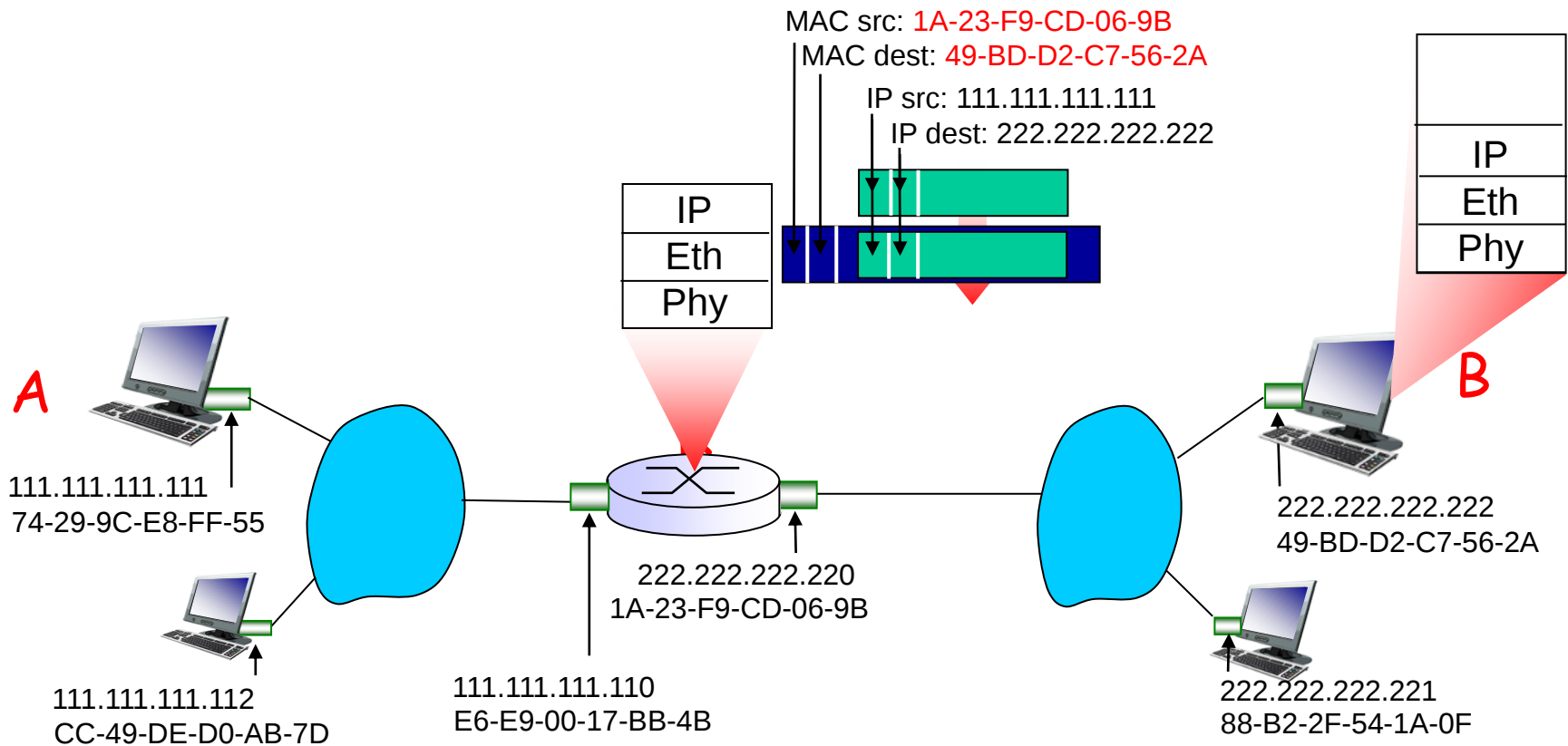
Διευθυνσιοδότηση: δρομολόγηση σε άλλο LAN

- το πλαίσιο στέλνεται από το A στον R
- το πλαίσιο λαμβάνεται στον R, αφαιρείται το datagram, διαβιβάζεται στο IP



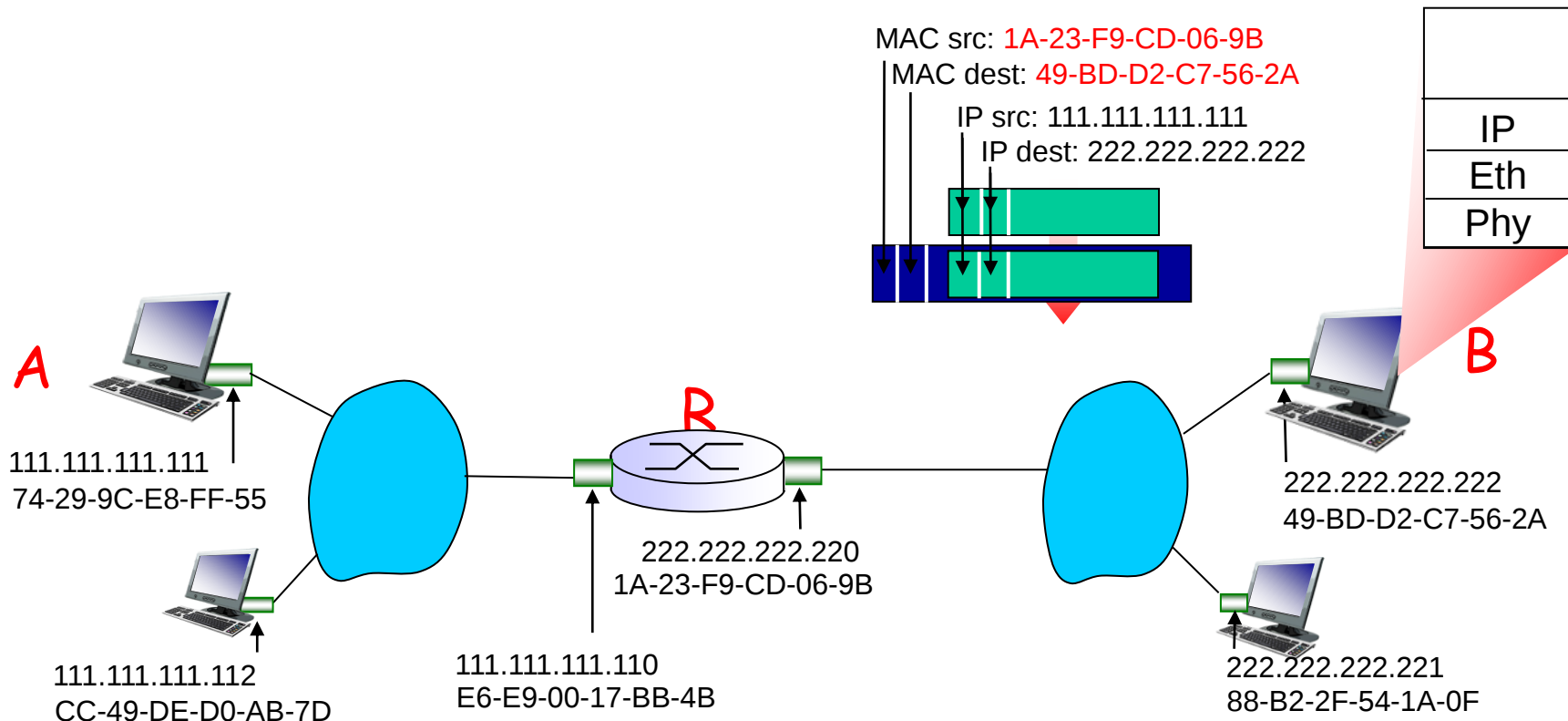
Διευθυνσιοδότηση: δρομολόγηση σε άλλο LAN

- Ο R προωθεί το datagram με IP πηγή A, προορισμό B
- Ο R δημιουργεί πλαίσιο επιπέδου ζεύξης με τη MAC διεύθυνση του B ως προορισμό, το πλαίσιο περιέχει το IP datagram από το A προς το B



Διευθυνσιοδότηση: δρομολόγηση σε άλλο LAN

- Ο R προωθεί το datagram με IP πηγή A, προορισμό B
- Ο R δημιουργεί πλαίσιο επιπέδου ζεύξης με τη MAC διεύθυνση του B ως προορισμό, το πλαίσιο περιέχει το IP datagram από το A προς το B



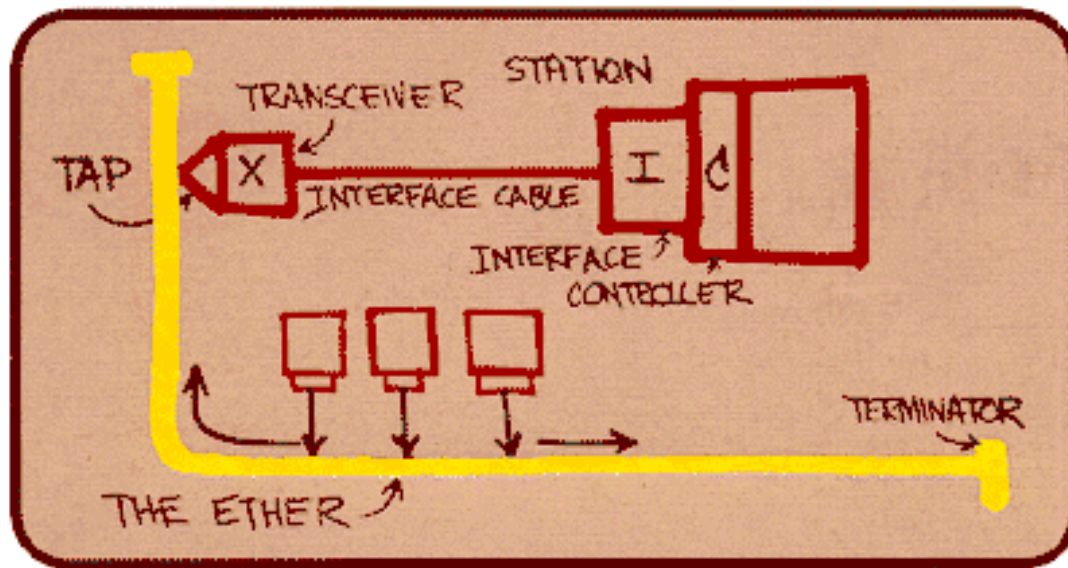
Επίπεδο ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας αίτησης web

Ethernet

“κυρίαρχη” τεχνολογία ενσύρματων LAN :

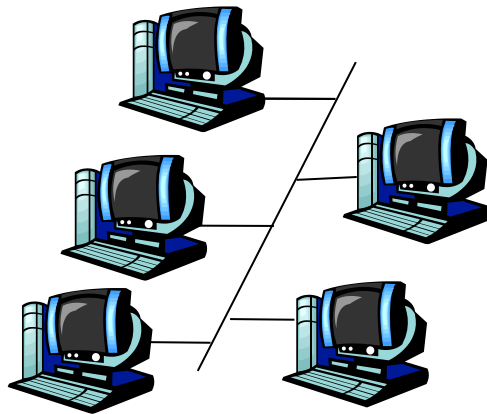
- ❑ Φθηνή (\$10 για NIC)
- ❑ Πρώτη ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία LAN
- ❑ Απλούστερο, φθηνότερο από LANs σκυτάλης και ATM
- ❑ Άντεξε την κούρσα των ταχυτήτων: 10 Mbps - 10 Gbps



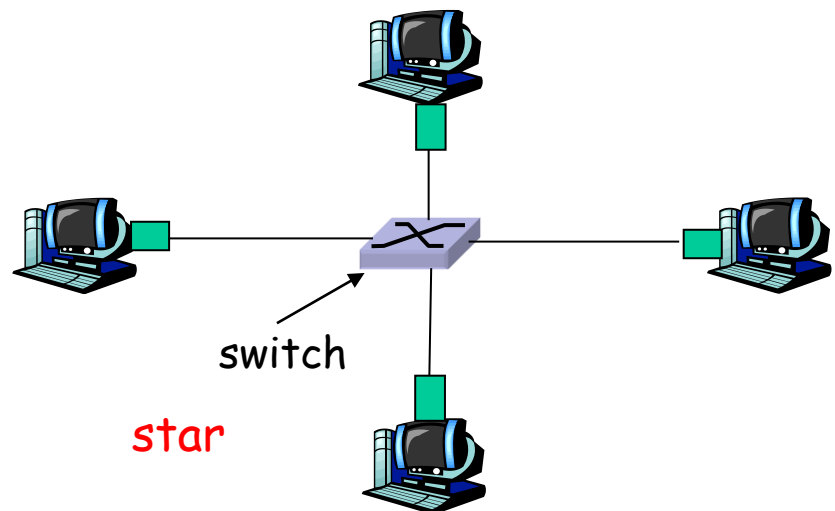
Σκαρίφημα του
Ethernet του Metcalfe

Ethernet: φυσική τοπολογία

- ❑ **Τοπολογία διαύλου:** ήταν δημοφιλής μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 90
 - Όλοι οι κόμβοι στο ίδιο πεδίο συγκρούσεων (collision domain) (μπορεί να συγκρουστούν μεταξύ τους)
- ❑ **Τοπολογία αστέρα:** επικρατεί σήμερα
 - ενεργός **μεταγωγέας (switch)** στο κέντρο
 - Κάθε "ακτίνα" τρέχει ένα (ξεχωριστό) πρωτόκολλο Ethernet (οι κόμβοι δεν συγκρούονται μεταξύ τους)

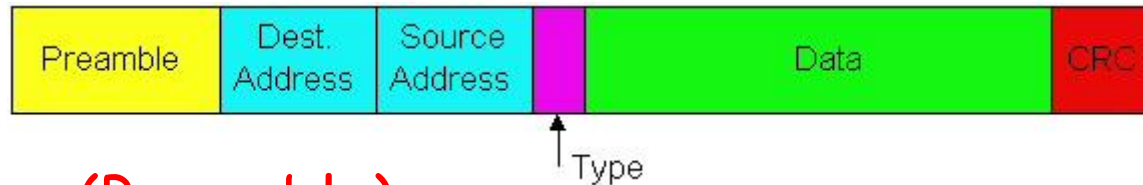


bus: coaxial cable



Δομή του πλαισίου Ethernet

Ο προσαρμογέας αποστολής ενθυλακώνει το IP datagram (ή άλλο πακέτο πρωτοκόλλου επιπέδου δικτύου) σε **πλαίσιο Ethernet**

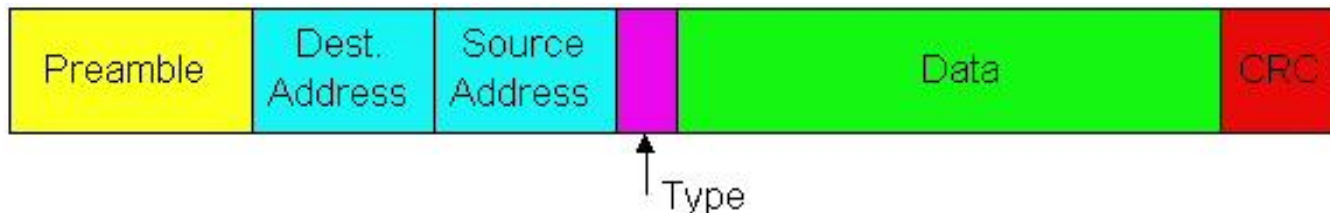


Πρόθεμα (Preamble):

- ❑ 7 bytes με μοτίβο 10101010 ακολουθούμενα από ένα byte με μοτίβο 10101011
- ❑ Χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των ρυθμών ρολογιού του δέκτη και του πομπού

Δομή πλαισίου Ethernet (περισσότερα)

- **Διευθύνσεις:** 6 bytes MAC διευθύνσεις πηγής, προορισμού
 - Αν ο προσαρμογέας λάβει πλαίσιο με διεύθυνση προορισμού που ταιριάζει με τη δική του ή με τη broadcast διεύθυνση (π.χ. πακέτο ARP), μεταβιβάζει τα δεδομένα του πλαισίου στο πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου
 - διαφορετικά, ο προσαρμογέας απορρίπτει το πλαίσιο
- **Τύπος:** δείχνει το υψηλότερου επιπέδου πρωτόκολλο, κυρίως IP, άλλα υποστηρίζονται και άλλα (όπως Novell IPX και AppleTalk)
- **CRC:** κυκλικός έλεγχος πλεονασμού στο δεκτή
 - αν ανιχνευτεί λάθος το πλαίσιο απορρίπτεται



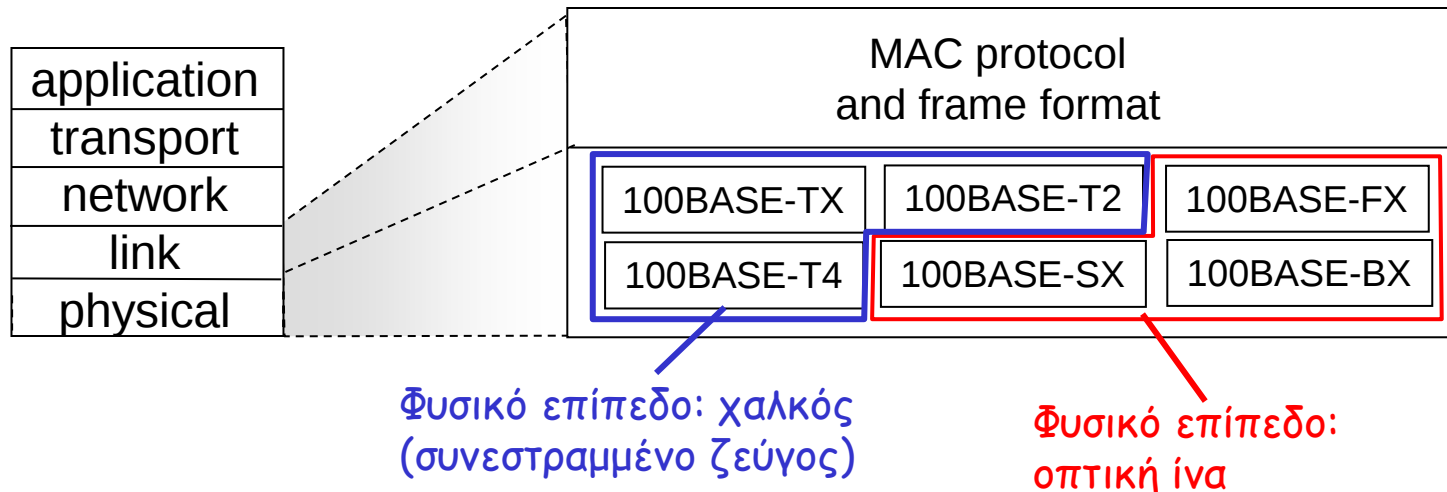
Ethernet: Αναξιόπιστη, ασυνδεσμική υπηρεσία

- ❑ **Ασυνδεσμική (connectionless)** : χωρίς χειραψία μεταξύ των προσαρμογέων αποστολής και λήψης.
- ❑ **Αναξιόπιστη**: ο προσαρμογέας λήψης δε στέλνει επιβεβαιώσεις (acks) ή αρνητικές επιβεβαιώσεις (nacks) στον αποστέλλοντα προσαρμογέα
 - τα δεδομένα των πλαισίων που απορρίφθηκαν ανακτώνται μόνο αν ο αρχικός αποστολέας χρησιμοποιήσει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε υψηλότερο επίπεδο (π.χ. TCP), αλλιώς χάνονται
- ❑ Πρωτόκολλο MAC του Ethernet: μη θυριδωτό **CSMA/CD** με δυαδική οπισθοχώρηση

Πρότυπα Ethernet 802.3: επίπεδο ζεύξης και φυσικό επίπεδο

❑ **πολλά** διαφορετικά πρότυπα Ethernet

- κοινό πρωτόκολλο MAC και μορφή πλαισίου
- διαφορετικές ταχύτητες: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10Gbps
- διαφορετικά μέσα φυσικού επιπέδου: ίνα, καλώδιο



Επίπεδο Ζεύξης

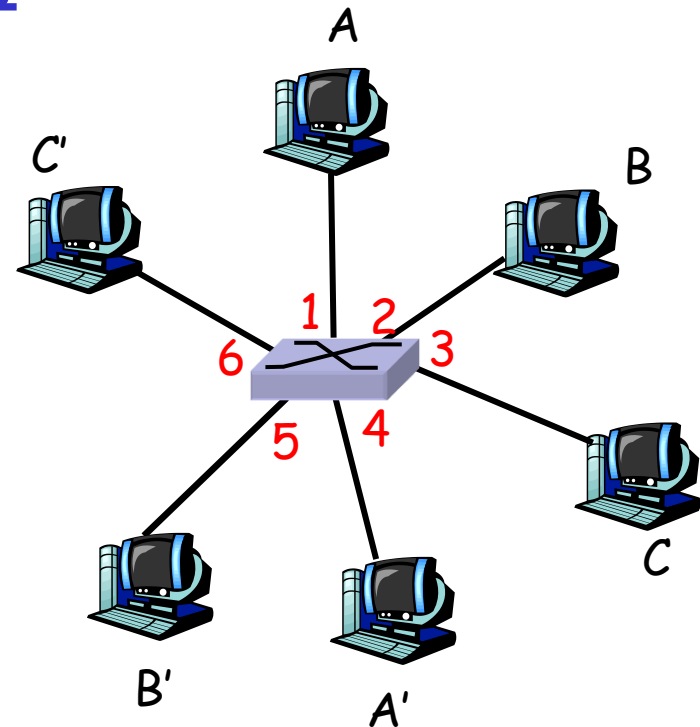
- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας web αίτησης

Μεταγωγέας Ethernet

- **Συσκευή επιπέδου ζεύξης: αναλαμβάνει ενεργό ρόλο**
 - αποθηκεύει, προωθεί πλαίσια Ethernet
 - εξετάζει τη διεύθυνση MAC των εισερχόμενων πλαισίων, **επιλεκτικά** προωθεί πλαίσια σε μία ή περισσότερες εξερχόμενες ζεύξεις όταν το πλαίσιο πρέπει να προωθηθεί, χρησιμοποιεί CSMA/CD για πρόσβαση
- **διαφανής**
 - οι υπολογιστές δε γνωρίζουν την παρουσία του μεταγωγέα
- **plug-and-play, μαθαίνει από μόνος του**
 - ο μεταγωγέας δε χρειάζεται να διαμορφωθεί

Μεταγωγέας: επιτρέπει πολλαπλές ταυτόχρονες μεταδόσεις

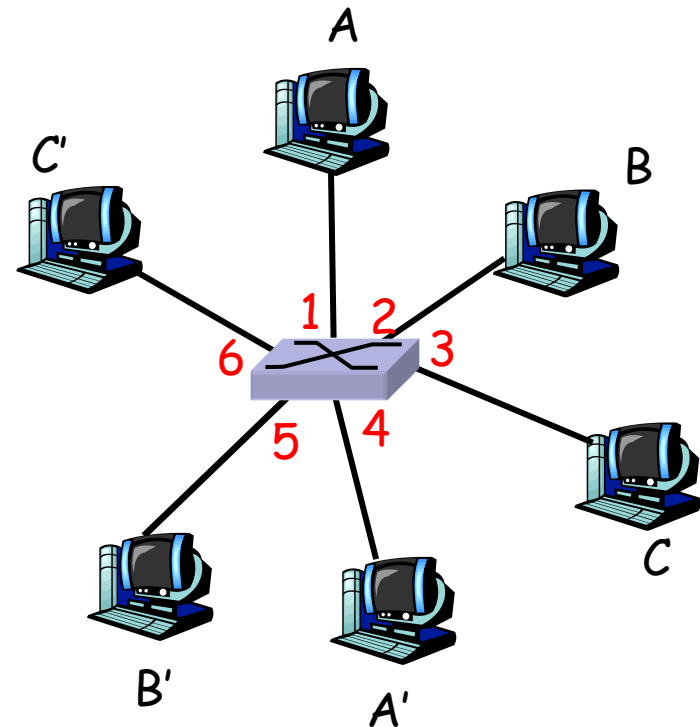
- ❑ Οι υπολογιστές έχουν αποκλειστικές, απευθείας συνδέσεις με τον μεταγωγέα
- ❑ Οι μεταγωγείς ενταμιεύουν πακέτα
- ❑ Το πρωτόκολλο Ethernet χρησιμοποιείται σε κάθε εισερχόμενη ζεύξη (σε αμφίδρομη λειτουργία, δεν υπάρχουν συγκρούσεις)
 - Κάθε ζεύξη είναι από μόνη της collision domain
- ❑ **Μεταγωγή:** Α-προς-Α' και Β-προς-Β' ταυτόχρονα, χωρίς συγκρούσεις



Μεταγωγέας με έξι διεπαφές
(1,2,3,4,5,6)

Πίνακας Προώθησης Μεταγωγέα

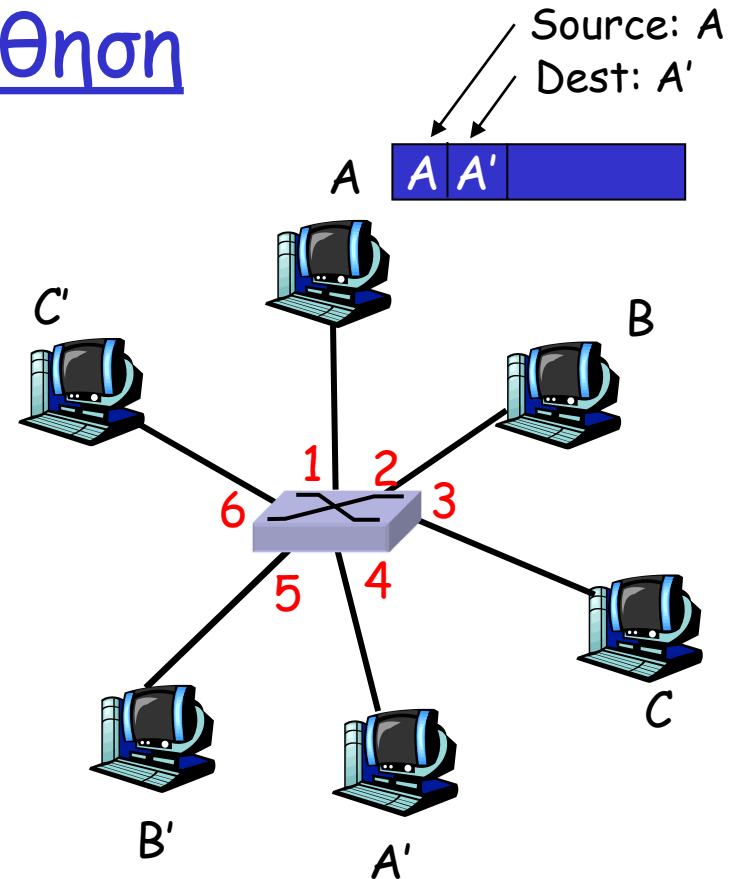
- ❑ **E:** πώς γνωρίζει ο μεταγωγέας ότι ο A' είναι προσβάσιμος μέσω της διεπαφής 4, ο B' είναι προσβάσιμος μέσω της διεπαφής 5;
- ❑ **A:** κάθε μεταγωγέας έχει ένα **πίνακα μεταγωγής (switch table)**, κάθε καταχώριση:
 - (διεύθυνση MAC του υπολογιστή, διεπαφή για πρόσβαση στον υπολογιστή, χρονοσφραγίδα)
 - μοιάζει με ένα πίνακα δρομολόγησης!
- ❑ **E:** πώς δημιουργούνται, διατηρούνται οι καταχωρίσεις στον πίνακα του μεταγωγέα;
 - κάτι σαν πρωτόκολλο δρομολόγησης;



*switch with six interfaces
(1,2,3,4,5,6)*

Μεταγωγέας: Αυτοεκμάθηση

- Ο μεταγωγέας **μαθαίνει** ποιού υπολογιστές είναι προσβάσιμοι μέσω ποιών διεπαφών
 - όταν λαμβάνεται το πλαίσιο, ο μεταγωγέας "μαθαίνει" τη θέση του αποστολέα: εισερχόμενο τμήμα (segment) LAN
 - καταγράφει το ζεύγος αποστολέας/θέση στον πίνακα μεταγωγέα



MAC addr	interface	TTL
A	1	60

*Switch table
(αρχικά άδειος)*

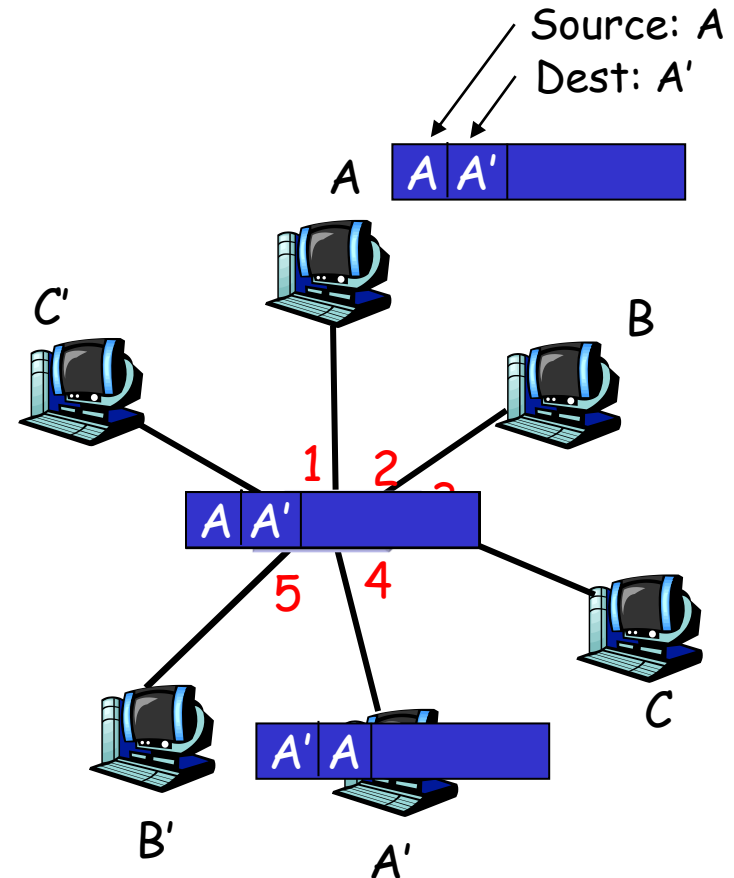
Μεταγωγέας: φιλτράρισμα/προώθηση πλαισίων

Όταν λαμβάνεται πλαίσιο στον μεταγωγέα:

1. Κατάγραψε εισερχόμενη ζεύξη, MAC διεύθυνση υπολογιστή-αποστολέα
 2. Διάταξε τον πίνακα μεταγωγής βάσει της διεύθυνσης MAC προορισμού
 3. **if** βρεθεί καταχώριση για τον προορισμό
 then {
 if ο προορισμός στο τμήμα από το οποίο έφτασε το πλαίσιο
 then απόρριψε το πλαίσιο
 else προώθησε το πλαίσιο στη διεπαφή που υποδεικνύεται από
 την καταχώριση
 }
 else flood
- προώθηση σε όλες τις διεπαφές εκτός από αυτή
από την οποία έφτασε το πλαίσιο

Αυτοεκμάθηση, προώθηση: παράδειγμα

- Άγνωστη θέση προορισμού πλαισίου A': **flood**
- Η θέση του προορισμού A είναι γνωστή: **επιλεκτική αποστολή σε μόνο μία ζεύξη**

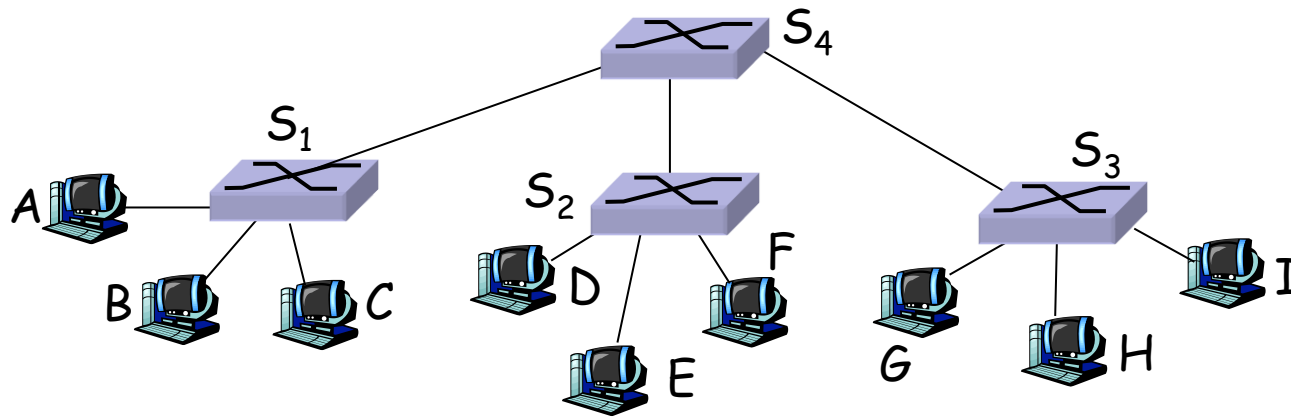


MAC addr	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

Πίνακας μεταγωγέα
(αρχικά άδειος)

Διασυνδέοντας μεταγωγείς

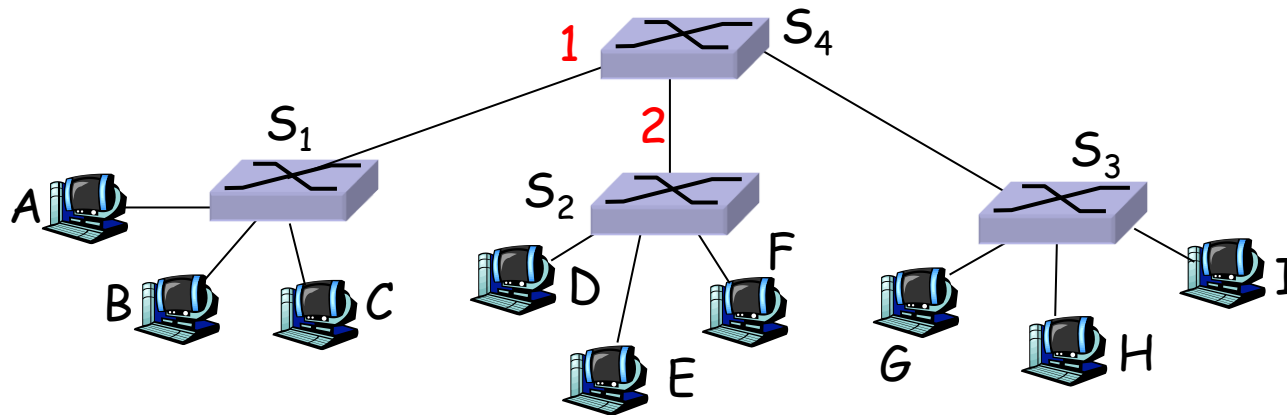
- Οι μεταγωγείς μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους



- r **E:** κατά την αποστολή από A προς G - πώς γνωρίζει ο S_1 ότι πρέπει να προωθήσει πλαίσιο που προορίζεται για τον F μέσω των S_4 και S_3 ;
- r **A:** αυτοεκμάθηση! (λειτουργεί ακριβώς όπως και στην περίπτωση ενός μόνο μεταγωγέα!)

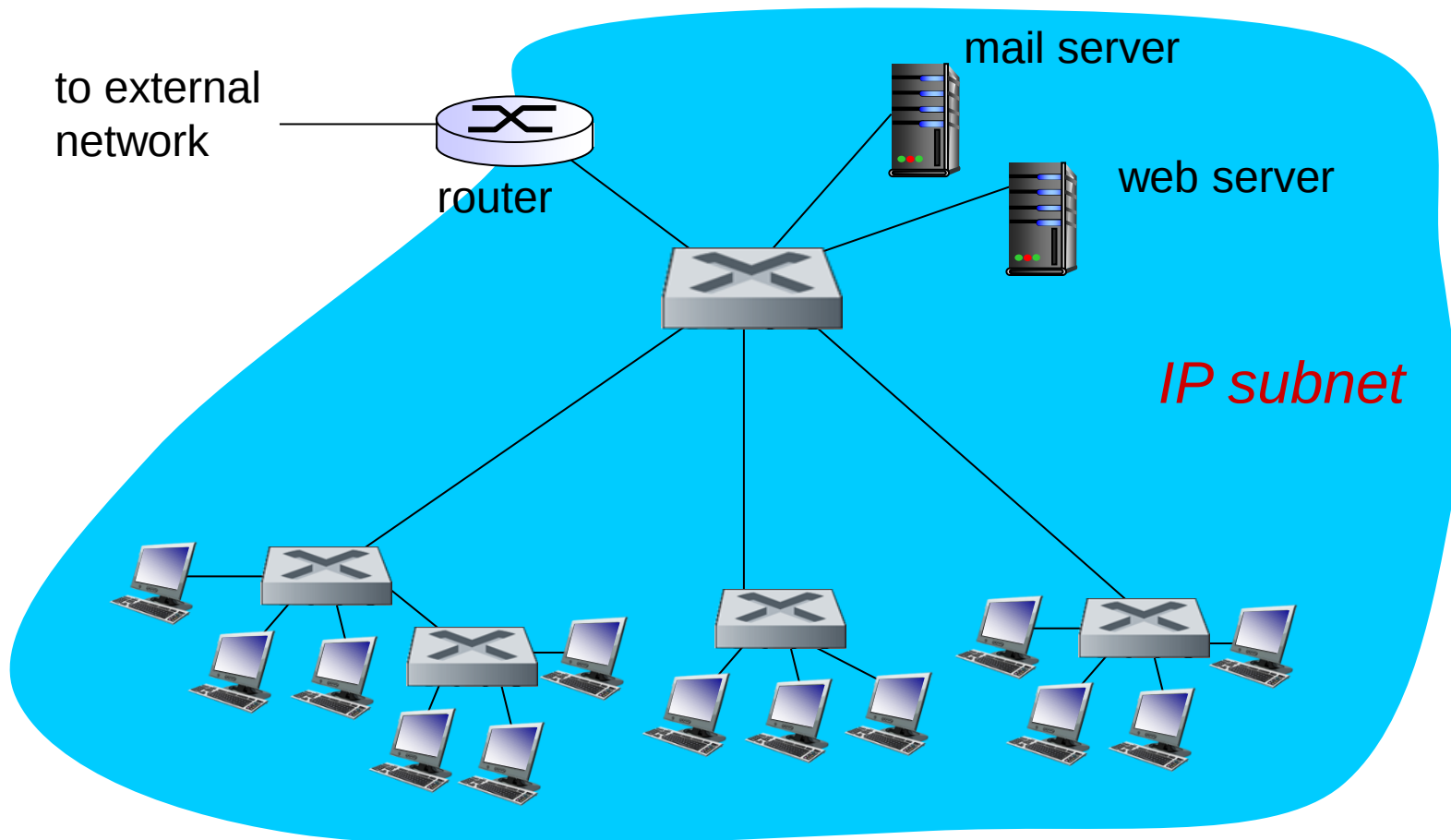
Παράδειγμα αυτοεκμάθησης με πολλούς μεταγωγείς

Υποθέστε ότι ο C στέλνει πλαίσιο στον I , ο I απαντά στον C



- **E:** Δείξτε τους πίνακες μεταγωγέα και την προώθηση πακέτων στους S_1, S_2, S_3, S_4

Ιδρυματικό δίκτυο



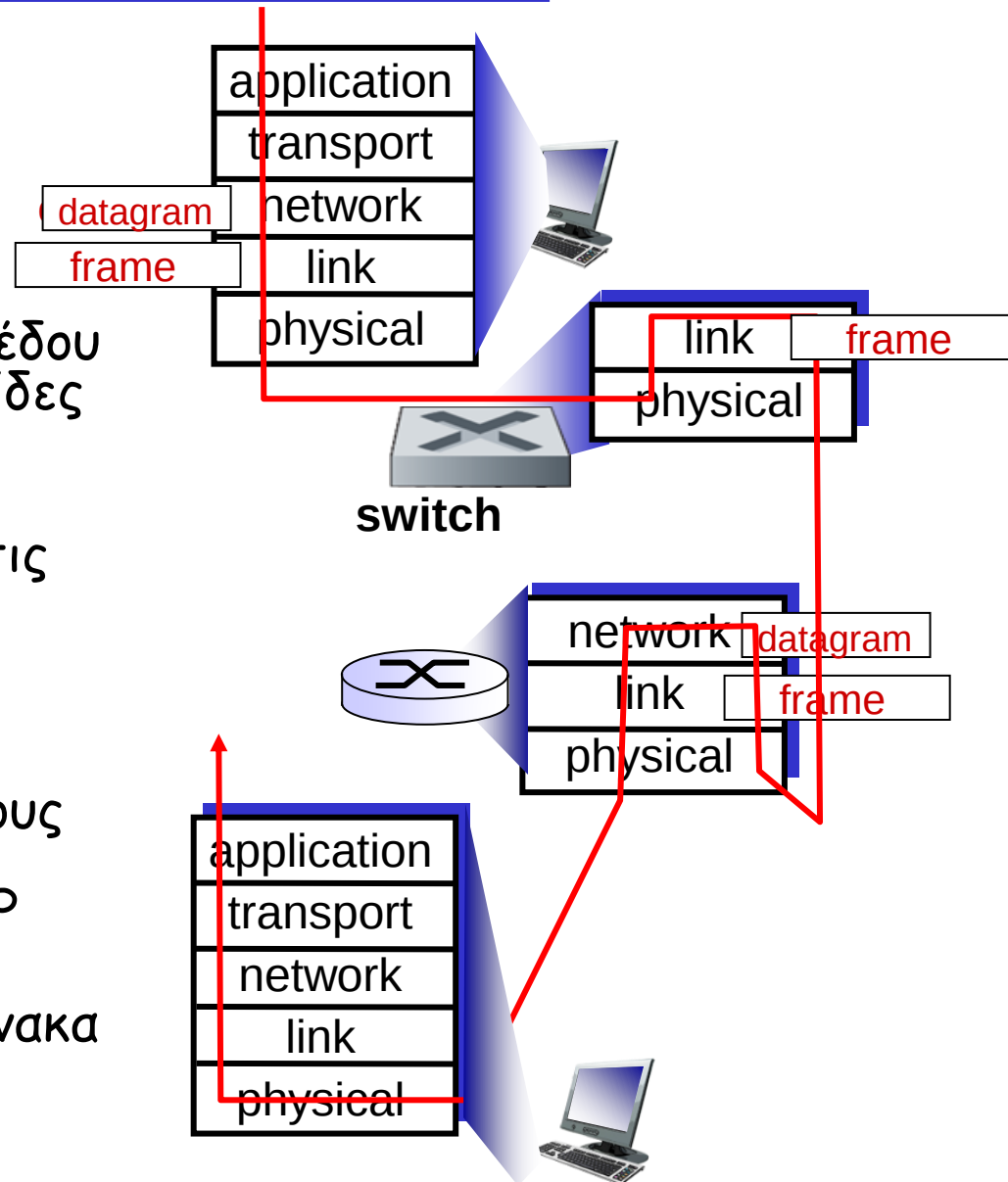
Μεταγωγείς έναντι Δρομολογητών

και οι δυο είναι συσκευές με αποθήκευση και προώθηση (store-and-forward)

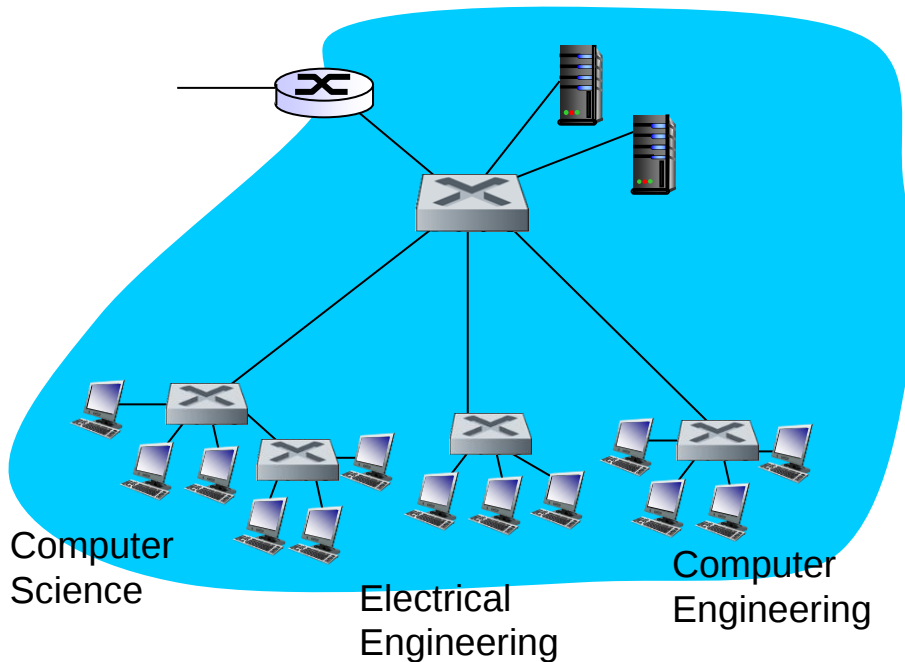
- **δρομολογητές:** συσκευές επιπέδου δικτύου (εξετάζουν τις κεφαλίδες επιπέδου δικτύου)
- **μεταγωγείς:** είναι συσκευές επιπέδου ζεύξης (εξετάζουν τις κεφαλίδες επιπέδου ζεύξης)

και οι δύο έχουν πίνακες προώθησης

- **δρομολογητές:** υπολογίζουν τους πίνακες χρησιμοποιώντας αλγόριθμους δρομολόγησης, IP διευθύνσεις
- **μεταγωγείς:** μαθαίνουν τον πίνακα προώθησης χρησιμοποιώντας flooding, μάθηση, MAC διευθύνσεις



VLANs: κίνητρο



Θεωρήστε:

□ ένας CS χρήστης μετακινεί το γραφείο του στο ΕΕ, αλλά θέλει να συνδέεται στον μεταγωγέα του CS

□ ένα **broadcast domain**:

- όλη η broadcast κίνηση επιπέδου 2 (ARP, DHCP, άγνωστη θέση MAC διεύθυνσης προορισμού) πρέπει να περάσει όλο το LAN

- θέματα ασφαλείας/ιδιωτικότητας, αποτελεσματικότητας

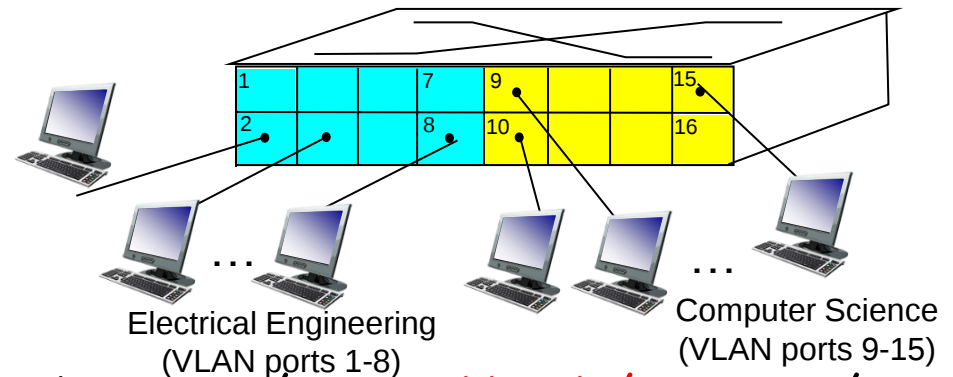
VLANs

Virtual Local Area Network

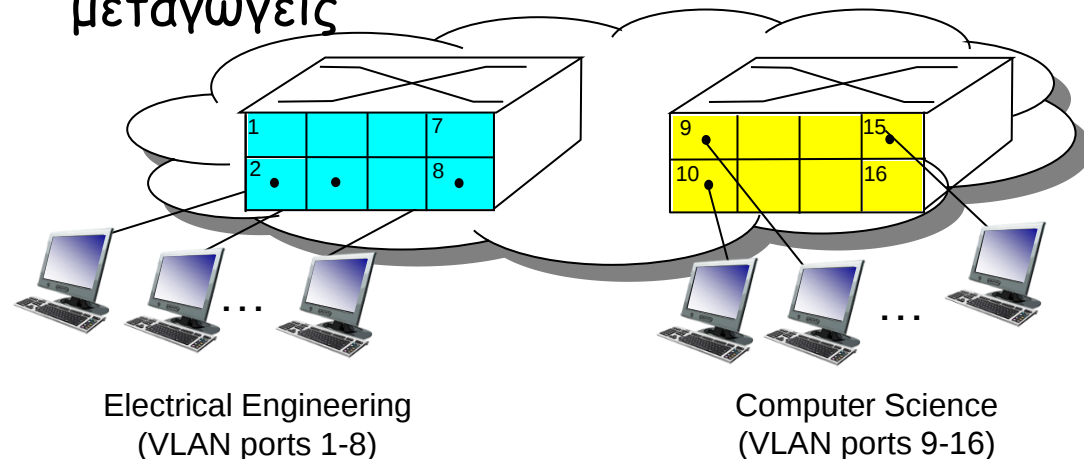
μεταγωγείς που υποστηρίζουν VLAN μπορούν να ρυθμιστούν να ορίζουν πολλαπλά εικονικά LAN πάνω από μία φυσική υποδομή LAN

βάσει θύρας (port-based) VLAN:

ομαδοποιούνται οι θύρες του μεταγωγέα (από λογισμικό διαχείρισης μεταγωγέα) έτσι ώστε **ένας μόνο** φυσικός μεταγωγέας.....

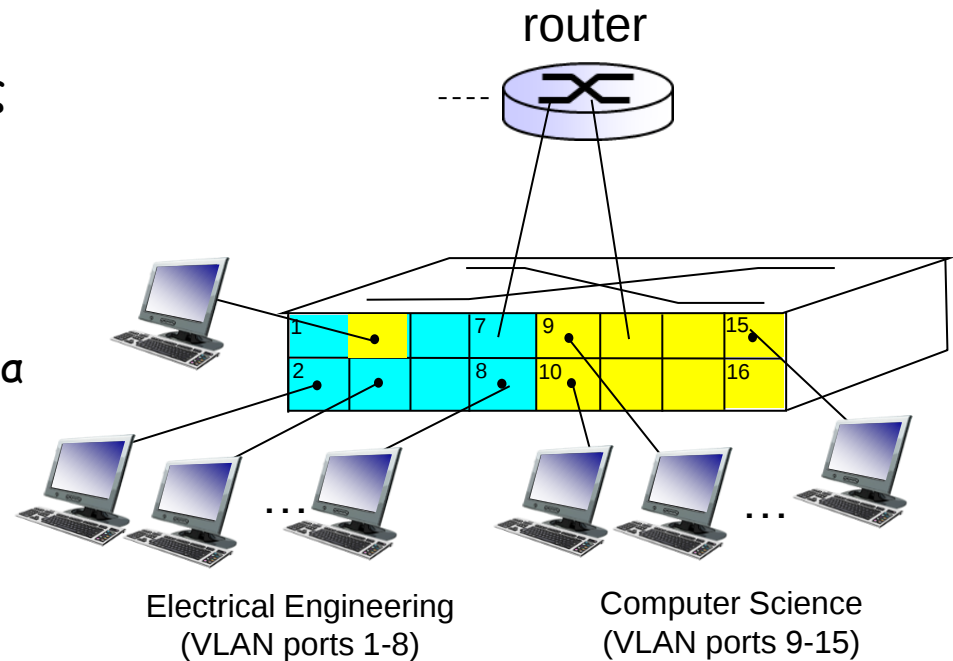


... να λειτουργεί ως **πολλαπλοί** εικονικοί μεταγωγείς

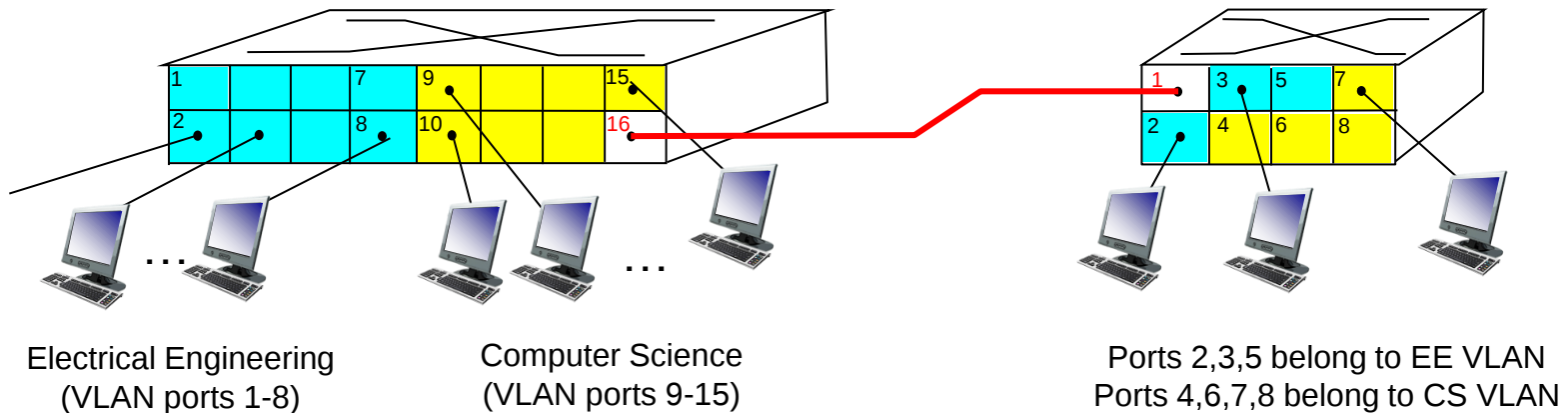


Βάσει Θύρας (port-based) VLAN

- **απομόνωση κίνησης:** πλαίσια από/προς τις θύρες 1-8 μπορούν να προσεγγίσουν μόνο τις θύρες 1-8
 - μπορεί επίσης να ορίσει VLAN με βάση τις MAC διευθύνσεις των τερματικών σημείων, αντί για τις θύρες του μεταγωγέα
- **δυναμική ιδιότητα μέλους:** θύρες μπορούν να ανατεθούν δυναμικά μεταξύ των VLANs
- **προώθηση μεταξύ των VLANs:** γίνεται μέσω δρομολόγησης (όπως με ξεχωριστούς μεταγωγείς)
 - στην πράξη οι κατασκευαστές πουλάνε μεταγωγείς συνδυασμένους με δρομολογητές



VLANs που εκτείνονται σε πολλαπλούς μεταγωγείς



□ **trunk θύρα:** μεταφέρει πλαίσια μεταξύ VLANs που ορίζονται σε πολλαπλούς φυσικούς μεταγωγείς

- πλαίσια που προωθούνται εντός των VLAN μεταξύ των μεταγωγέων δεν μπορεί να είναι σκέτα 802.1 πλαίσια (πρέπει να μεταφέρουν VLAN ID πληροφορίες)
- 802.1q πρωτόκολλο προσθέτει/αφαιρεί επιπλέον πεδία κεφαλίδας για πλαίσια που προωθούνται μεταξύ trunk θυρών

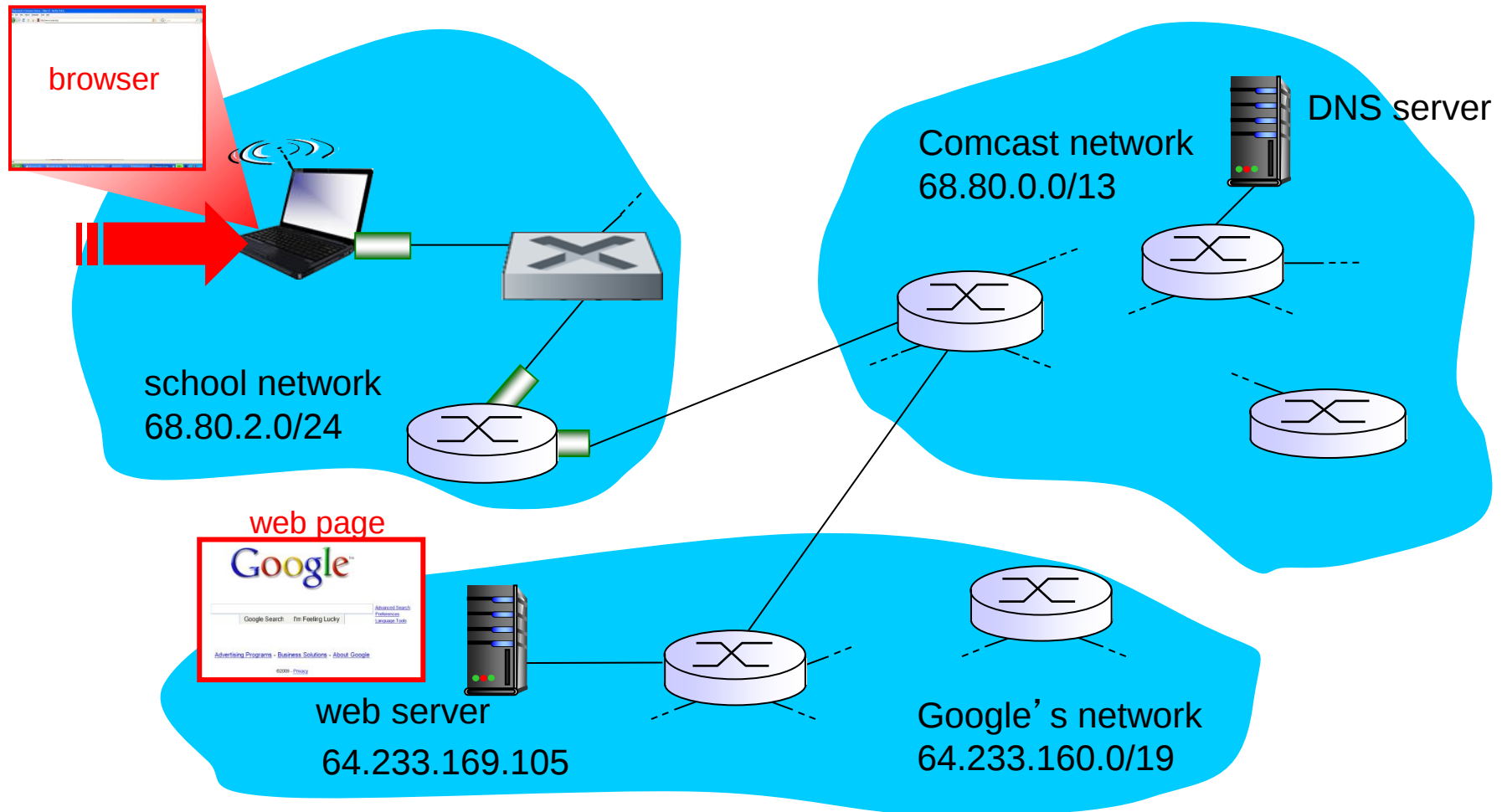
Επίπεδο Ζεύξης

- ❑ 5.1 Εισαγωγή και υπηρεσίες
- ❑ 5.2 Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- ❑ 5.3 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης
- ❑ 5.4 LANs
 - Διευθυνσιοδότηση, ARP
 - Ethernet
 - Μεταγωγείς (switches)
 - VLANs
- ❑ 5.5 Εικονικές Ζεύξεις: MPLS
- ❑ 5.6 Δικτύωση κέντρων δεδομένων
- ❑ 5.7 Η "ζωή" μιας web αίτησης

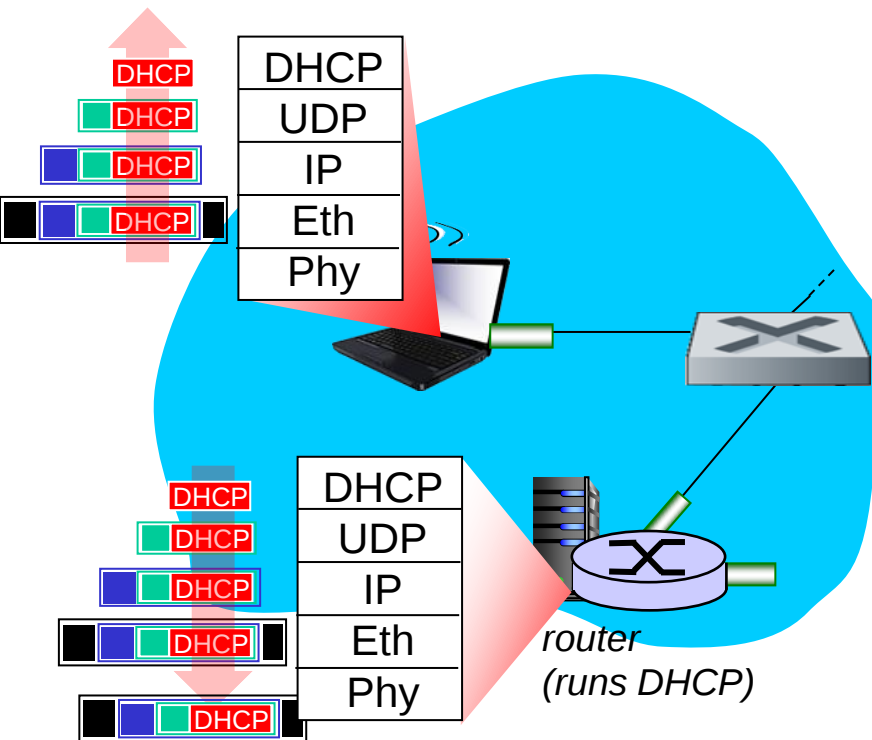
Σύνθεση: μία ημέρα στη ζωή μιας αίτησης web

- ❑ το ταξίδι προς τα κάτω της στοίβας πρωτοκόλλων ολοκληρώθηκε!
 - εφαρμογή, μεταφορά, δίκτυο, ζεύξη
- ❑ ενώνοντάς-τα-όλα-μαζί: σύνθεση!
 - **στόχος:** αναγνώρισε, ξαναδές, κατανόησε τα πρωτόκολλα (όλων των επιπέδων) που συμμετέχουν σε ένα φαινομενικά απλό σενάριο: αίτηση σελίδας www
 - **σενάριο:** φοιτητής συνδέει laptop στο δίκτυο του πανεπιστημίου, αιτείται/λαμβάνει το `www.google.com`

Μία ημέρα στη ζωή μιας αίτησης web: **σενάριο**



Μία ημέρα στη ζωή... σύνδεση στο Internet



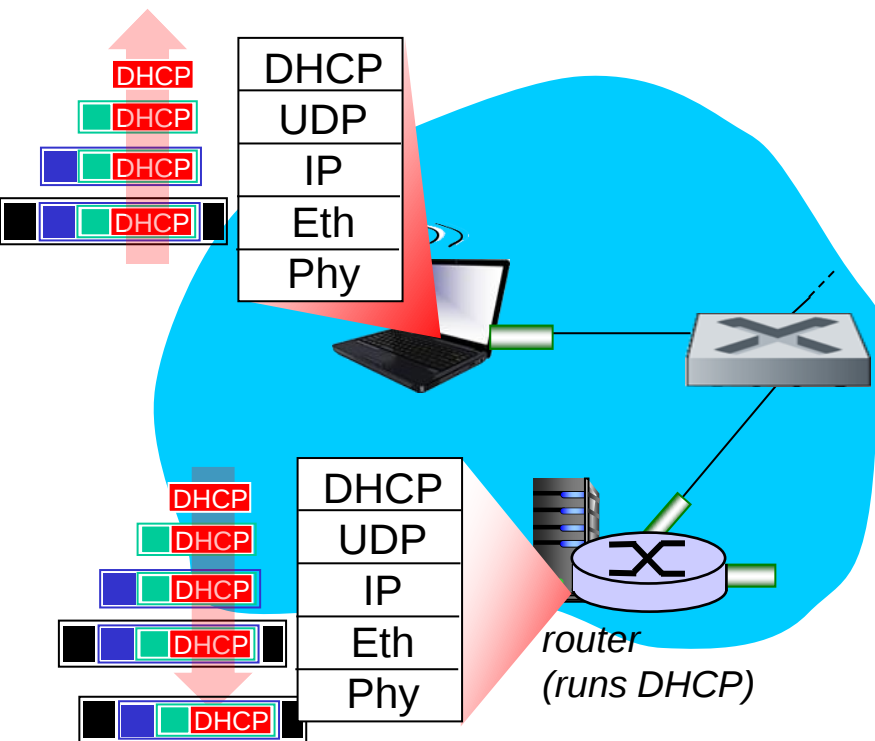
□ συνδέοντας το laptop χρειάζεται να πάρει δική του IP δ/νση, δ/νση δρομολογητή πρώτου άλματος, δ/νση DNS server: χρησιμοποίησε **DHCP**

□ Η DHCP αίτηση ενθυλακώνεται στο **UDP**, ενθυλακώνεται στο **IP**, ενθυλακώνεται στο **802.3 Ethernet**

□ Broadcast Ethernet πλαίσιο (προορισμός: FFFFFFFFFFFFFFFF) στο LAN, λαμβάνεται από τον δρομολογητή που τρέχει τον **DHCP server**

□ Το Ethernet αποθυλακώνεται σε IP, το οποίο αποθυλακώνεται σε UDP, το οποίο αποθυλακώνεται σε DHCP

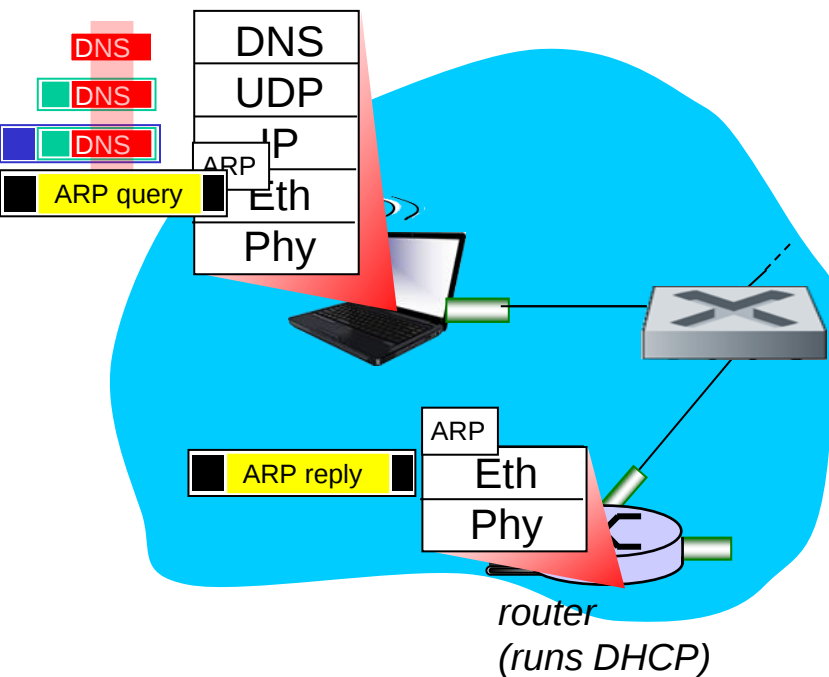
Μία ημέρα στη ζωή ... σύνδεση στο Internet



- Ο DHCP server διαμορφώνει το **DHCP ACK** που περιέχει την IP δ/νση του πελάτη, τη δ/νση του δρομολογητή πρώτου άλματος για τον πελάτη, όνομα & δ/νση του DNS server
- ενθυλάκωση στον DHCP server, το πλαίσιο προωθείται (**εκμάθηση μεταγωγέα**) μέσω του LAN, αποπολύπλεξη στον πελάτη
- DHCP πελάτης λαμβάνει την DHCP ACK απάντηση

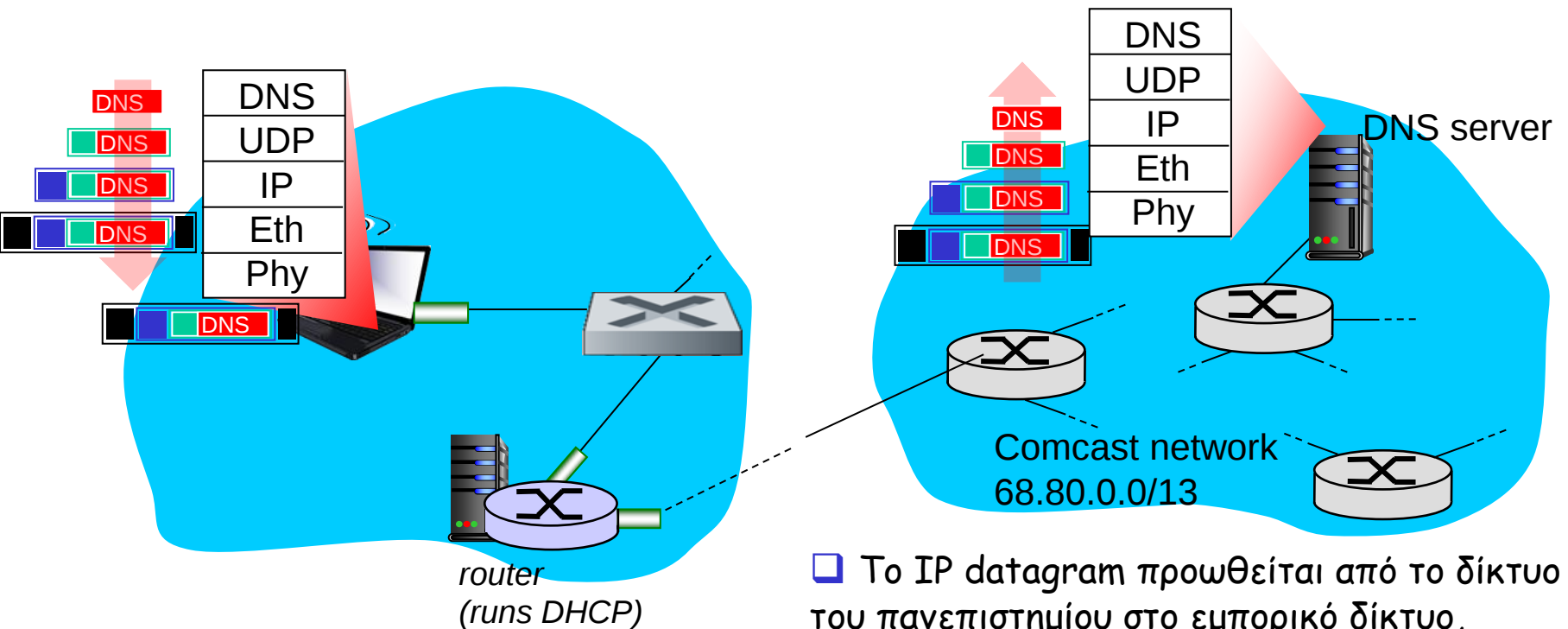
Ο πελάτης τώρα έχει IP διεύθυνση, γνωρίζει όνομα & διεύθυνση του DNS server, IP διεύθυνση του δρομολογητή πρώτου άλματος

Μία ημέρα στη ζωή... ARP (πριν το DNS, πριν το HTTP)



- προτού σταλεί η HTTP αίτηση, χρειάζεται η IP διεύθυνση του `www.google.com`: **DNS**
- Δημιουργείται ένα DNS ερώτημα, ενθυλακώνεται σε UDP, έπειτα σε IP και τέλος σε Ethernet. Για να σταλεί το πλαίσιο στον δρομολογητή, χρειάζεται τη διεύθυνση MAC της διεπαφής του δρομολογητή: **ARP**
- Το broadcast ARP ερώτημα, λαμβάνεται από τον δρομολογητή, ο οποίος απαντάει με **ARP απάντηση** δίνοντας τη MAC διεύθυνση της διεπαφής του δρομολογητή
- Ο πελάτης πλέον γνωρίζει τη MAC διεύθυνση του δρομολογητή πρώτου άλματος, οπότε μπορεί πλέον να στείλει το πλαίσιο που περιέχει το DNS ερώτημα

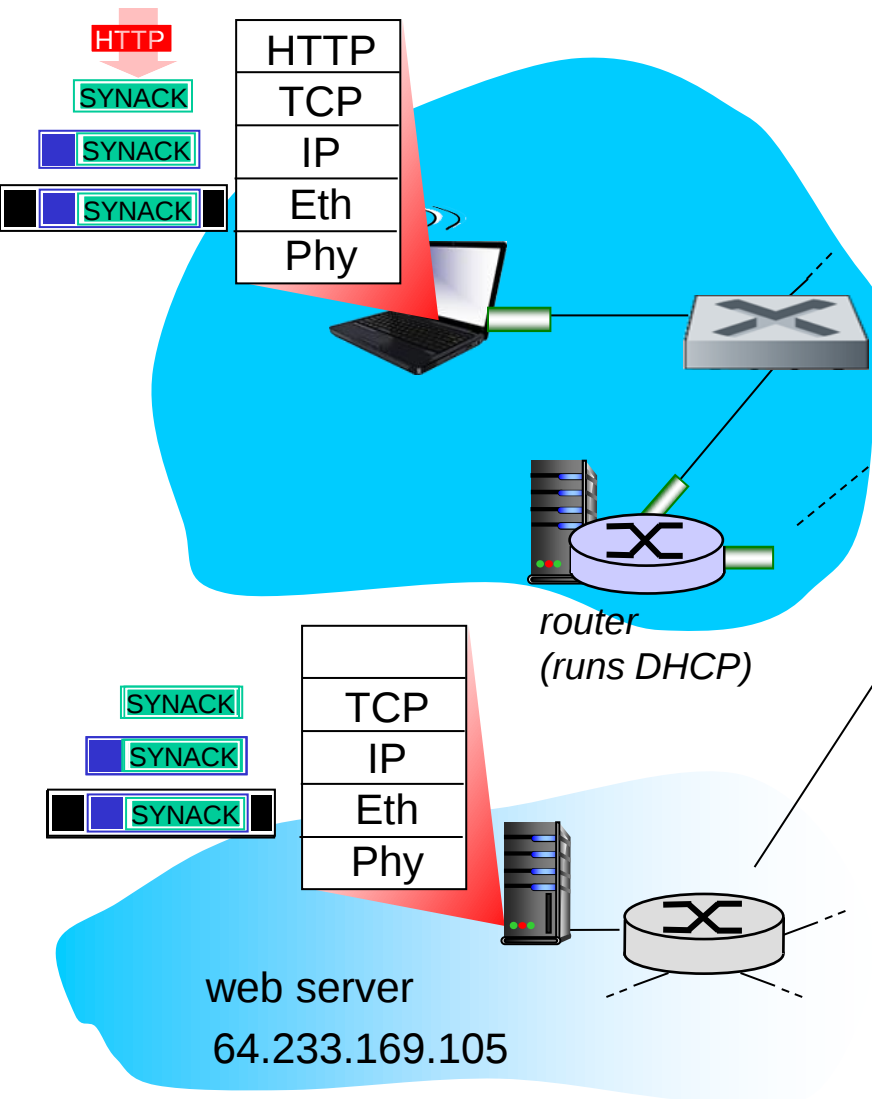
Μία ημέρα στη ζωή... χρησιμοποιώντας το DNS



- Το IP datagram που περιέχει το DNS ερώτημα προωθείται μέσω του μεταγωγέα του LAN από τον πελάτη στο δρομολογητή πρώτου άλματος

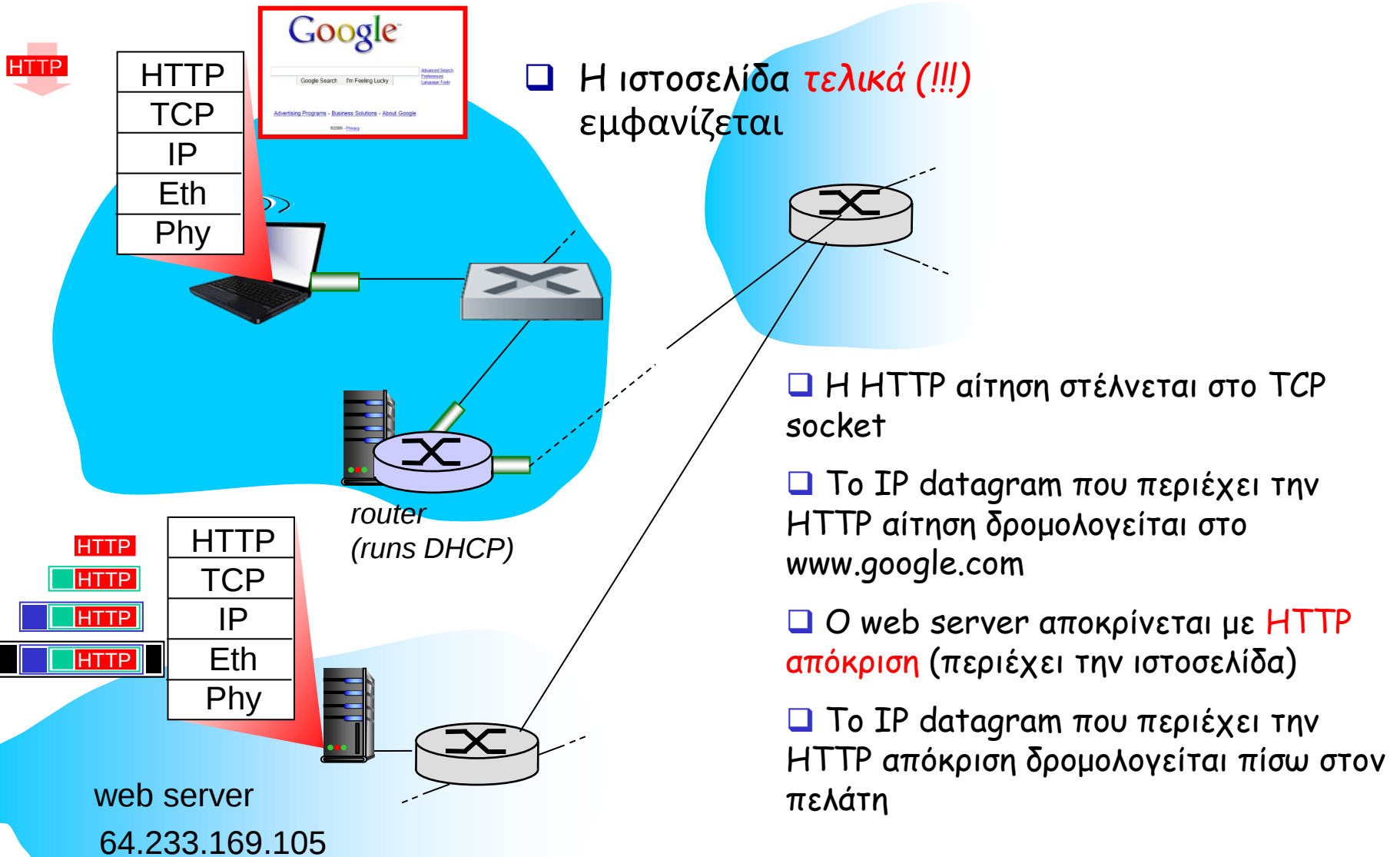
- Το IP datagram προωθείται από το δίκτυο του πανεπιστημίου στο εμπορικό δίκτυο, δρομολογείται (οι πίνακες δημιουργούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης **RIP, OSPF, IS-IS** και/ή **BGP**) στο DNS
- αποπολυπλέκεται στον DNS server
- Ο DNS server απαντάει στον πελάτη με την IP διεύθυνση του www.google.com

Μία ημέρα στη ζωή... το HTTP χρειάζεται μια TCP σύνδεση



- για να σταλεί την HTTP αίτηση, ο πελάτης πρώτα ανοίγει την TCP υποδοχή (socket) στον web server
- το **TCP SYN** τμήμα (βήμα 1 στην τριμερή χειραψία) δρομολογείται μεταξύ των τομέων στο web server
- Ο web server αποκρίνεται με ένα **TCP SYN ACK** (βήμα 2 στην τριμερή χειραψία)
- **εγκαθίδρυση TCP σύνδεσης**

Μία ημέρα στη ζωή... HTTP αίτηση/απόκριση



Επίπεδο Ζεύξης: Σύνοψη

- ❑ Αρχές που διέπουν τις υπηρεσίες του επιπέδου ζεύξης δεδομένων:
 - Ανίχνευση, διόρθωση σφαλμάτων
 - Κοινή χρήση ενός καναλιού ευρυεκπομπής: πολλαπλή πρόσβαση
 - Διευθυνσιοδότηση επιπέδου ζεύξης
- ❑ Πραγμάτωση και υλοποίηση των διάφορων τεχνολογιών επιπέδου ζεύξης
 - Ethernet
 - LANS μεταγωγής, VLANs
 - Εικονικοποιημένα δίκτυα ως επίπεδο ζεύξης: MPLS
- ❑ Σύνθεση: μια ημέρα στη ζωή μιας αίτησης web

Επίλογος

- ❑ το ταξίδι προς τα κάτω της στοίβας πρωτοκόλλων **ολοκληρώθηκε** (εκτός του φυσικού επιπέδου)
- ❑ καλή κατανόηση των αρχών δικτύωσης, θέλουμε λίγηεξάσκηση
- ❑ ... Θα μπορούσαμε να σταματήσουμε εδώ... αλλά υπάρχουν **πολλά** ενδιαφέροντα θέματα που δεν έχουμε καλύψει ακόμη!
 - ασύρματα δίκτυα
 - ασφάλεια
 - πολυμέσα
 - διαχείριση δικτύου

...η συνέχεια στα ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΙΙ !

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

