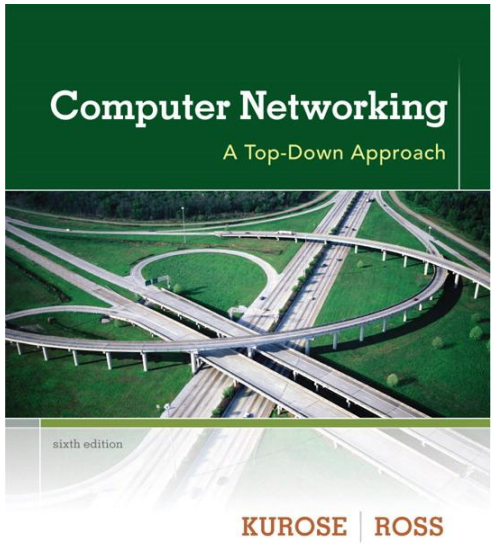
Chapter 5
Link Layer



A note on the use of these ppt slides:

We're making these slides freely available to all (faculty, students, readers). They're in PowerPoint form so you see the animations; and can add, modify, and delete slides (including this one) and slide content to suit your needs. They obviously represent a lot of work on our part. In return for use, we only ask the following:

- If you use these slides (e.g., in a class) that you mention their source (after all, we'd like people to use our book!)
- If you post any slides on a www site, that you note that they are adapted from (or perhaps identical to) our slides, and note our copyright of this material.

Thanks and enjoy! JFK/KWR

Computer Networking: A Top Down Approach

6th edition

Jim Kurose, Keith Ross

Addison-Wesley

March 2012

Chapter 5: Link layer

our goals:

- understand principles behind link layer services:
  - error detection, correction
  - sharing a broadcast channel: multiple access
  - link layer addressing
  - local area networks: Ethernet, VLANs
- instantiation, implementation of various link layer technologies

Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

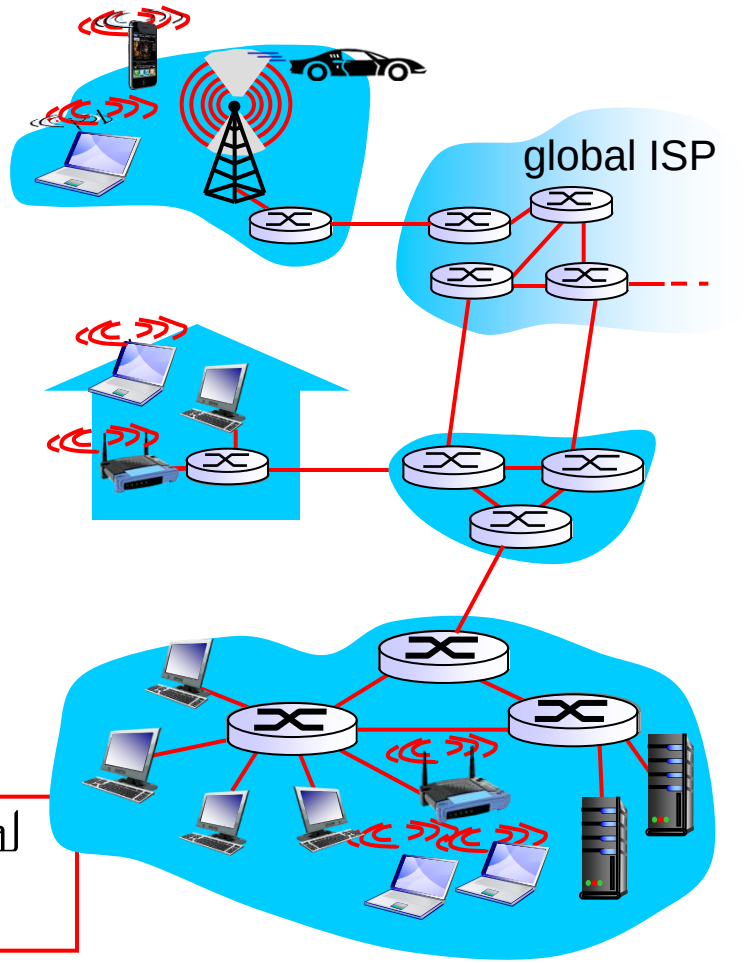
5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

Link layer: introduction

terminology:

- โฮสและเร้าเตอร์ : nodes
- ช่องการเชื่อมต่อระหว่างโหนด : links
  - การเชื่อมต่อแบบมีสาย
  - การเชื่อมต่อแบบไร้สาย
  - LANs
- layer-2 packet: frame, ดาต้าแกรมที่ถูกห่อหุ้ม



data-link layer รับผิดชอบส่งดาต้าแกรมจากโหนดนึงไปยังอีกโหนดผ่านทางการเชื่อมต่อ

Link layer: context

- ดาต้าแกรมถูกส่งโดยการเชื่อมต่อหลายโปรโตคอลบนการเชื่อมต่อหลายแบบ :
  - เช่นเริ่มส่งข้อมูลด้วย Ethernet แล้วต่อด้วยเฟรมรีเลย์ในระหว่างกลางสุดท้ายไปถึงผู้รับด้วย
- แต่ละโปรโตคอลการเชื่อมต่อให้บริการหลายบริการ
  - การบริการบางที่อาจไม่มี rdt

transportation analogy:

- การเดินทางจาก Princeton ไปยัง Lausanne
  - ลิมูซีน: Princeton ไป JFK
  - เครื่องบิน: JFK ไป Geneva
  - รถไฟ: Geneva ไป Lausanne
- นักท่องเที่ยว = datagram
- ส่วนของการเดินทาง = communication link
- ลักษณะการเดินทาง = link layer protocol
- travel agent = routing algorithm

Link layer services

- *framing, link access:*
  - ห่อหุ้มดาต้าแกรมลงไปในเฟรมโดยใส่ส่วนหัวและหางลงไปด้วย
  - channel access if shared medium
  - ที่อยู่ "MAC" ถูกใส่ในส่วนหัวของเฟรมเพื่อบอกถึงต้นทางกับปลายทาง
    - ต่างจาก IP address!
- *reliable delivery between adjacent nodes*
  - เราเรียนวิธีการไปแล้วในบทที่ 3 !
  - ใช้น้อยครั้งในการเชื่อมต่อที่มี bit-error น้อย(fiber, some twisted pair)
  - wireless links: high error rates
    - *Q:* why both link-level and end-end reliability?

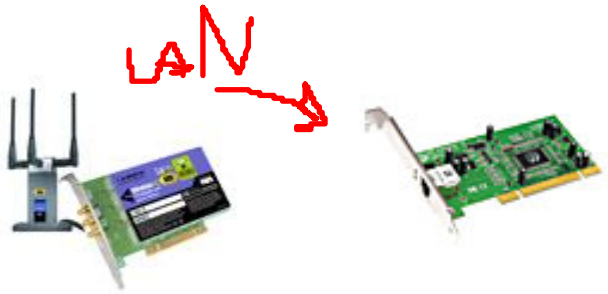
Link layer services (more)

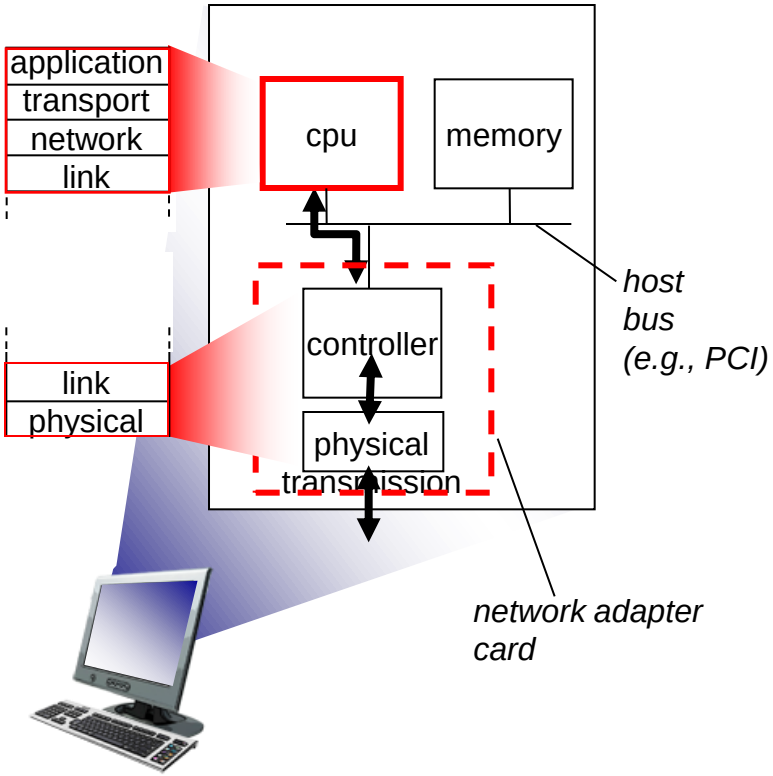
- *flow control:*
  - อยู่ระหว่างโหนดผู้ส่งและผู้รับที่อยู่ติดกัน
- *error detection:*
  - ความเสียหายเกิดจากสัญญาณอ่อนหรือน๊อยซ์
  - ฝ่ายผู้รับตรวจพบความเสียหาย
    - ส่งสัญญาณไปบอกให้ส่งใหม่อีกครั้งหรือทิ้งเฟรมไป
- *error correction:*
  - ผู้รับตรวจและแก้ไขบิตที่เสียหายโดยไม่ต้องรอให้ส่งใหม่อีกครั้ง
- *half-duplex and full-duplex*
  - half duplex โหนดแต่ละฝั่งจะต้องรอให้อีกฝั่งส่งเสร็จก่อนที่จะเริ่มส่งได้แต่ไม่ใช่ในเวลาเดียวกัน

เหมือน วอ ตำรวย

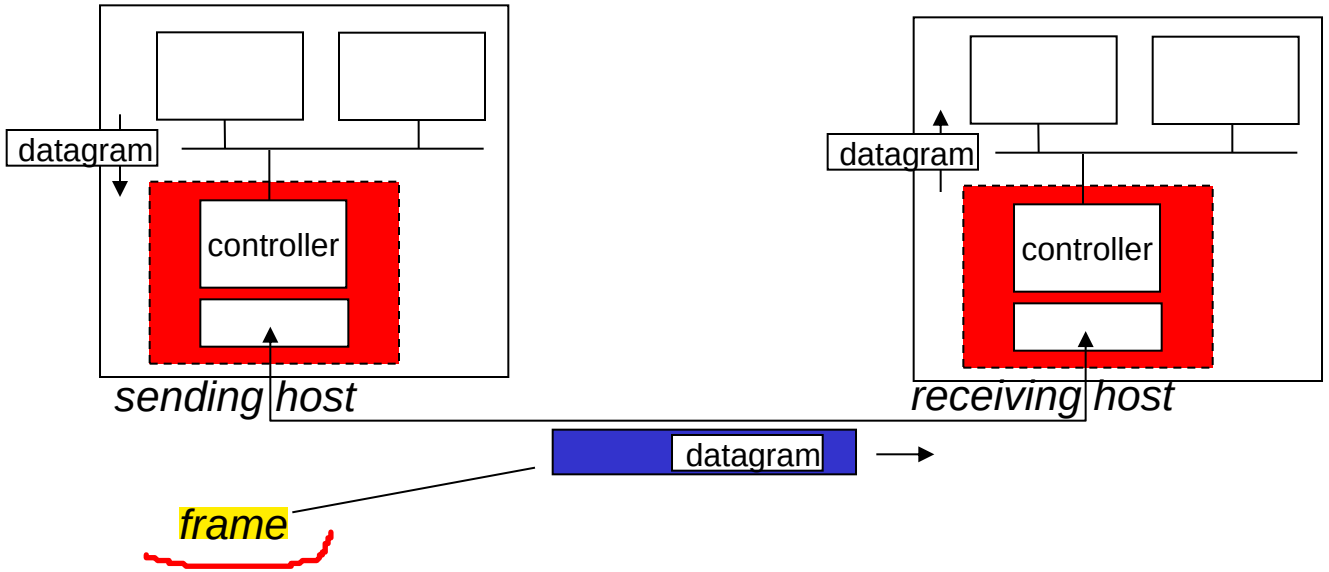
Where is the link layer implemented?

- link layer ทำงานอยู่ใน "adaptor" (เช่น *network interface card* NIC) หรือบนชิป
  - Ethernet card, 802.11 card; Ethernet chipset
  - implements link, physical layer
- เชื่อมต่อกับโฮสในระบบแบบบัส
- เป็นการรวมกันของ ฮาร์ดแวร์ ซอฟท์แวร์ และเฟิร์มแวร์





Adaptors communicating



- **ฝั่งส่ง** :
  - ห่อหุ้มดาต้าแกรมลงในเฟรม
  - เพิ่ม error checking bits, rdt, flow control, etc.
- **ฝั่งรับ**
  - มองหาข้อผิดพลาด, rdt, flow control, etc
  - แยกดาต้าแกรม, ส่งต่อไปยังเลเยอร์ด้านบนฝั่งผู้รับ

Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

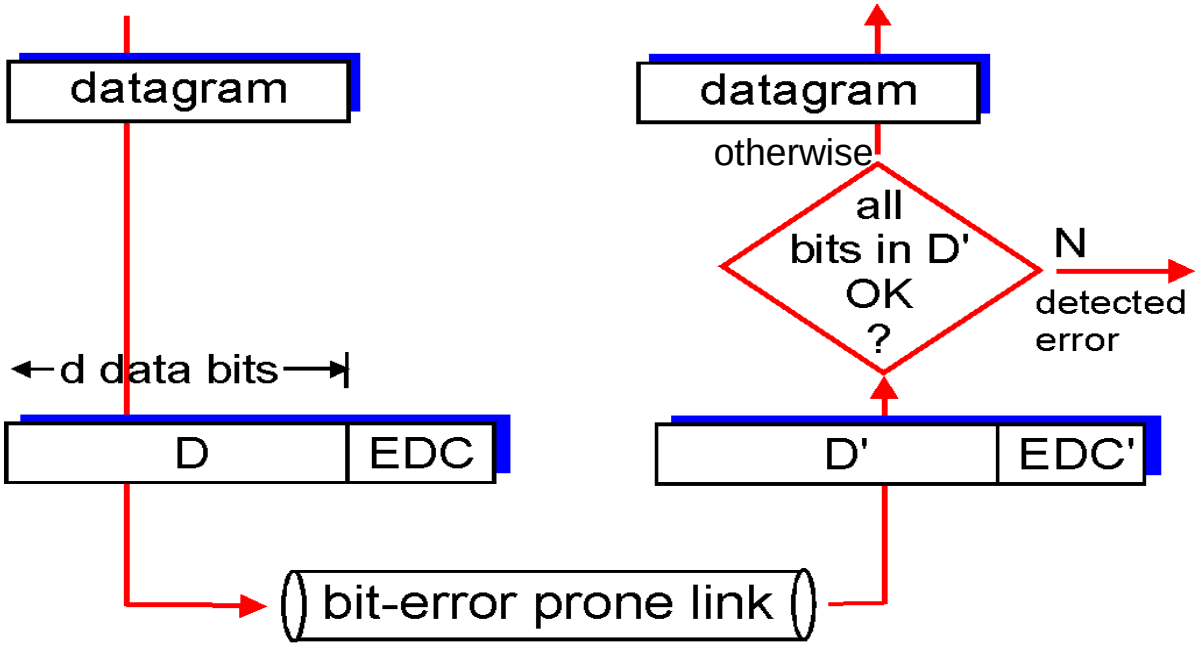
5.7 a day in the life of a web request

Error detection

EDC= Error Detection and Correction bits (redundancy)

D = ข้อมูลถูกปกป้องโดยการตรวจสอบความผิดพลาด อาจรวมถึงข้อมูลส่วนหัว

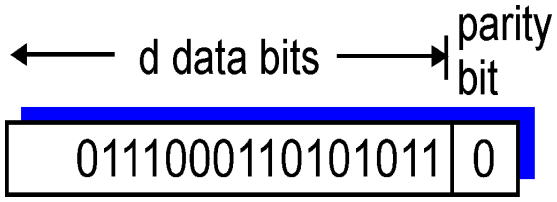
- การตรวจสอบความผิดพลาดเชื่อถือไม่ได้ 100%!
  - โปรโตคอลอาจไม่เจอในบางส่วนที่เสียหายแต่เกิดขึ้นน้อยมาก
  - ยิ่ง ขนาดEDC ใหญ่เท่าไรการตรวจสอบความผิดพลาดยิ่งดีขึ้นเท่านั้น



Parity checking

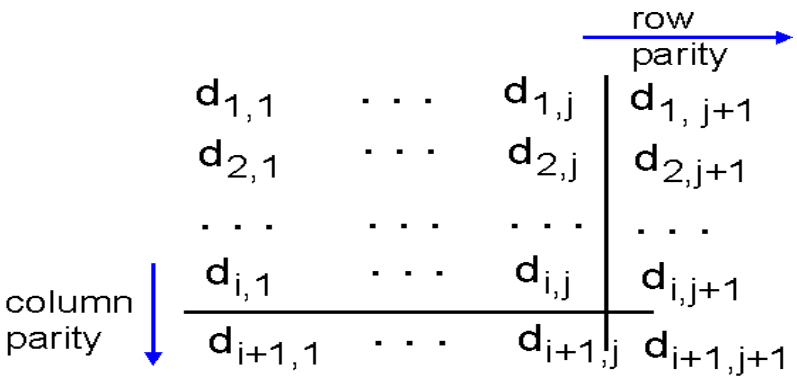
single bit parity:

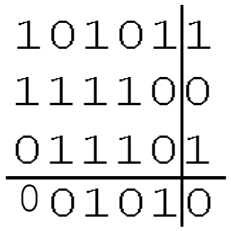
- *ตรวจสอบ bit errors*



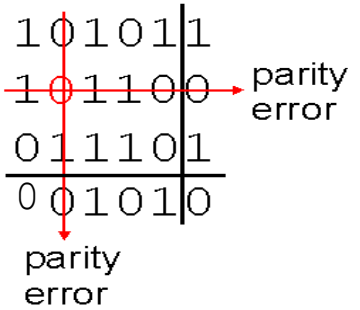
two-dimensional bit parity:

- ตรวจสอบและแก้ไข bit errors





no errors



correctable single bit error

Internet checksum (review)

goal: ตรวจพบข้อผิดพลาด (e.g., flipped bits) ในข้อมูลที่ทำการส่ง (note: used at transport layer *only*)

sender:

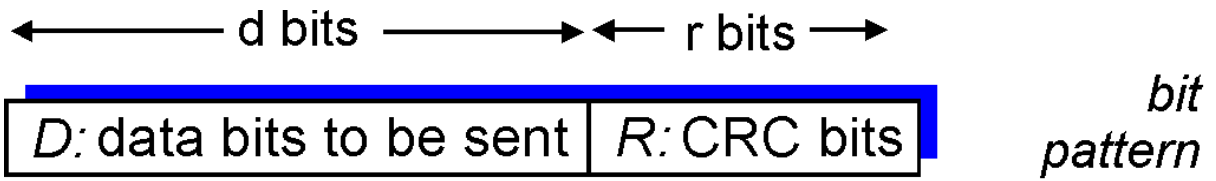
- ทำส่วนย่อยของข้อมูลให้อยู่ในลำดับ 16 บิต
- checksum: ถูกเพิ่มเข้าไปในส่วนย่อยของข้อมูล
- ผู้ส่งใส่ค่า checksumลงไปใน UDP checksum field

receiver:

- คำนวน checksum ของชิ้นส่วนที่ได้รับ
- ตรวจสอบว่า checksum ตรงกับที่ถูกส่งมาหรือไม่ :
  - ไม่ตรง - พบความเสียหาย
  - ตรง – ไม่พบความเสียหายแต่อาจยังจะมีหรือไม่ ?

Cyclic redundancy check (ข้าม)

- เป็นโค้ดการตรวจสอบความเสียหายที่มีประสิทธิภาพ
- ดูข้อมูลเป็นบิต, D, แทนเลขฐานสอง
- choose r+1 bit pattern (generator), G
- goal: choose r CRC bits, R, such that
  - <D,R> exactly divisible by G (modulo 2)
  - receiver knows G, divides <D,R> by G. If non-zero remainder: error detected!
  - can detect all burst errors less than r+1 bits
- ใช้ทั่วไป (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM)



CRC example (ข้าม)

want:

$D \cdot 2^r$ XOR R = nG

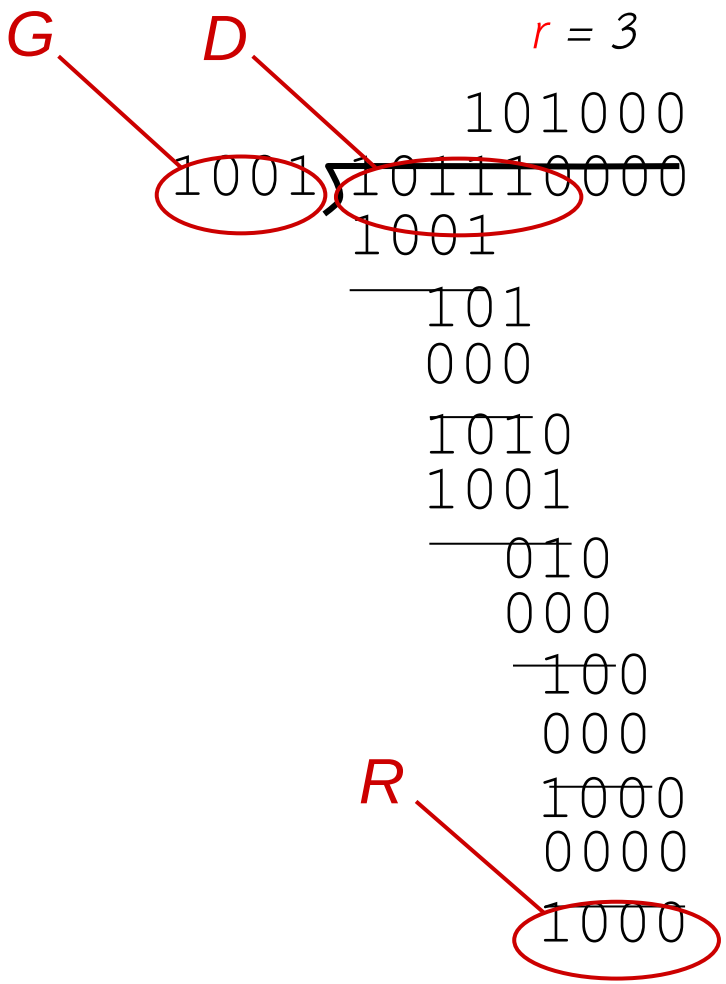
equivalently:

$D \cdot 2^r$ = nG XOR R

equivalently:

if we divide $D \cdot 2^r$ by G, want remainder R to satisfy:

$$R = remainder\left[\frac{D \cdot 2^r}{G}\right]$$



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

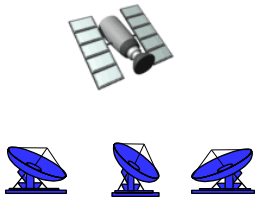
Multiple access links, protocols

ลักษณะสองแบบของ “links”:

- point-to-point
  - PPP สำหรับการเชื่อมต่อแบบ dial-up
  - point-to-point link ที่เชื่อมต่อระหว่าง Ethernet switch, host
- *broadcast (shared wire or medium)*
  - old-fashioned 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)

Multiple access protocols

- แชร์ช่องทางการสื่อสารsingle shared broadcast channel
- สองหรือมากกว่าในการส่งข้อมูลโดยโหนด: เกิดการขัดข้องinterference
  - *collision* ถ้าโหนดมากกว่าสองโหนดส่งข้อมูลพร้อมกัน

multiple access protocol

- เป็น algorithm แบบกระจายที่ช่วยหาว่าโหนดแชร์ช่องทางสื่อสารกันอย่างไร i.e., หาว่าเมื่อไรโหนดสามารถส่ง
- การสื่อสารเพื่อที่จะบอกว่าใครสามารถส่งได้ก็ต้องใช้ช่องทางด้วย
  - ไม่มี out-of-band channelสำหรับช่องทางนี้

multiple access protocol ในอุดมคติ

given: เป็น broadcast channelของอัตตราส่ง R bps

desiderata:

1. เมื่อโหนดต้องการส่ง สามารถส่งได้ที่อัตตราการส่ง = R
2. เมื่อมี M โหนดต้องการส่ง แต่และโหนดสามารถส่งได้ R/M
3. fully decentralized:
    - ไม่ต้องการให้มีโหนดพิเศษในการประสานงาน
    - ไม่ต้องการตรวจสอบเวลาและช่อง
4. ง่าย

MAC protocols: มีกี่แบบ

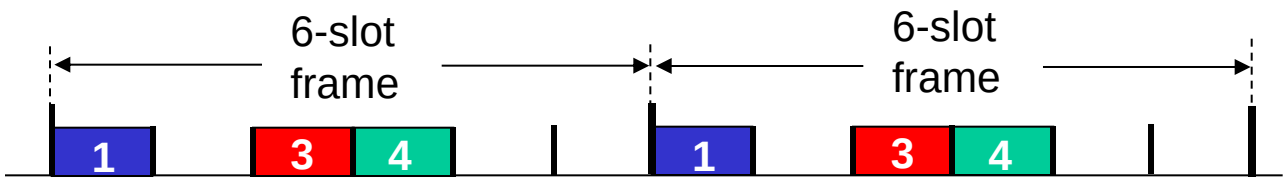
three broad classes:

- *แบ่งช่องทางเป็นส่วนๆ*
  - แบ่งช่องทางให้เป็นชิ้นเล็กลง (time slots, frequency, code)
  - จัดสรรแต่ละชิ้นส่วนไปให้แต่ละโหนด
- *ส่งแบบสุ่ม*
  - ช่องทางไม่มีการแบ่ง ยอมให้เกิดการชนกัน
  - ต้องมีการแก้ไขในการชนกัน
- *ตาใครตามัน "taking turns"*
  - โหนดแต่ละโหนดมีตาของตัวเอง แต่บางโหนดสามารถส่งได้มากกว่า

Channel partitioning MAC protocols: TDMA

TDMA: time division multiple access

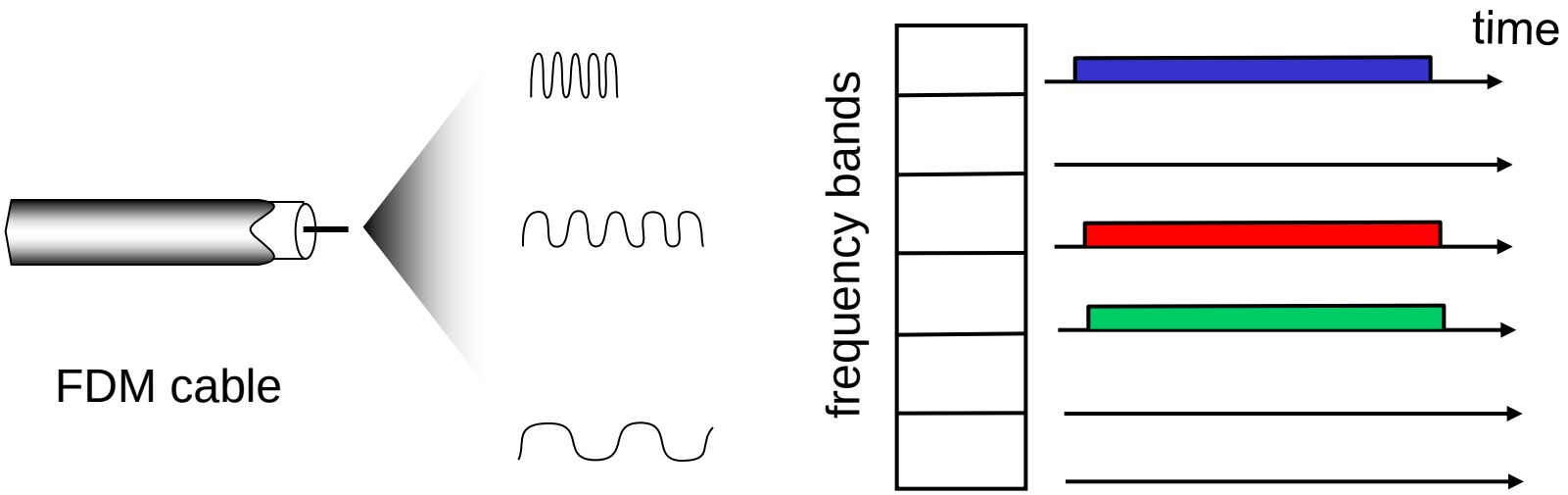
- ส่งแบบเป็นรอบๆ
- ในแต่ละรอบมีช่องการส่งจำกัด(length = pkt trans time)
- ช่องทางที่ไม่มีการส่งก็จะว่าง
- ตัวอย่าง: 6-station LAN, 1,3,4 มีแพคเกจ, slots 2,5,6 ว่าง



Channel partitioning MAC protocols: FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- ช่องทางการส่งแบบเป็นหลายความถี่
- แต่ละสถานีถูกกำหนดความถี่ในการส่ง
- ช่องความถี่ไหนไม่มีการส่งก็ว่าง
- example: 6-station LAN, 1,3,4 have pkt, frequency bands 2,5,6 idle



2. Random access protocols

- เมื่อโหนดมีข้อมูลที่จะส่ง
  - ส่งข้อมูลเต็มอัตตราการส่ง
  - no *a priori* coordination among nodes
- สองหรือมากกว่าอาจมีการชนกันได้
- random access MAC protocol ข้อกำหนด:
  - มีการตรวจสอบการชนกันอย่างไร
  - เกิดการชนกันแล้วกู้ข้อมูลอย่างไร (e.g., via delayed retransmissions)
- ต้องอย่างการส่งแบบ random access MAC protocols:
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Slotted ALOHA

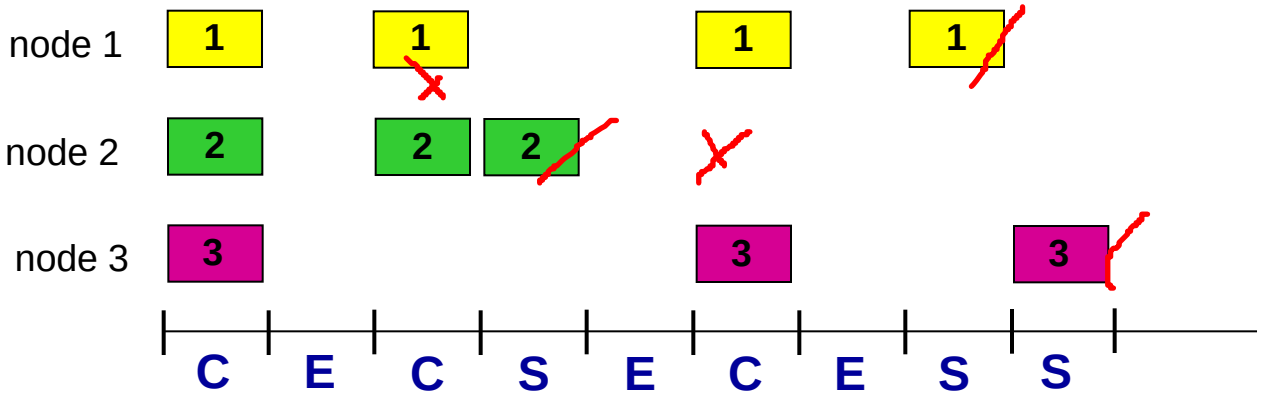
สมมติฐาน:

- แต่ละเฟรมมีขนาดเท่ากัน
- เวลาในการส่งถูกแบ่งเป็น slot เท่า ๆ กัน
- โหนดเริ่มส่งที่ต้น slot เท่านั้น (ไม่เริ่มส่งข้อมูลที่กึ่งกลาง slot ทำให้ slot มีข้อมูลไม่เต็ม)
- แต่ละโหนดมีการซิงโครไนซ์เวลา (ให้จังหวะเวลา)
- ถ้ามีสองโหนดหรือมากกว่าส่งข้อมูลใน slot เดียวกัน ทุก ๆ โหนดจะสามารถตรวจพบการชนกันได้

operationการกระทำ:

- เมื่อโหนดจะต้องส่งเฟรมใหม่ การส่งจะถูกส่งใน slot ถัดไป
  - *ถ้าไม่มีการชน:* โหนดส่ง frame ใหม่ใน slot นั้นได้สำเร็จ
  - *ถ้ามีการชน:* โหนดต้องส่ง frame ใหม่นั้นอีกครั้งใน แต่ละ slot ถัดไปด้วยความน่าจะเป็น p จนกว่าจะส่งสำเร็จ

Slotted ALOHA



ข้อดี:

- แต่ละโหนดที่ส่งอยู่สามารถส่งได้ในอัตราการส่งเต็มที่
- highly decentralized: เฉพาะช่องที่ส่งในโหนดเท่านั้นที่ต้องการซิงค์
- ง่าย

ข้อเสีย:

- เกิดการชนกัน,เกิดการรอในการส่ง
- มีช่องว่าง
- โหนดอาจจะสามารถตรวจสอบการชนกันได้ช้ากว่าเวลาที่ส่งแพคเกจ
- มีการตรวจสอบเวลา

Slotted ALOHA: ประสิทธิภาพ

efficiency ประสิทธิภาพ: ในระยะยาวอัตตราการส่งที่สำเร็จ (many nodes, all with many frames to send)

- *สมมติว่า N Node มีหลายๆเฟรมความเป็นไปได้ของแต่ละการส่งเท่ากับ p*
- prob that given node has success in a slot = $p(1-p)^{N-1}$
- prob that *any* node has a success = $Np(1-p)^{N-1}$
- max efficiency: find p* that maximizes $Np(1-p)^{N-1}$
- for many nodes, take limit of $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ as N goes to infinity, gives:

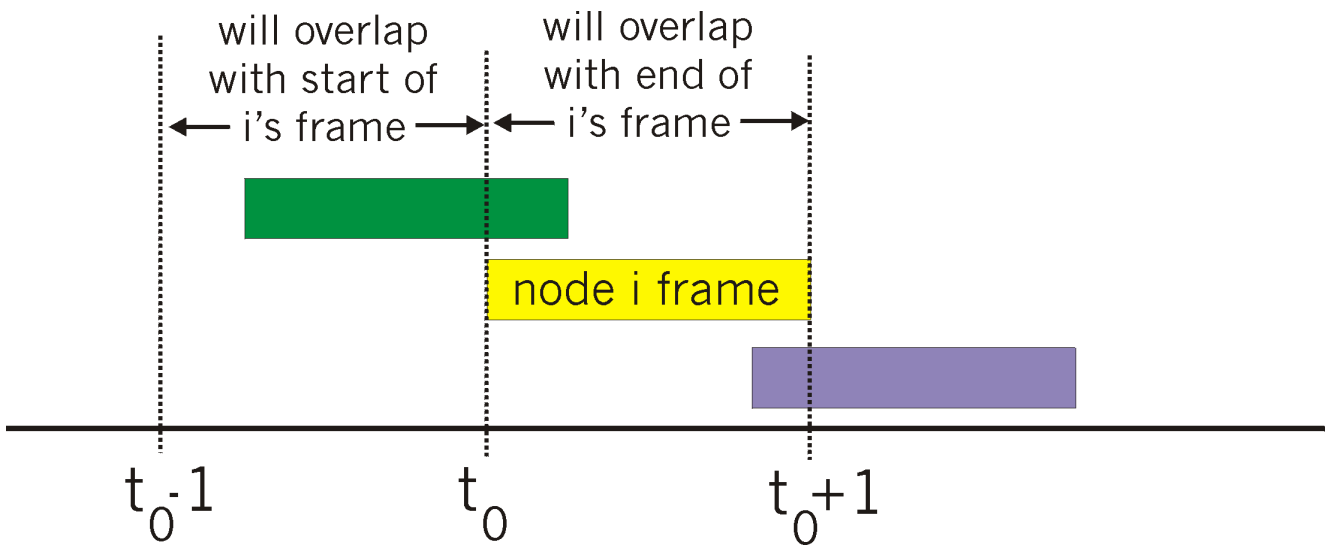
max efficiency = 1/e = .37

at best: ช่องทางการส่งดีที่สุดมีแค่ 37 %

!

Pure (unslotted) ALOHA

- unslotted Aloha: ง่ายกว่า ไม่มีการซิงโครไนซ์simpler, no synchronization
- เมื่อเฟรมแรกมาถึง
  - ส่งทันที
- ความน่าจะเป็นในการชนการมีมากขึ้น :
  - ส่งข้อมูลที่ t_0 ชนกับข้อมูลอื่นที่ $[t_0-1,t_0+1]$



Pure ALOHA efficiency

P(success by given node) = P(node transmits) ·

P(no other node transmits in $[t_0\text{-}1,t_0]$ ·

P(no other node transmits in $[t_0\text{-}1,t_0]$

$= p \cdot (1\text{-}p)^{N-1} \cdot (1\text{-}p)^{N-1}$

$= p \cdot (1\text{-}p)^{2(N-1)}$

... choosing optimum p and then letting n $\rightarrow \infty$

$= 1/(2e) = .18$

even *worse* than slotted Aloha!

CSMA (carrier sense multiple access)

CSMA: ตรวจสอบก่อนการส่ง:

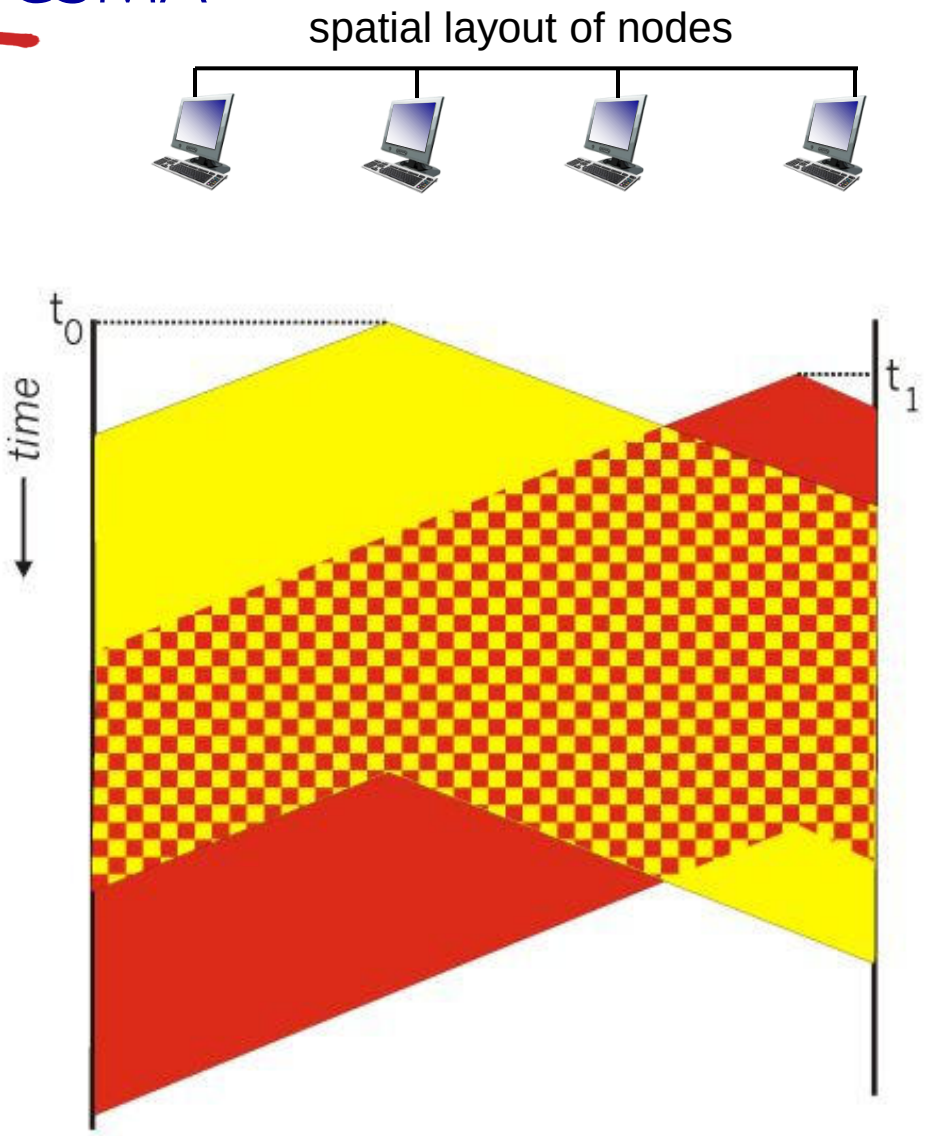
ถ้าตรวจสอบช่องทางการส่งว่าว่าง ก็จะส่งเฟรมไปทั้งเฟรม

- ถ้าไม่ว่าง ก็จะรอก่อนค่อยส่ง

- อย่าเข้าไปขัดคนอื่น !

การชนกันของ CSMA

- การชนกันยังอาจเกิดขึ้นอยู่: ดีเลย์ในการส่งข้อมูลหมายถึงสองโหนดไม่ได้รับรู้การส่งของแต่ละฝั่ง
- การชนกัน: สูญเสียเวลาในการส่งแพคเกจทั้งหมด
  - ระยะทาง และดีเลย์มีผลต่อการชนกันของข้อมูล



CSMA/CD (collision detection)

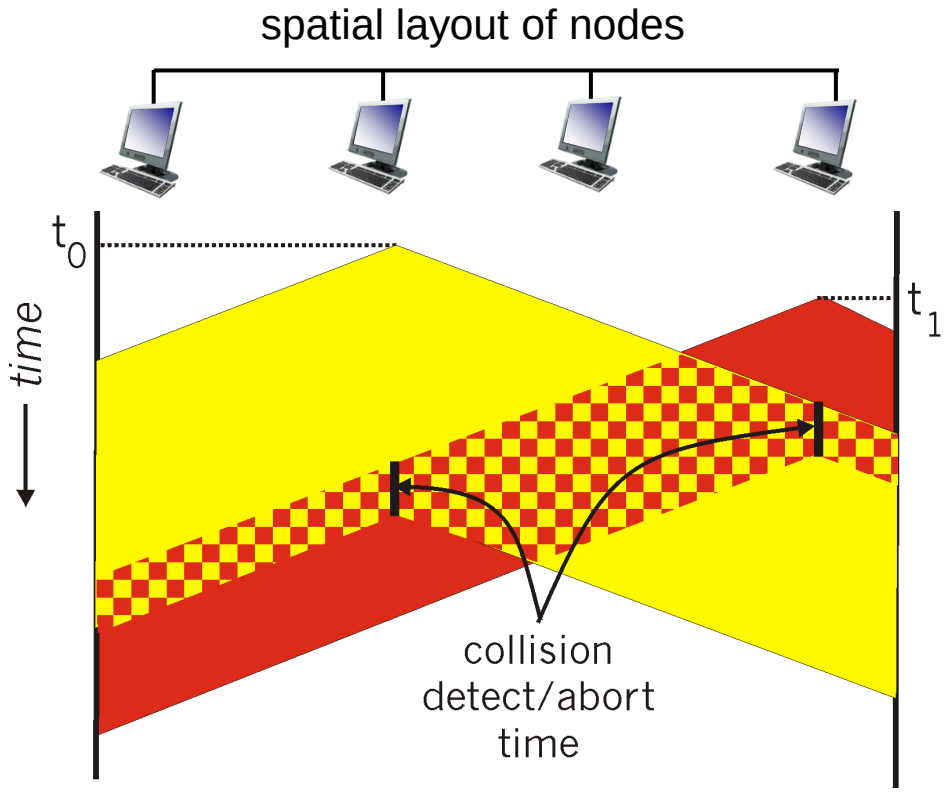
CSMA/CD: มีการตรวจสอบเหมือน CSMA

- พบการชนกันในเวลาอันสั้น
- ยกเลิกการส่ง ลดเวลาที่สูญเสียไป

detect ว่าชนปุ๊ป หยุดส่งทันที จะได้ไม่เสียเวลาเหมือน CSMA คือปล่อยให้ชนจนหมด packet

- collision detection:
  - ง่ายในการส่งแบบสาย: ตรวจสอบความเข้มสัญญาน เปรียบเทียบการส่ง สัญญานที่ได้รับ
  - ยากในการส่งไร้สาย: การได้รับความแรงของสัญญานขึ้นอยู่กับความแรงของการส่ง
- ในภาษาพูด: เป็นการสนทนาแบบสุภาพ

CSMA/CD (collision detection)



Ethernet CSMA/CD algorithm

1. NIC ได้รับดาต้าแกรมจาก network layer, สร้างเฟรม
2. ถ้า NIC ตรวจพบช่องทางการส่งที่ว่าง ก็จะเริ่มการส่ง ถ้า NIC พบกว่าไม่ว่างก็จะรอจนกว่าจะส่างค่อยทำการส่ง
3. ถ้า NIC ส่งทั้งเฟรมไปโดยไม่พบว่าเจอการส่งอีกอัน NIC ถือว่าส่งได้สำเร็จ
4. ถ้า NIC พบการส่งอื่นในขณะที่ทำการส่งก็จะยกเลิกการส่งนั้นแล้วส่งสัญญานไปแจ้งว่าชนกัน
5. หลังจากยกเลิก NIC เข้าสู่ *binary (exponential) backoff:*
   - after *m*th collision, NIC chooses *K* at random from *{0,1,2, …, 2^m-1}*. NIC waits K·512 bit times, returns to Step 2
   - longer backoff interval with more collisions

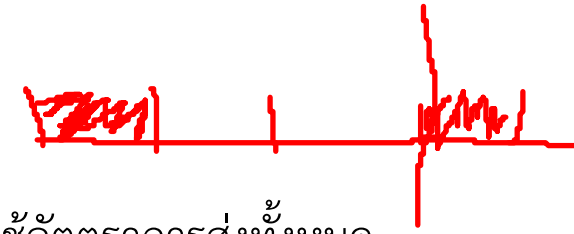
CSMA/CD efficiency (ข้าม)

- T_{prop} = max prop delay between 2 nodes in LAN
- t_{trans} = time to transmit max-size frame

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

- efficiency goes to 1
  - as t_{prop} goes to 0
  - as t_{trans} goes to infinity
- better performance than ALOHA: and simple, cheap, decentralized!

"Taking turns" MAC protocols



แบ่งช่องทางการส่ง MAC protocols:

- แบ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพและยุติธรรมเมื่อมีอัตตราการใช้สูง
- ม่มีประสิทธิภาพเมื่ออัตตราการใช้ต่ำ: เกิดความล่าช้าในการส่ง, ใช้อัตตราการส่งทั้งหมด แม้ว่าจะมีโหนดที่ใช้อยู่พียงโหนดเดียว

แบบสุ่ม MAC protocols

- ทำงานได้ดีเมื่อมีการใช้งานต่ำ : หนึ่งโหนดสามารถใช้ได้เต็มช่องทาง
- เมื่อมีการใช้งานสูง : เกิดการชนการ

"taking turns" protocols

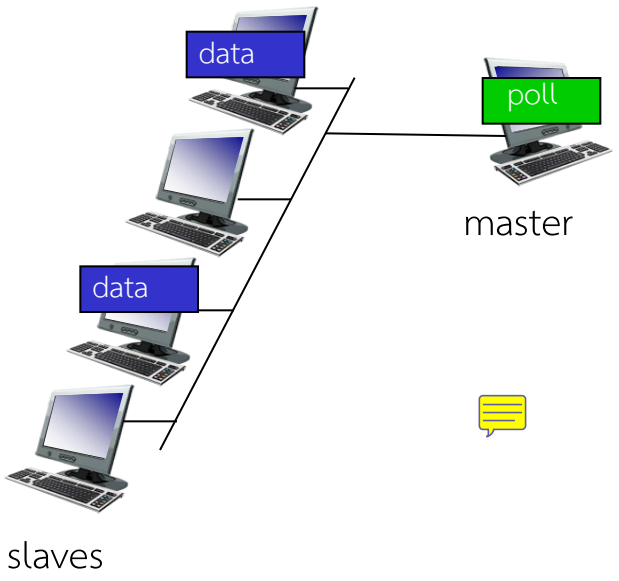
หาวิธีที่ดีที่สุดจากสองแบบ !

โอวเย้

“Taking turns” MAC protocols

polling:

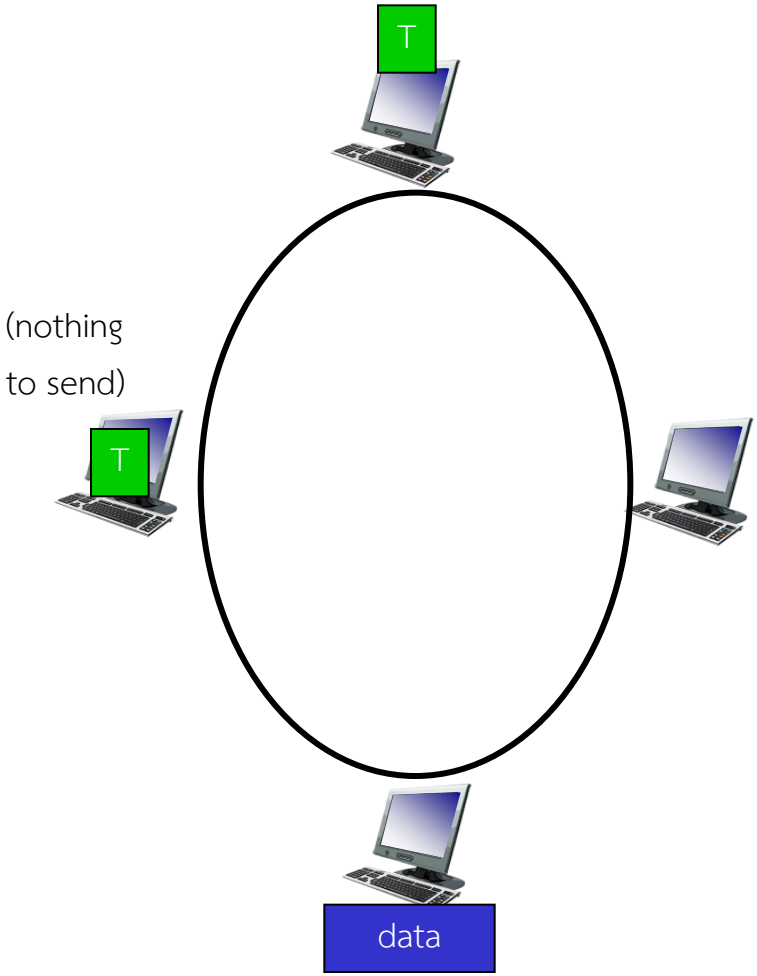
- โหนดตรงกลางจะเรียกโหนดลูกว่าถึงเวลาส่ง
- ส่วนมากใช้กับอุปกรณ์ลูกที่ความสามารถต่ำ
- ข้อเสีย:
  - ต้องมีการ polling
  - เกิดความล่าช้า
  - ถ้ามาสเตอร์เสียก็จะทำให้ส่งไม่ได้เลย



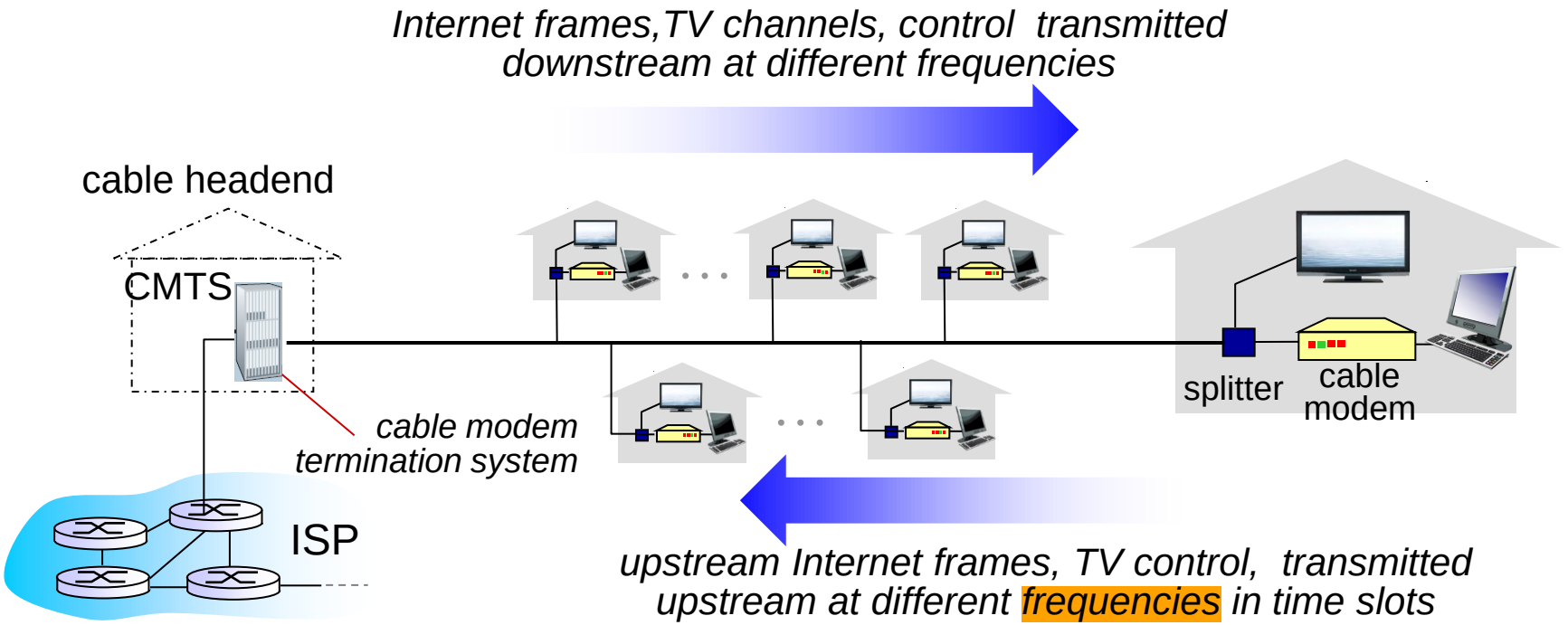
“Taking turns” MAC protocols

token passing:

- ควบคุมการส่งผ่าน token จากโหนดนึงไปยังอีกโหนดนึง
- ข้อวคาม Token
- ข้อเสีย:
  - ต้องส่ง token
  - เกิดความล่าช้า
  - ถ้าเกิดความเสียบตรงตรงโหนดที่มี token

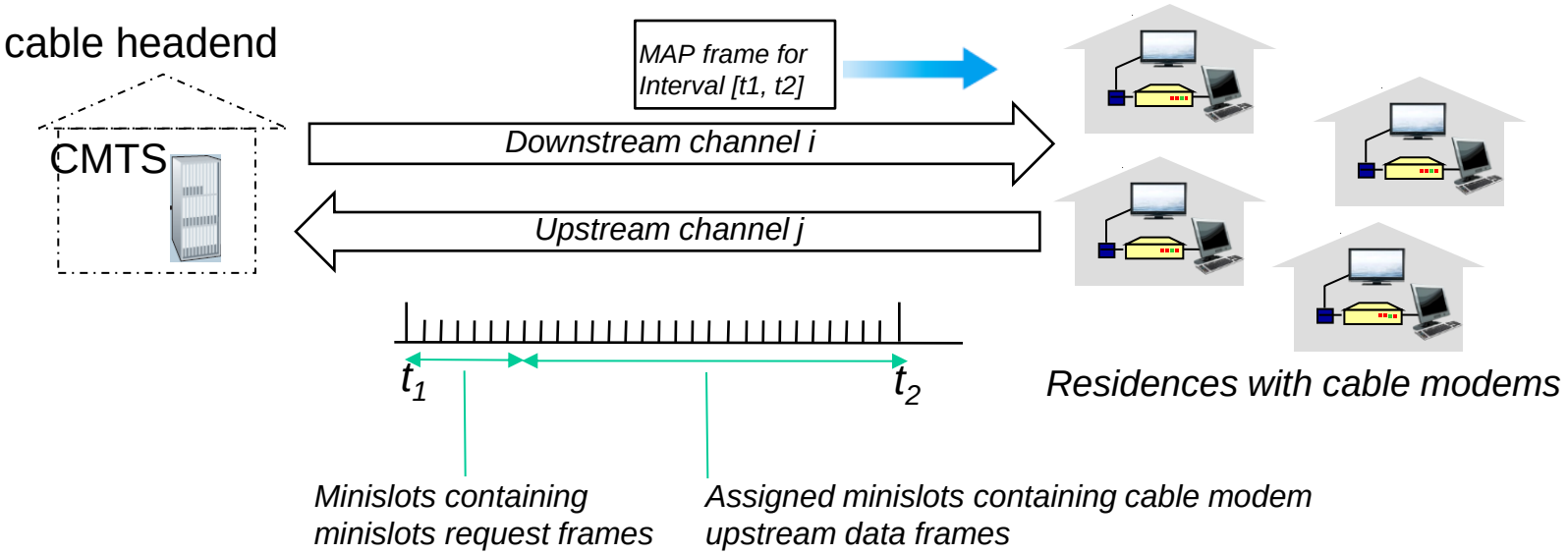


Cable access network (ข้าม)



- *multiple* 40Mbps downstream (broadcast) channels
  - single CMTS transmits into channels
- *multiple* 30 Mbps upstream channels
  - *multiple access: all* users contend for certain upstream channel time slots (others assigned)

Cable access network (ข้าม)



DOCSIS: data over cable service interface spec

- FDM over upstream, downstream frequency channels
- TDM upstream: some slots assigned, some have contention
  - downstream MAP frame: assigns upstream slots
  - request for upstream slots (and data) transmitted random access (binary backoff) in selected slots

multiple access protocol

Summary of MAC protocols

- *channel partitioning,* แบ่งโดยเวลา แบ่งโดยความถี่ แบ่งโดยโค้ด
  - Time Division, Frequency Division
- *random access* (เป็นการสุ่ม),
  - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
  - carrier sensing: ง่ายในบางเทคโนโลยี(แบบมีสาย), ยากในแบบอื่น(ไร้สาย)
  - CSMA/CD ถูกใช้ใน Ethernet
  - CSMA/CA ถูกใช้ใน802.11
- *taking turns*
  - polling จากส่วนกลาง, มีการส่ง token
  - bluetooth, FDDI, token ring

Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

id เครื่อง

MAC addresses and ARP

32-bit IP address:

- *เป็นที่อยู่ (ของ network-layer)* สำหรับแต่ละ interface (หรือ แต่ละ LAN card)
- ใช้สำหรับส่งต่อข้อมูลใน layer 3 (network layer)

MAC (or LAN or physical or Ethernet) address:

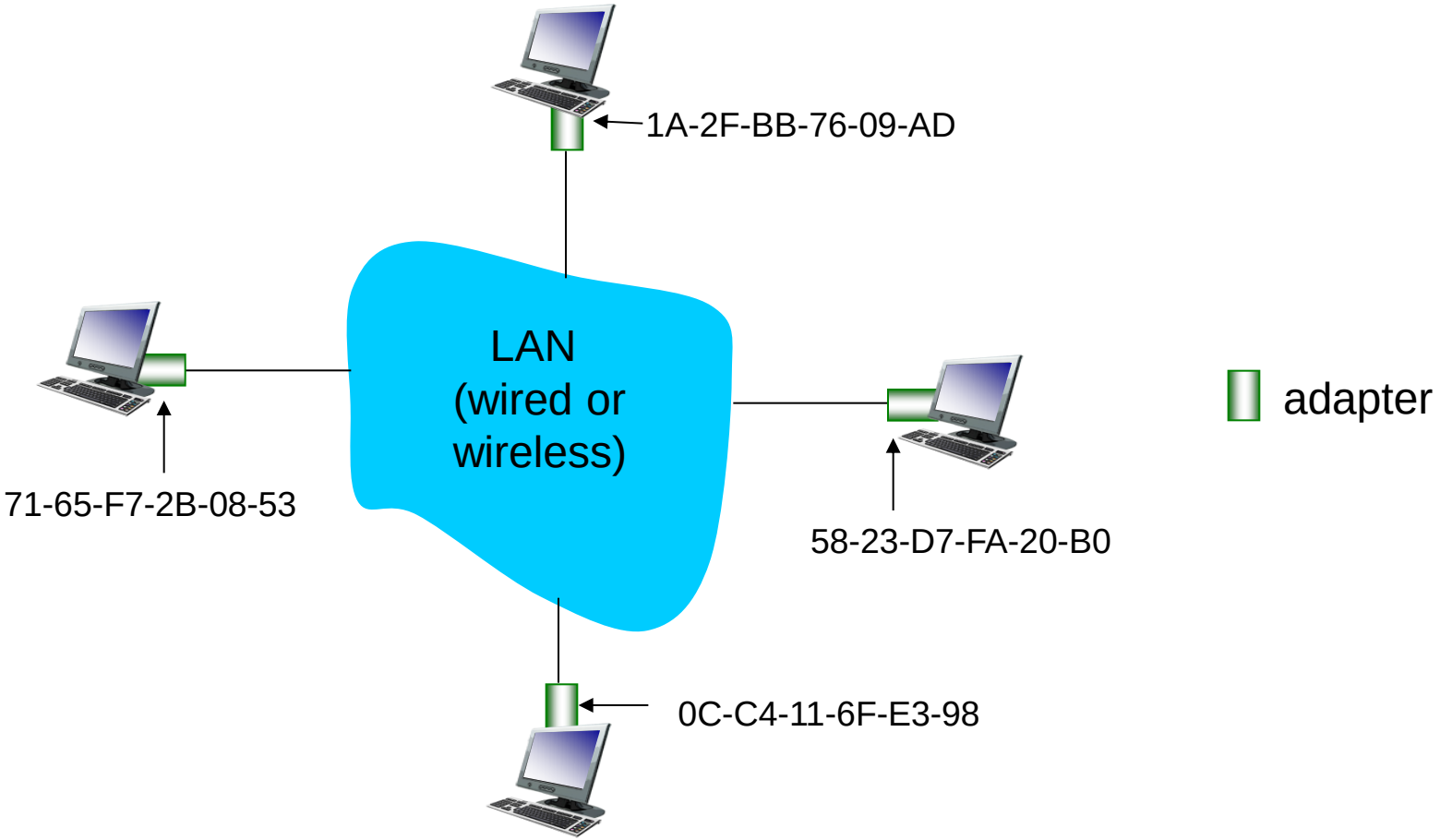
- การใช้งาน: ใช้ทั่วไปเพื่อที่จะรับเฟรมจากอินเทอเฟสนึงไปยังอีกอินเทอเฟสที่เชื่อมต่อกันทางกายภาพ
- 48 bit MAC address (สำหรับแลนส่วนมาก) ถูกเขียนลงในรอมของ NIC , บางครั้งสามารถเซตได้จากตัวซอฟท์แวร์
- e.g.: 1A-2F-BB-76-09-AD

hexadecimal (base 16) ข้อสังเกต

(แต่ละหมายเลขแสดงถึง 4 bits)

LAN addresses and ARP

แต่ละแลนอแดปเตอร์มีที่อยู่ของตัวเอง

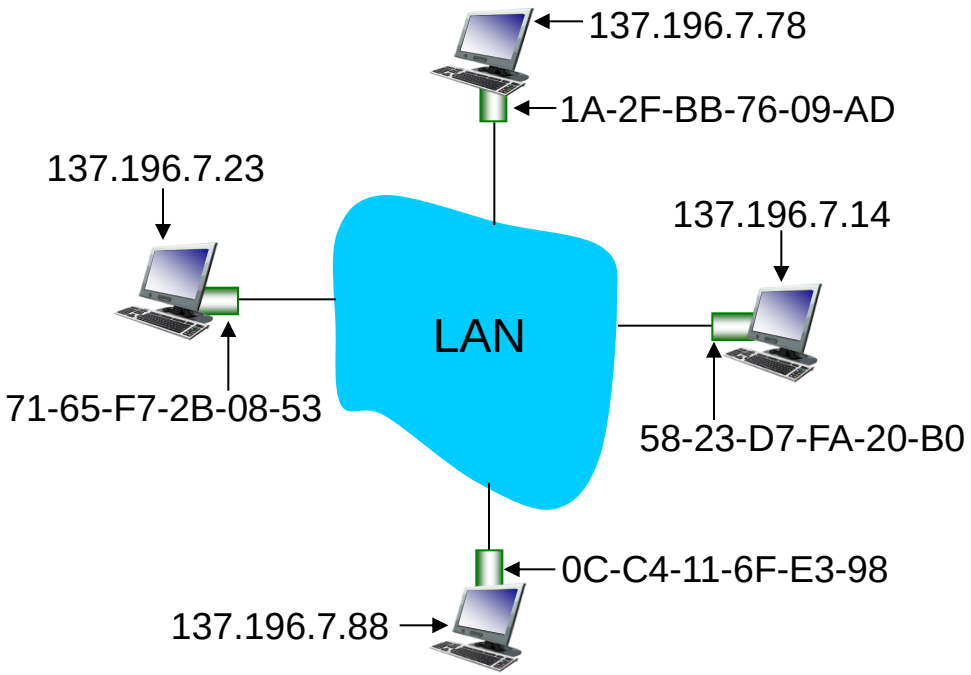


LAN addresses (more)

- MAC address ถูกกำหนดโดย by IEEE
- บริษัทผู้ผลิตซื้อชุดของ MAC address เพื่อรับประกันว่าจะไม่ซ้ำกัน
- analogy:
  - MAC address: เหมือนกับเลขบัตรประชาชน
  - IP address: ที่อยู่ตามบ้าน
- MAC flat address ➜ ไปที่ไหนก็ได้
  - สามารถย้ายที่ได้
- IP hierarchical address *ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้*
  - เพราะว่าที่อยู่ไอพีแอดเดรสจะต้องขึ้นอยู่กับซับเน็ทนั้นๆ

ARP: address resolution protocol

คำถาม: เราจะรู้ MAC address ได้อย่างไรด้วย IP Address ?



ARP table: แต่ละโหนดไอพี(host, router) มีตาราง

- IP/MAC address จับคู่กันสำหรับบางโหนด:

< IP address; MAC address; TTL>

- TTL (Time To Live): เวลาก่อนที่จะหมดอายุในการจำเลข mac address กับ ip (โดยทั่วไป 20 min)

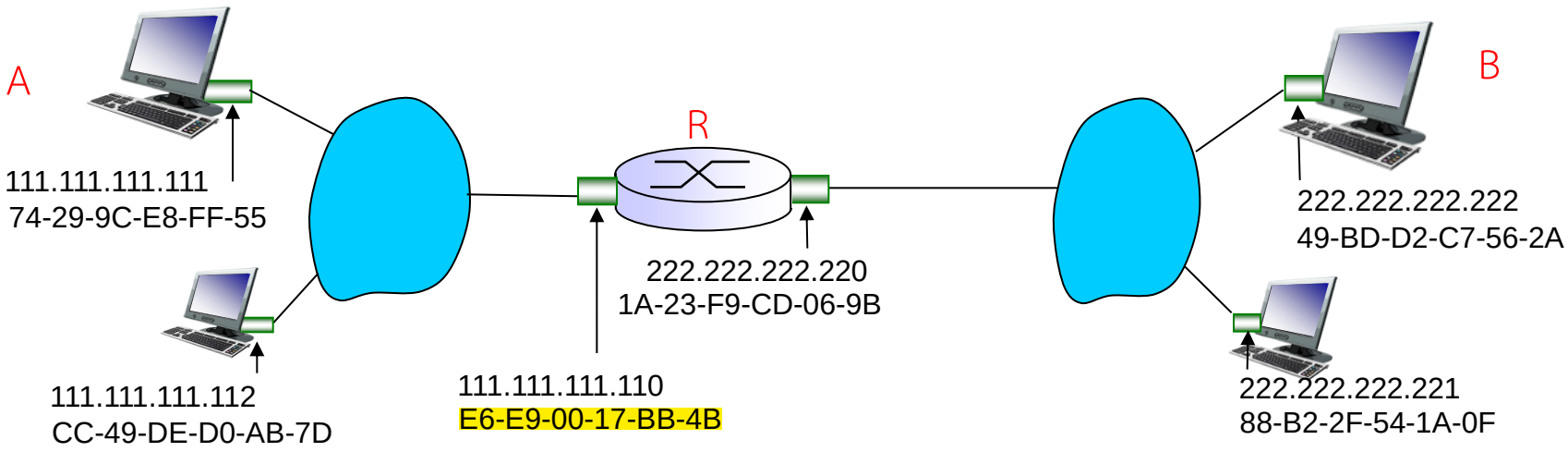
ARP protocol: same LAN

- A ต้องการส่งดาต้าแกรมไปหา B
  - B's MAC address ไม่อยู่ใน A's ARP table.
- A broadcasts ARP query packet, containing B's IP address
  - dest MAC address = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - ทุกๆโหนดในวงแลนจะได้รับ
- B รับแพคเกจ ARP , ตอบกลับไปยัง A ด้วย (B's) MAC address
  - ข้อมูลส่งไปยัง A's MAC address (unicast)
- แคชจะเก็บตารางไว้จนกว่าจะหมดเวลา
  - soft state: ข้อมูลจะค่อยๆหมดเวลาลงไปเรื่อยๆยกเว้นจะได้รับใหม่อีกรอบ information that times out (goes away) unless refreshed
- ARP เป็นแบบ “plug-and-play”:
  - โหนดจะสร้างตาราง arp ของตัวเองโดนแอดมินไม่ต้องจัดการ

Addressing: routing to another LAN

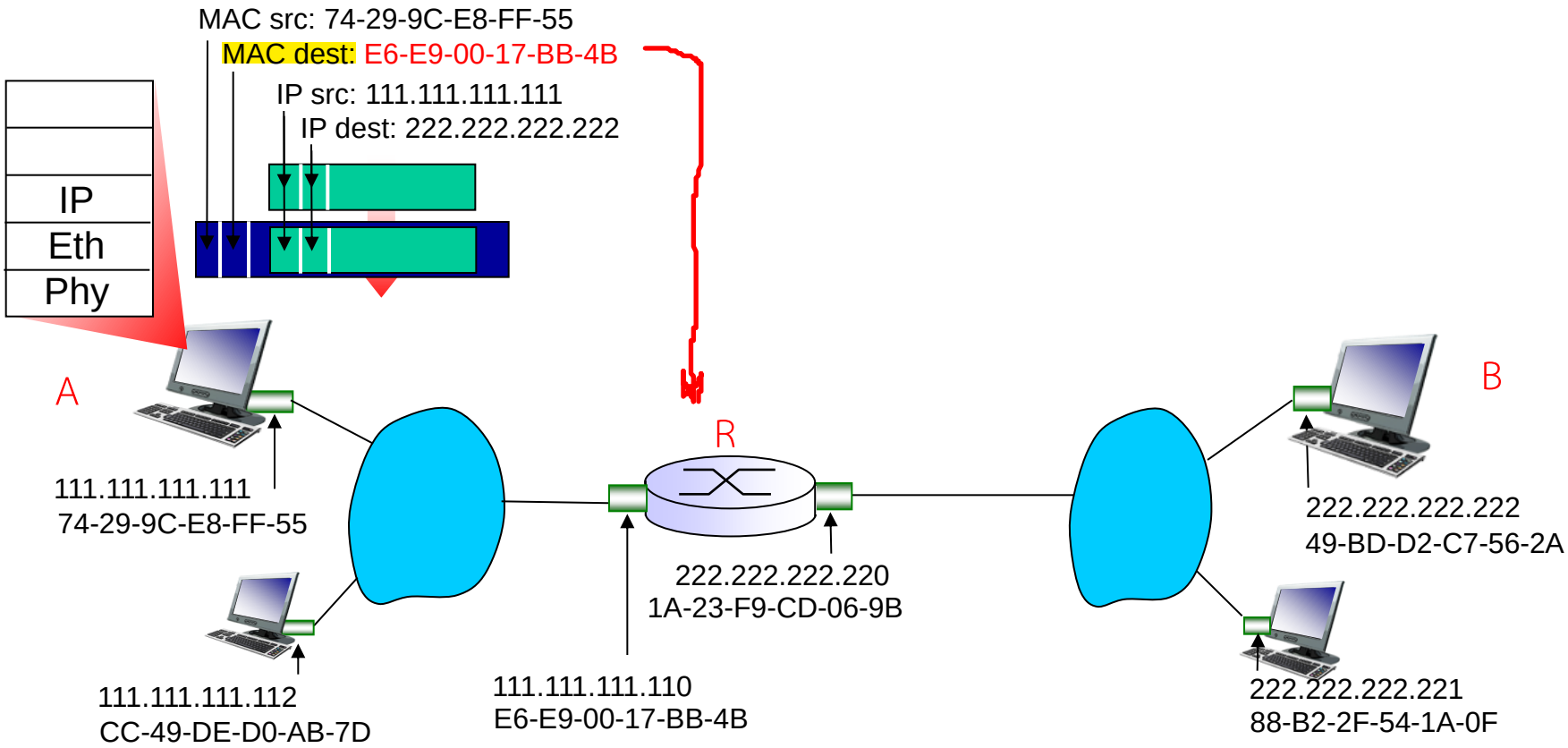
walkthrough: **ส่งข้อมูลจาก A ไปยัง B ผ่านทาง R**

- focus on addressing – at IP (datagram) and MAC layer (frame)
- สมมติว่า A รู้ B's IP address
- สมมติว่า A รู้ IP address ของ router แรก , R (ได้อย่างไร?)
- สมมติว่า A รู้ R's MAC address (ได้อย่างไร?)



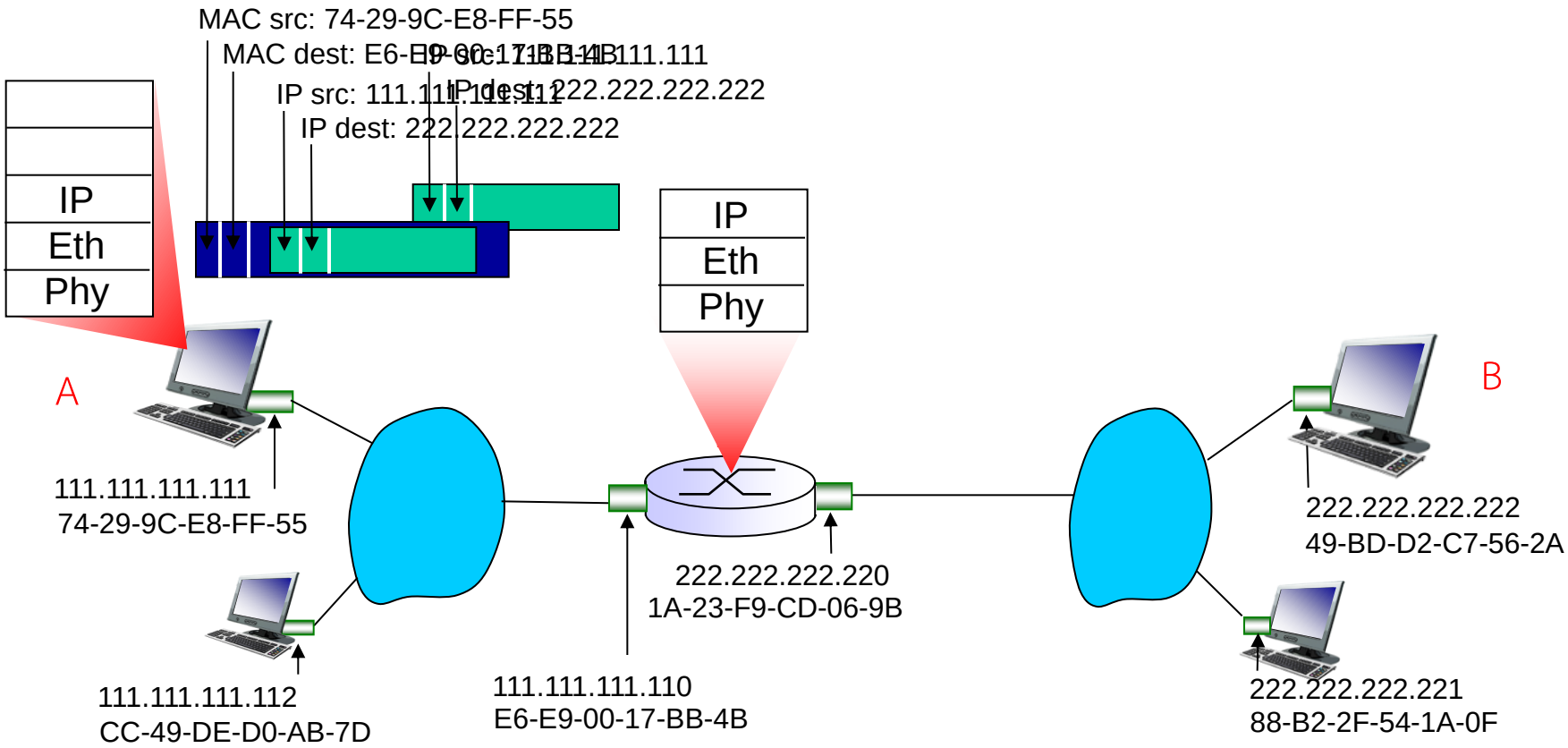
Addressing: routing to another LAN

- A สร้างข้อมูลด้วย source A, destination B
- A สร้างเฟรมการเชื่อมต่อด้วย R's MAC address เป็นปลายทาง, เฟรมจะมีข้อมูล A-to-B IP datagram



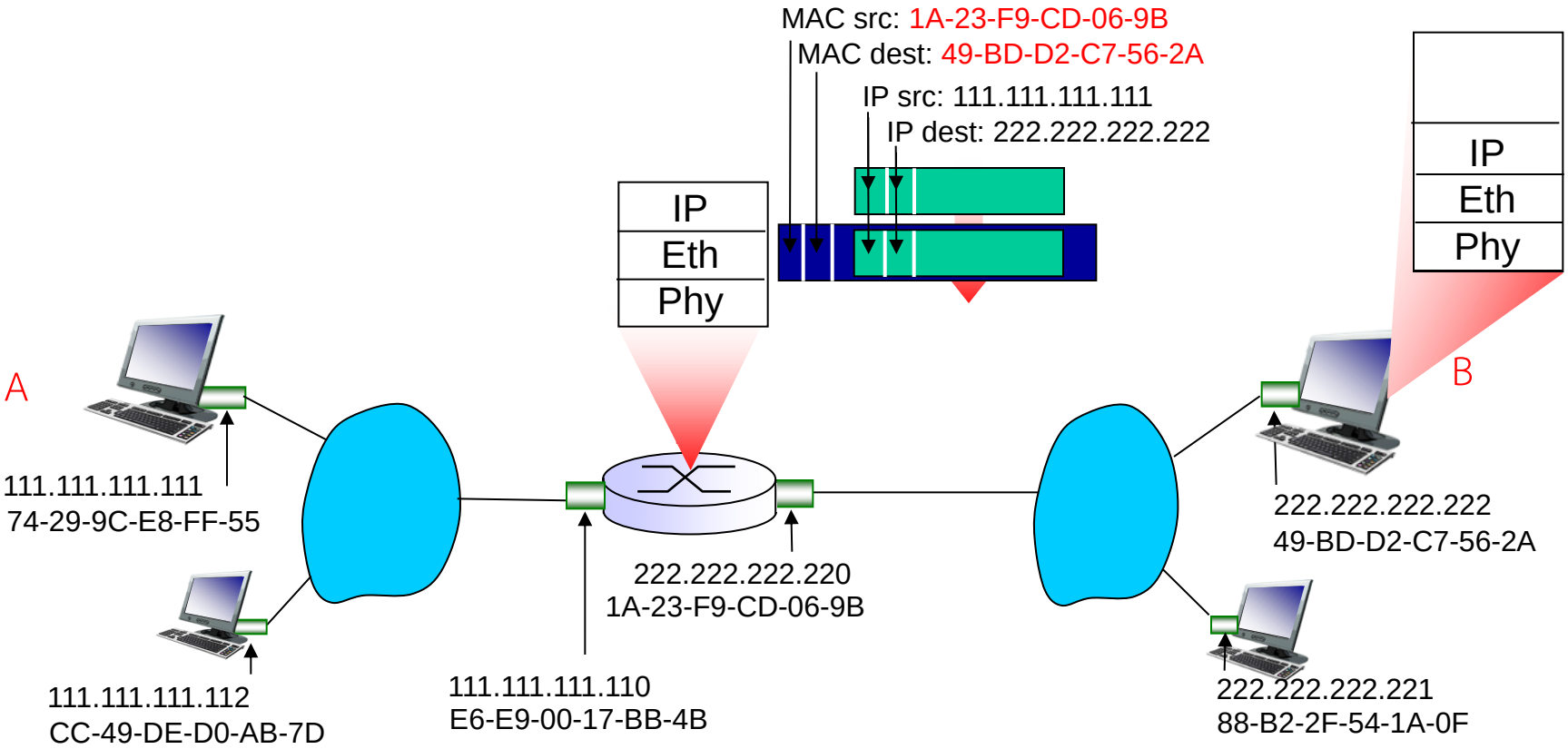
Addressing: routing to another LAN

- frame sent from A to R
- frame received at R, datagram removed, passed up to IP



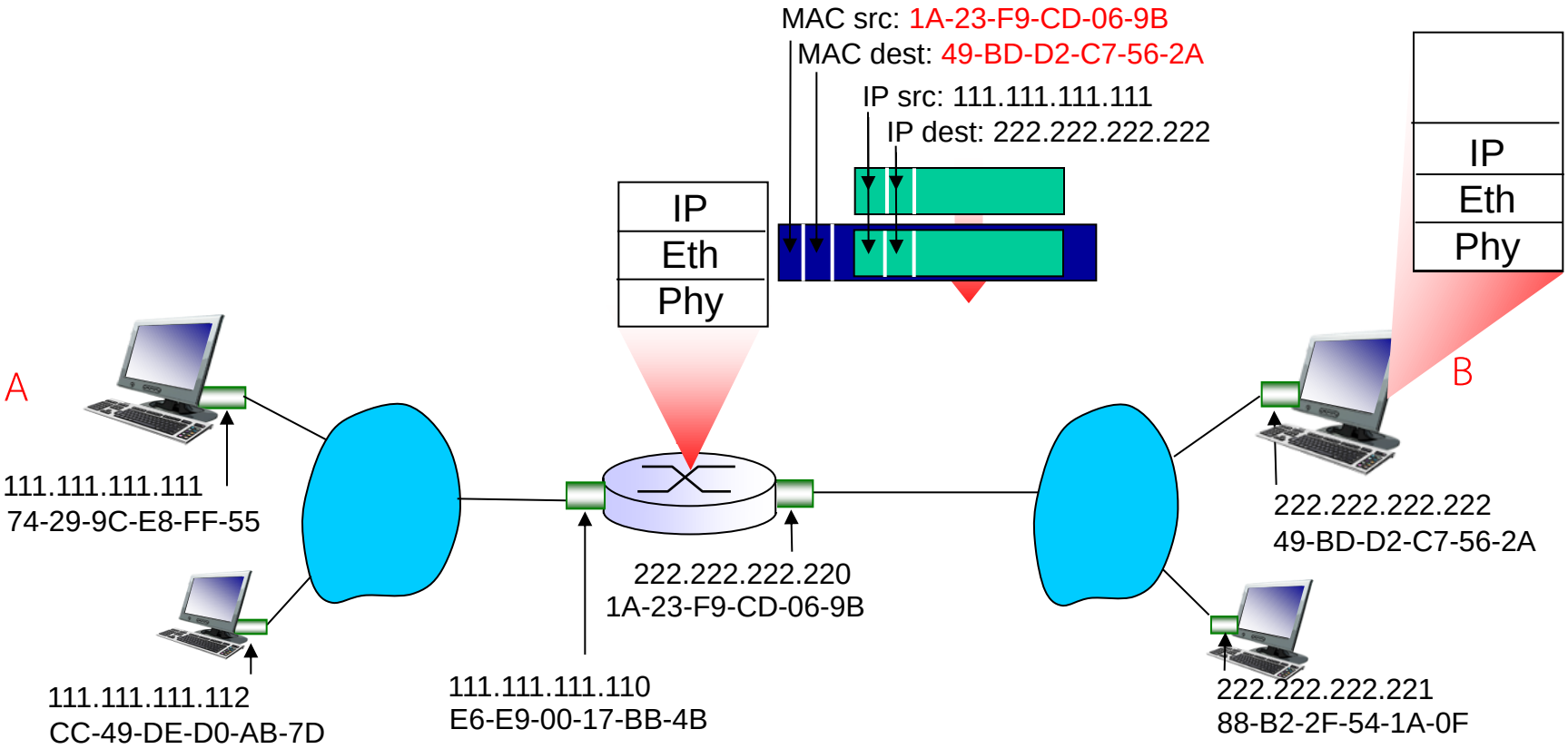
Addressing: routing to another LAN

- R forwards datagram with IP source A, destination B
- R creates link-layer frame with B's MAC address as dest, frame contains A-to-B IP datagram



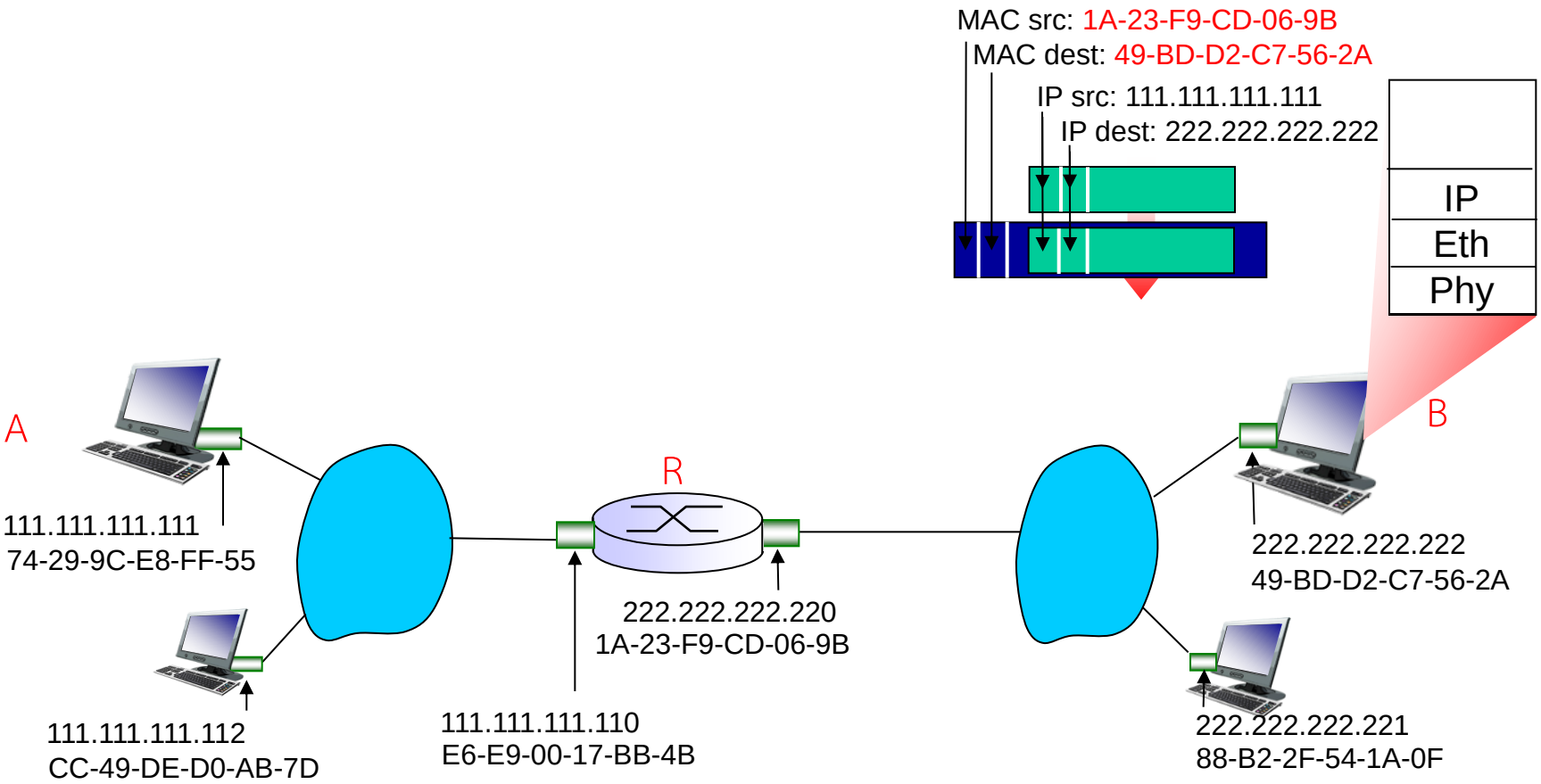
Addressing: routing to another LAN

- R forwards datagram with IP source A, destination B
- R creates link-layer frame with B's MAC address as dest, frame contains A-to-B IP datagram



Addressing: routing to another LAN

- R forwards datagram with IP source A, destination B
- R creates link-layer frame with B's MAC address as dest, frame contains A-to-B IP datagram



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

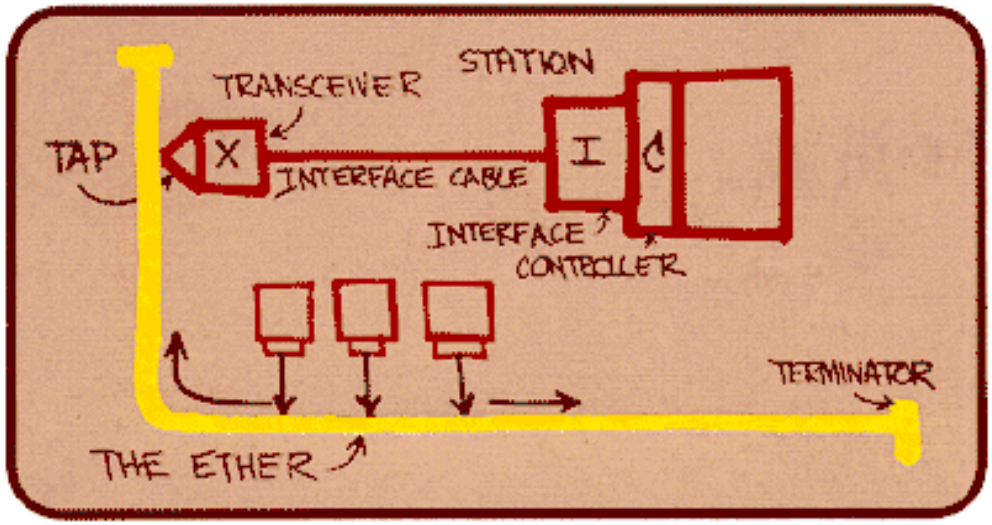
5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

Ethernet

“เป็นที่นิยม” ในเทคโนโลยีระแบบสาย:

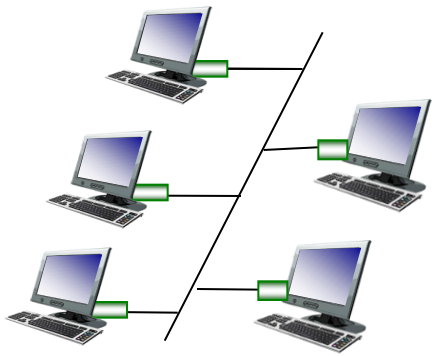
- ราคาถูก
- ใช้เป็นวงกล้างในตอนเริ่มต้น
- ง่ายและถูกว่า token LANs and ATM
- มีความเร็วสูง : 10 Mbps – 10 Gbps



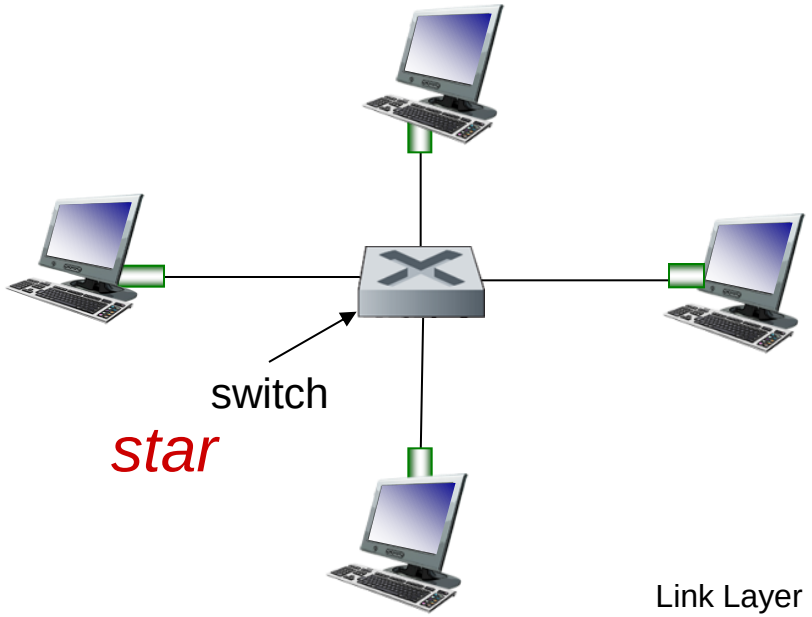
Metcalfe’s Ethernet sketch

Ethernet: physical topology

- *bus:* แพร่หลายในช่วงกลางทศวรรษ 90
  - โหนดทั้งหมดจะมีโดเมนเดียวกันซึ่งชนกันได้
- *star:* ปัจจุบัน
  - มี *switch* อยู่ตรงกลาง
  - แต่ละโหนดมีโปรโตคอลเป็นของเป็นของตัวเองซึ่งลดการชนกันได้พอสมควร



bus: coaxial cable

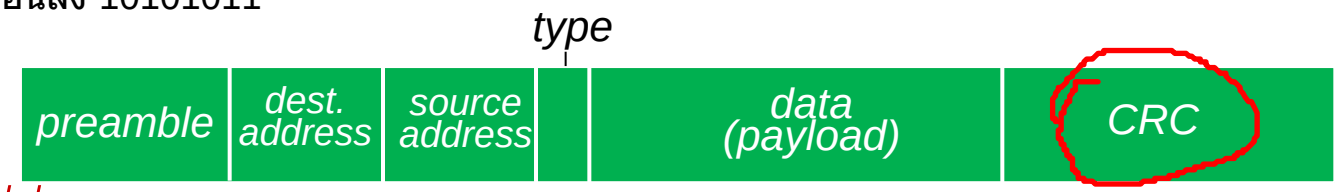


star

Ethernet frame structure (ข้าม)

ลักษณธของแพคเกจที่ถูกห่อหุ้มลงไปใน Ethernet frame

แปะไบต์ก่อนส่ง 10101011

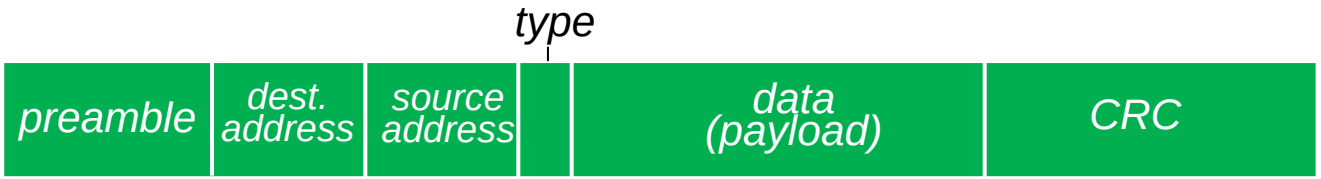


preamble:

- 7 bytes with pattern 10101010 followed by one byte with pattern 10101011
- used to synchronize receiver, sender clock rates

Ethernet frame structure (more) (ข้าม)

- *addresses:* **มี 6** byte s, destination MAC addresses
  - ถ้าอแดปเตอร์ได้รับเฟรมที่มีปลายทางตรงกันเช่น arp packet โหนดทุกโหนดก็จะได้รับข้อความมา
  - ถ้าไม่เกี่ยวข้องก็ทิ้งไป
- *type:* **ชนิดของเลเยอร์ด้านบน**ndicates higher layer protocol (mostly IP but others possible, e.g., Novell IPX, AppleTalk)
- *CRC:* cyclic redundancy **ตรวจสอบที่ปลายทาง**
  - พบความเสียหาย : แพคเกจจะถูกทิ้งไป

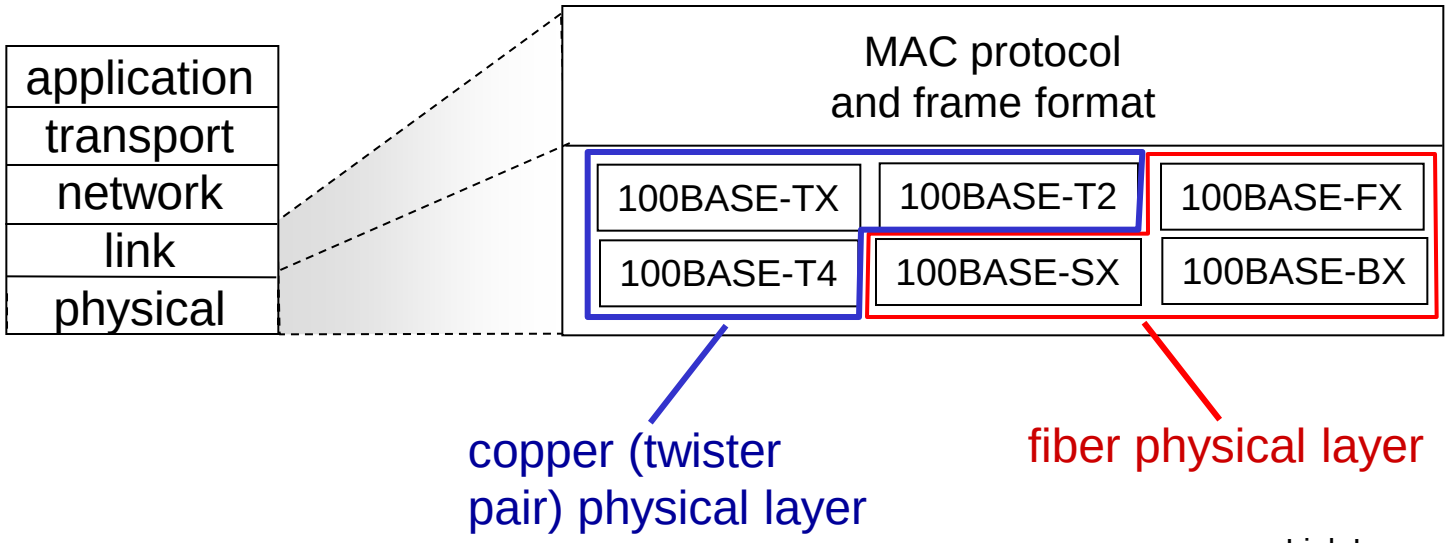


Ethernet: unreliable, connectionless

- *connectionless:* n**ไม่มีการเชื่อมต่อ** handshaking **ระหว่างผู้ส่งและผู้รับ**ding and receiving NICs
- *unreliable:* **ผู้รับ ผู้ส่งไม่มีการส่ง** ack nak
  - data in dropped frames recovered only if initial sender uses higher layer rdt (e.g., TCP), otherwise dropped data lost
- Ethernet's MAC protocol: unslotted *CSMA/CD wth binary backoff*

802.3 Ethernet standards: link & physical layers

- *มีหลายความเร็ว*
  - มีโปรโตคอลที่เหมือนกัน
  - ความเร็วแตกต่างกันไป: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
  - มีลักษณะแตกตางกันไป : fiber, cable



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

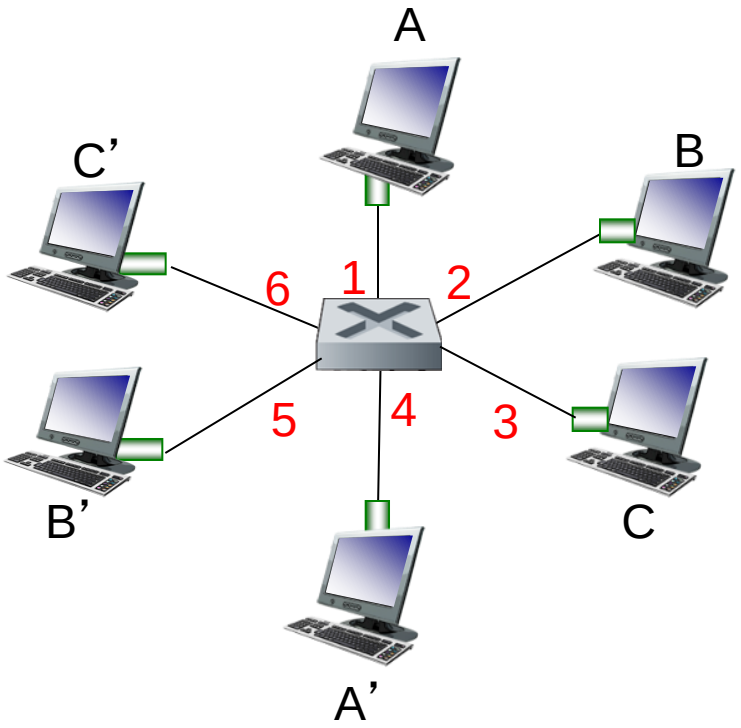
5.7 a day in the life of a web request

Ethernet switch

- link-layer device: บทบาทและหน้าที่หลัก
  - รับและส่งต่อข้อมูล
  - ตรวจสอบ frame's MAC address ที่ได้รับ , เลือกส่งข้อมูลไป หนึ่งที่หรือมากกว่าที่ลิงค์ขาออก เมื่อข้อมูลนั้นมีการส่งต่อ
- *transparent*
  - เครื่องปลายทางไม่รับรู้ว่ามี switch อยู่ระหว่างทาง
- *plug-and-play, self-learning*
  - switch ไม่ต้องการการตั้งค่า

Switch: *multiple* simultaneous transmissions

- แต่ละเครื่องมีการเชื่อมต่อของตัวเองhosts have dedicated, direct connection to switch
- switchจะสำรองข้อมูลไว้
- ทุกเครื่องจะมีโปรโตคอลของตัวเองในการเชื่อมต่อ ข้อมูลจะไม่ชนกัน; full duplex
- *switching:* A-to-A' และ B-to-B' สามารถส่งได้พร้อมกันโดยไม่ชนกัน

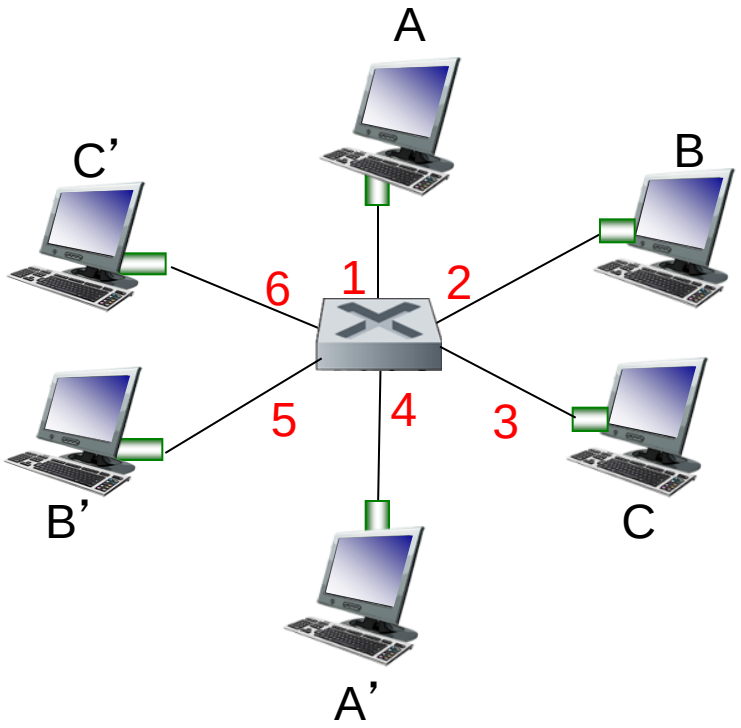


switch with six interfaces (1,2,3,4,5,6)

Switch forwarding table

Q: switch จะรู้ได้อย่างไรว่า A จะส่งไป B ผ่านทางอินเทอเฟส 4 และไปถึง B ผ่านทางอินเทอเฟส 5?

- A: *แต่ละ switch จะมี switch table:*
  - *(MAC address of host, interface to reach host, time stamp)*
  - *looks like a routing table!*



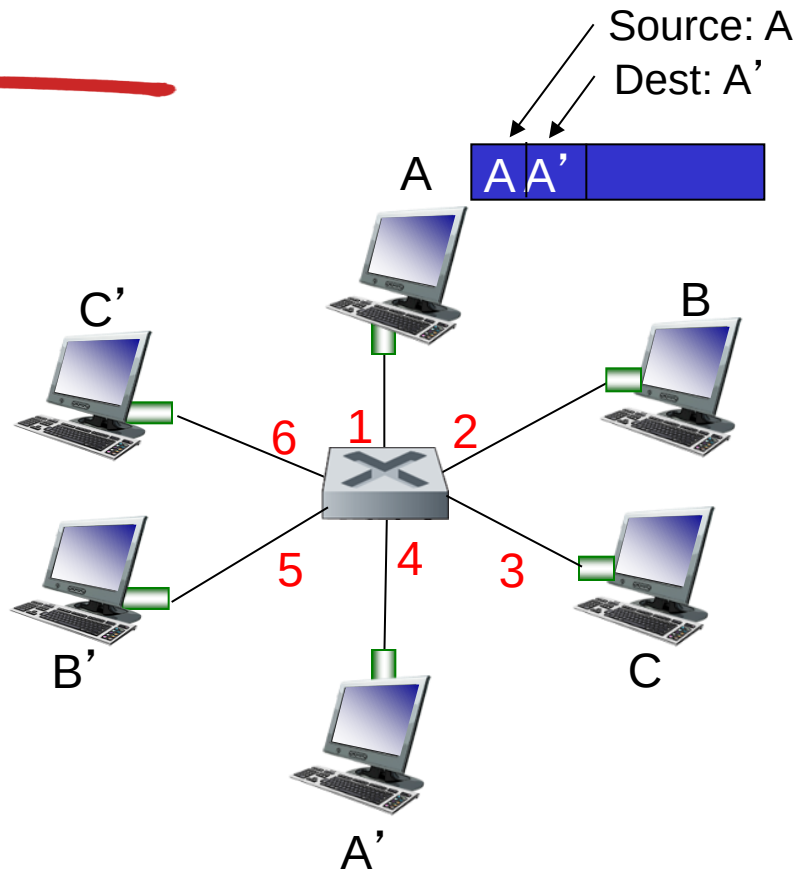
switch with six interfaces (1,2,3,4,5,6)

Q: *how are entries created, maintained in switch table?*

- *something like a routing protocol?*

Switch: self-learning

- switch *learns* which hosts can be reached through which interfaces
  - when frame received, switch "learns" location of sender: incoming LAN segment
  - records sender/location pair in switch table



MAC addr	interface	TTL
A	*1*	*60*

Switch table (initially empty)

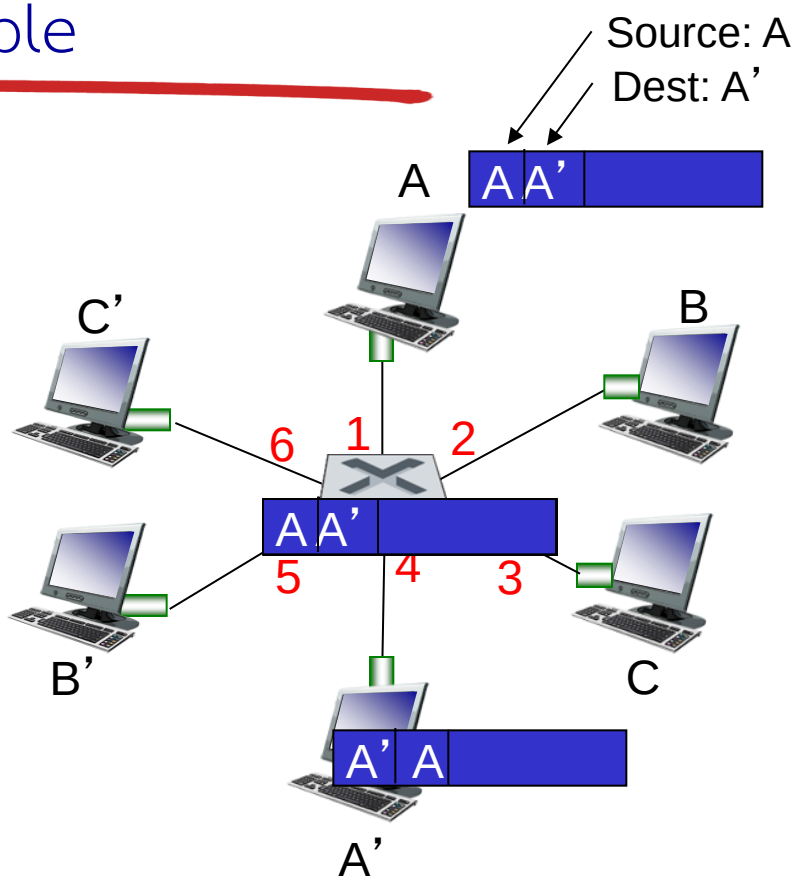
Switch: frame filtering/forwarding

เมื่อสวิชได้รับเฟรม:

1. จำแมคแอดเดรสของผู้ส่งไว้
2. จัดเรียงแมคแอดเดรสลงในตาราง
3. if entry found for destination
   then {
   if destination on segment from which frame arrived
   then drop frame
   else forward frame on interface indicated by entry
   }
   else flood /* forward on all interfaces except arriving interface */

Self-learning, forwarding: example

- ไม่รู้ที่อยู่ A ก็จะบรอดคาส
- เมื่อรู้ที่อยู่แซ้วก็จะเลือกส่งไปยังลิงค์เดียว

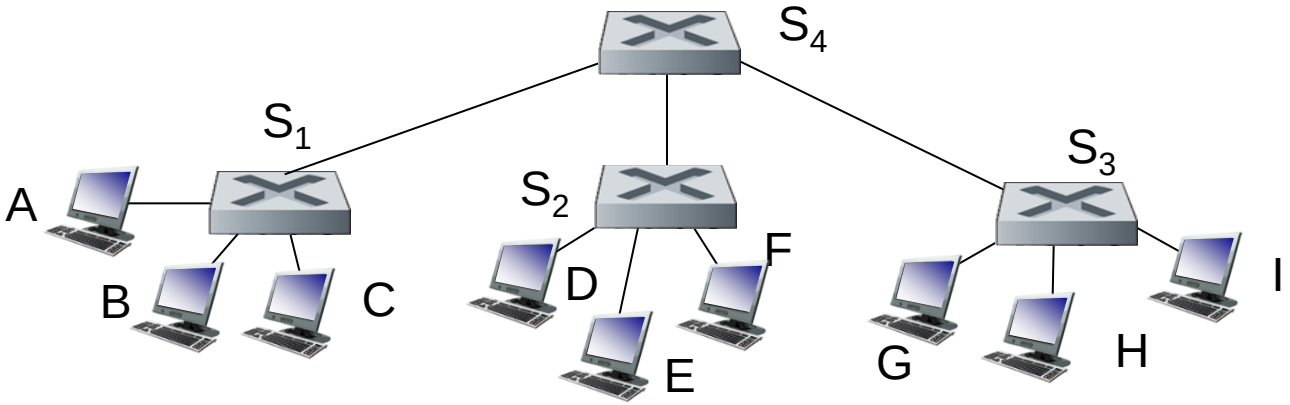


MAC addr	interface	TTL
A	*1*	*60*
A'	*4*	*60*

switch table (initially empty)

Interconnecting switches

- สวิชสามารถเชื่อมต่อกันได้

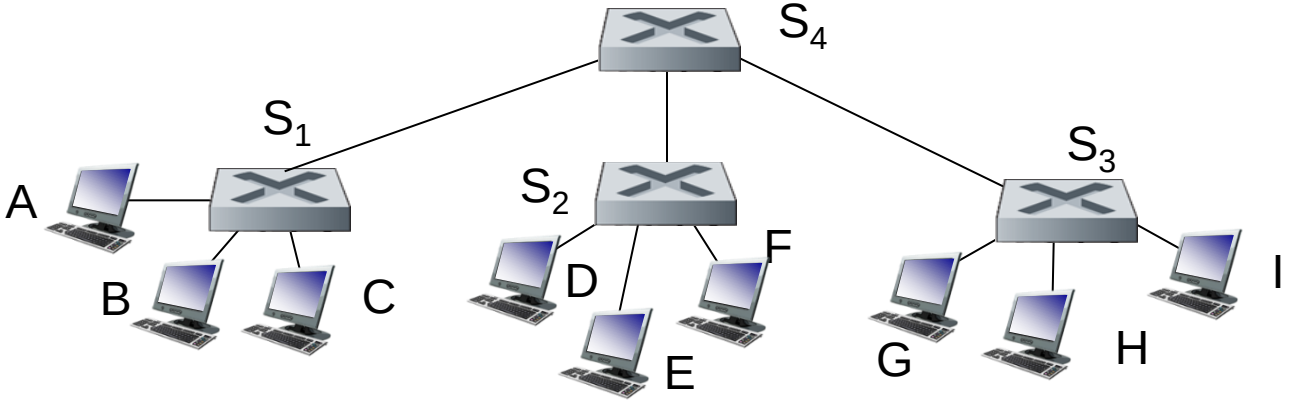


Q: ส่งข้อมูลจาก A ไปยัง G S_1จะรู้ได้อย่างไรว่าจะต้องส่งข้อมูลไปยังปลายทางที่ G ว่าจะผ่าน S_4 หรือ S_3?

- A: เรียนรู้ด้วยตัวเองเหมือนมีสวิชเดียว

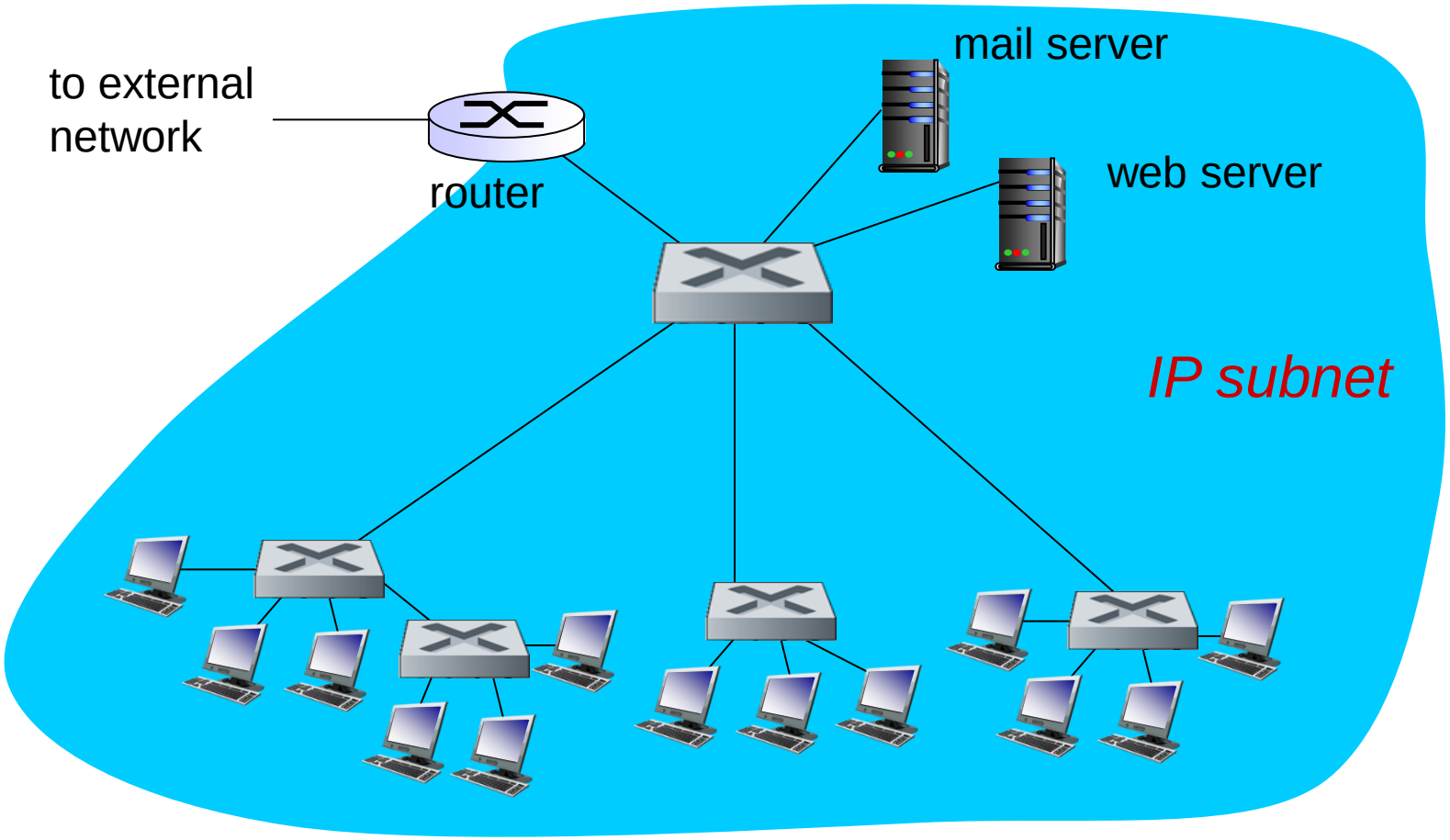
Self-learning multi-switch example

Suppose C sends frame to I, I responds to C



- *Q:* show switch tables and packet forwarding in S_1, S_2, S_3, S_4

Institutional network



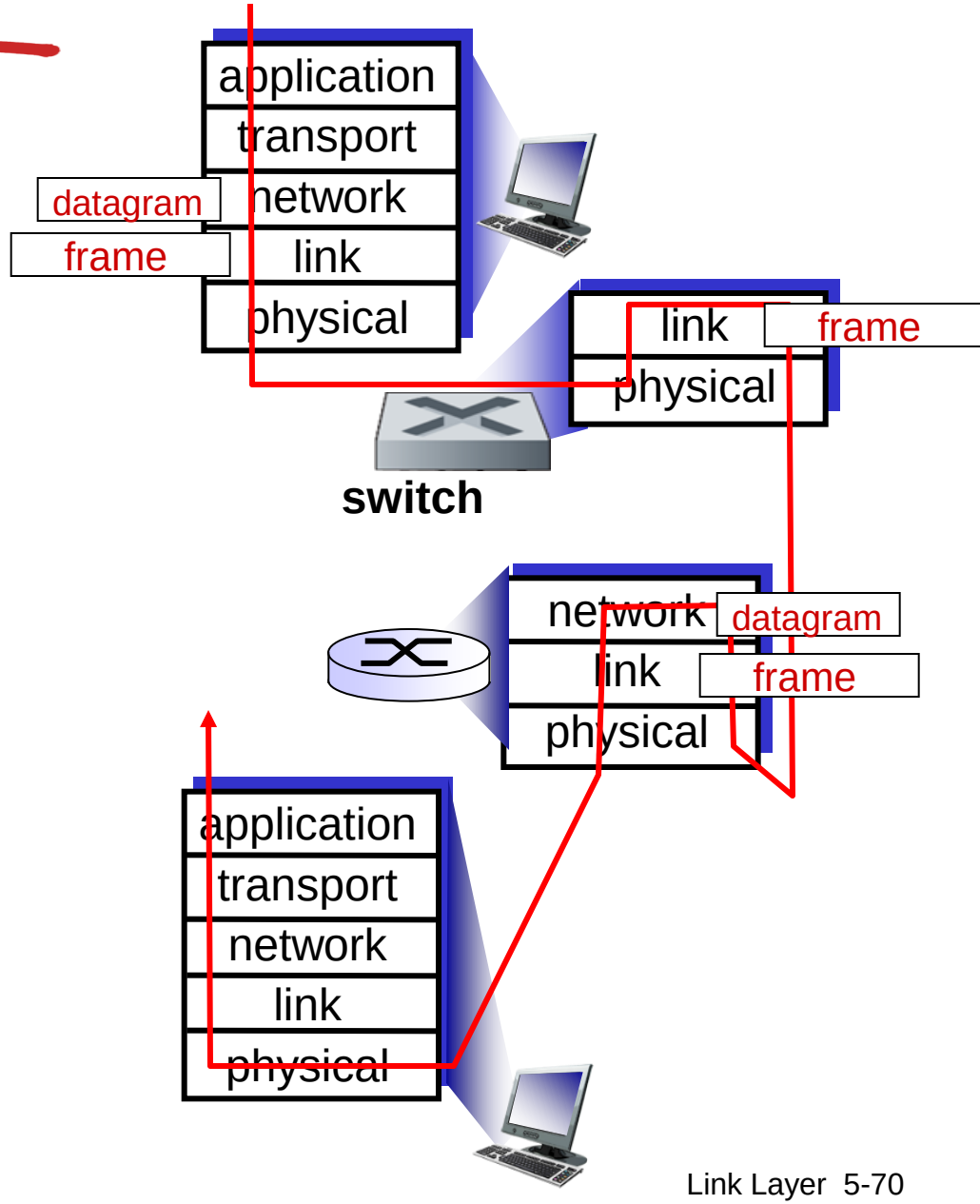
Switches vs. routers

ทั้งสองแบบเป็น store-and-forward:

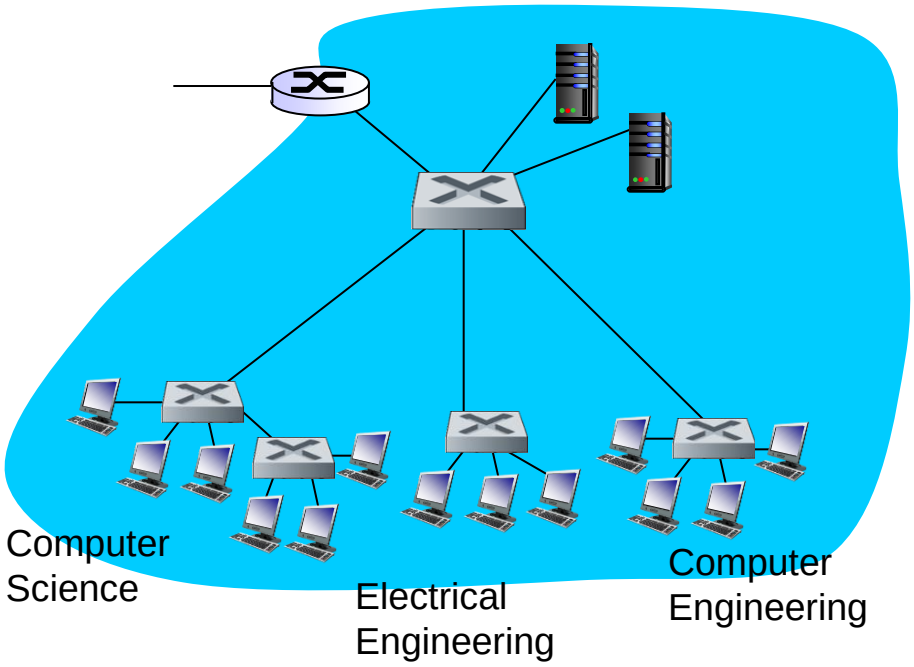
- *routers:* ทเป็นอุปกรณ์เลเยอร์ 3
- *switches: เป็นอุปกรณ์เลเยอร์ 2*

ทั้งคู่มี forwarding tables:

- *routers:* หาเส้นทางการส่งด้วย ip address
- *switches:* หาเส้นทางผ่านทางบรอดคาส ใช้ MAC addresses



VLANs: แรงจูงใจ



consider:

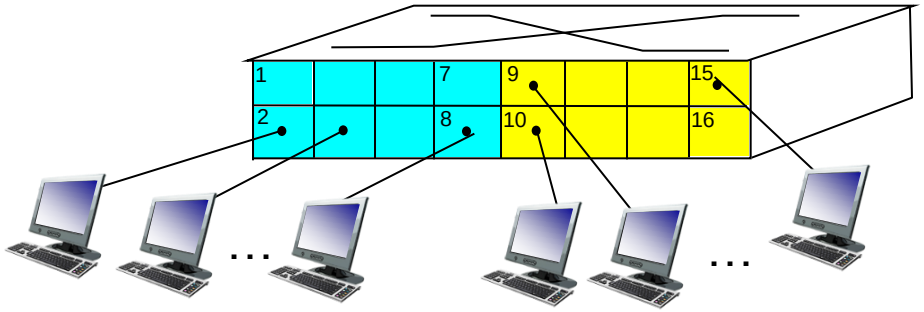
- ผู้ใช้ CS ย้ายออฟฟิตไปยัง EE แต่ยังคงต้องการเชื่อมต่อกับ CS switch
- single broadcast domain:
  - บรอดคาสบนเลเยอร์ 2 ทั้งหมดผ่านทางแลนเดียวกัน (ARP, DHCP, unknown location of destination MAC address)
  - มีความต้องการทางด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพ

VLANs

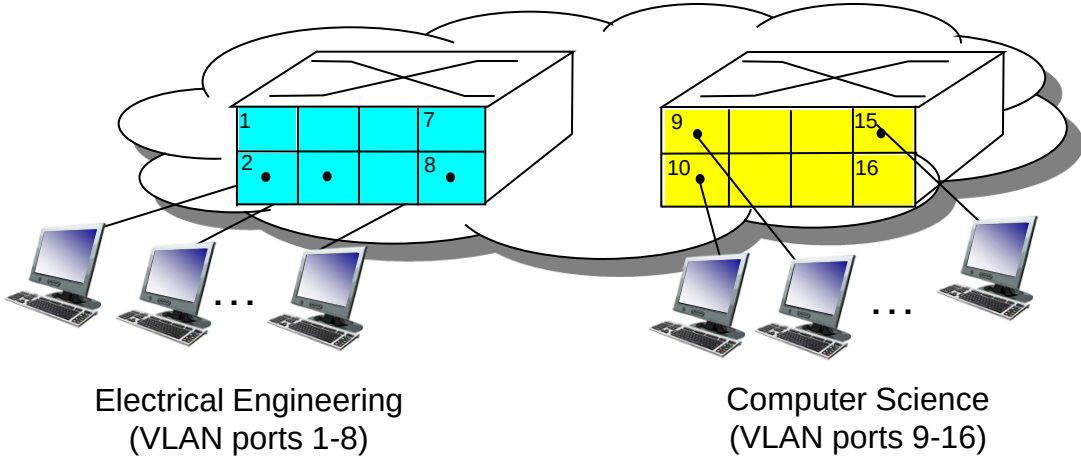
Virtual Local Area Network

switch(es) supporting VLAN capabilities can be configured to define multiple ***virtual*** LANS over single physical LAN infrastructure.

port-based VLAN: switch ports grouped (by switch management software) so that *single* physical switch .....



... operates as *multiple* virtual switches

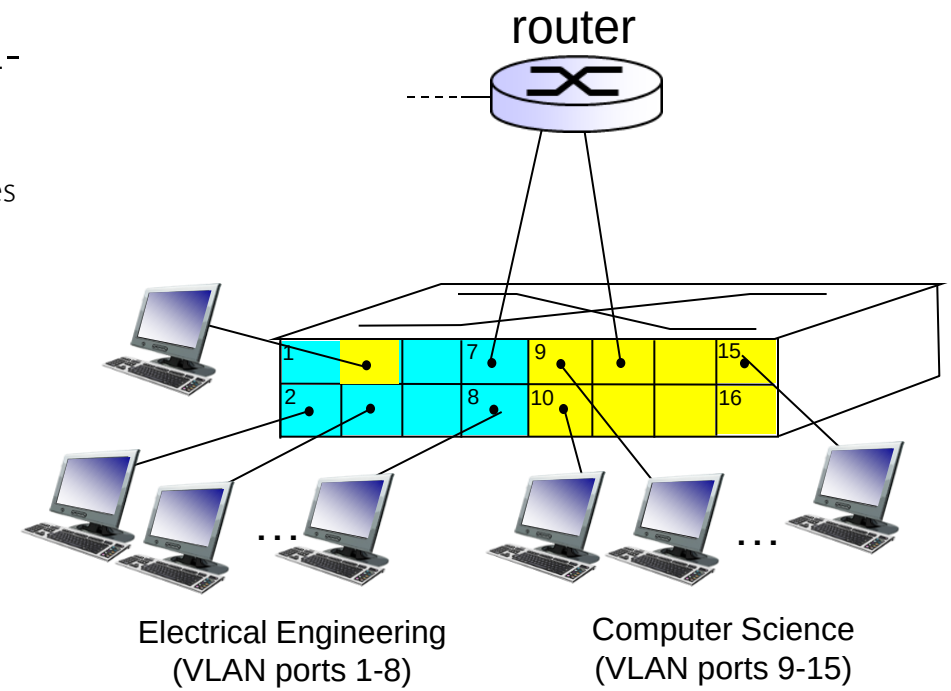


Port-based VLAN

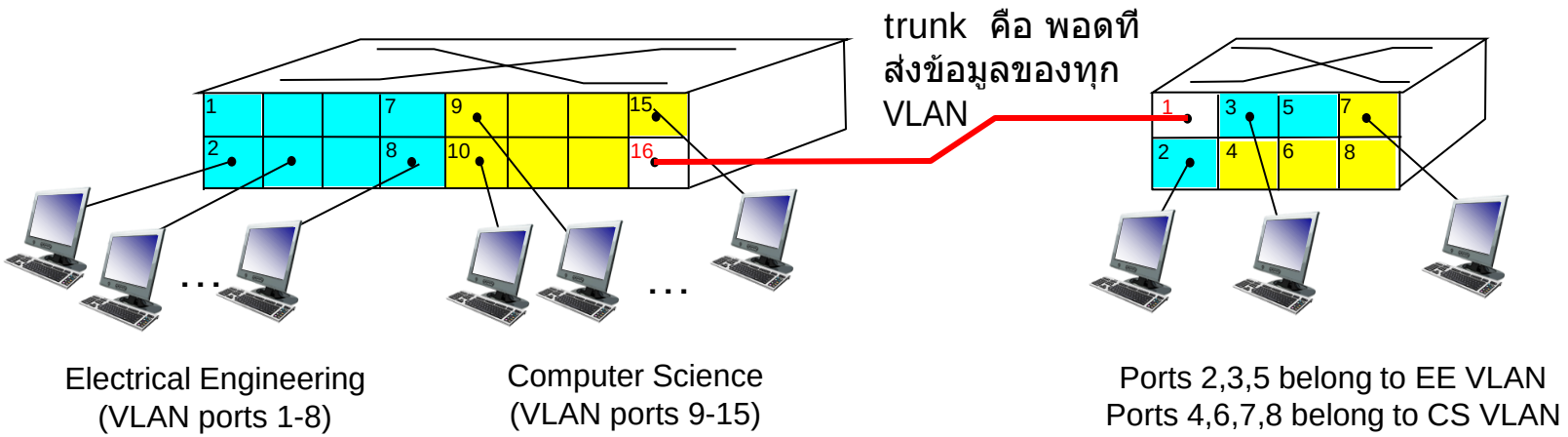
- *traffic isolation:* frames to/from ports 1-8 can *only* reach ports 1-8
  - can also define VLAN based on MAC addresses of endpoints, rather than switch port

- *dynamic membership:* ports can be dynamically assigned among VLANs

- *forwarding between VLANS:* done via routing (just as with separate switches)
  - in practice vendors sell combined switches plus routers

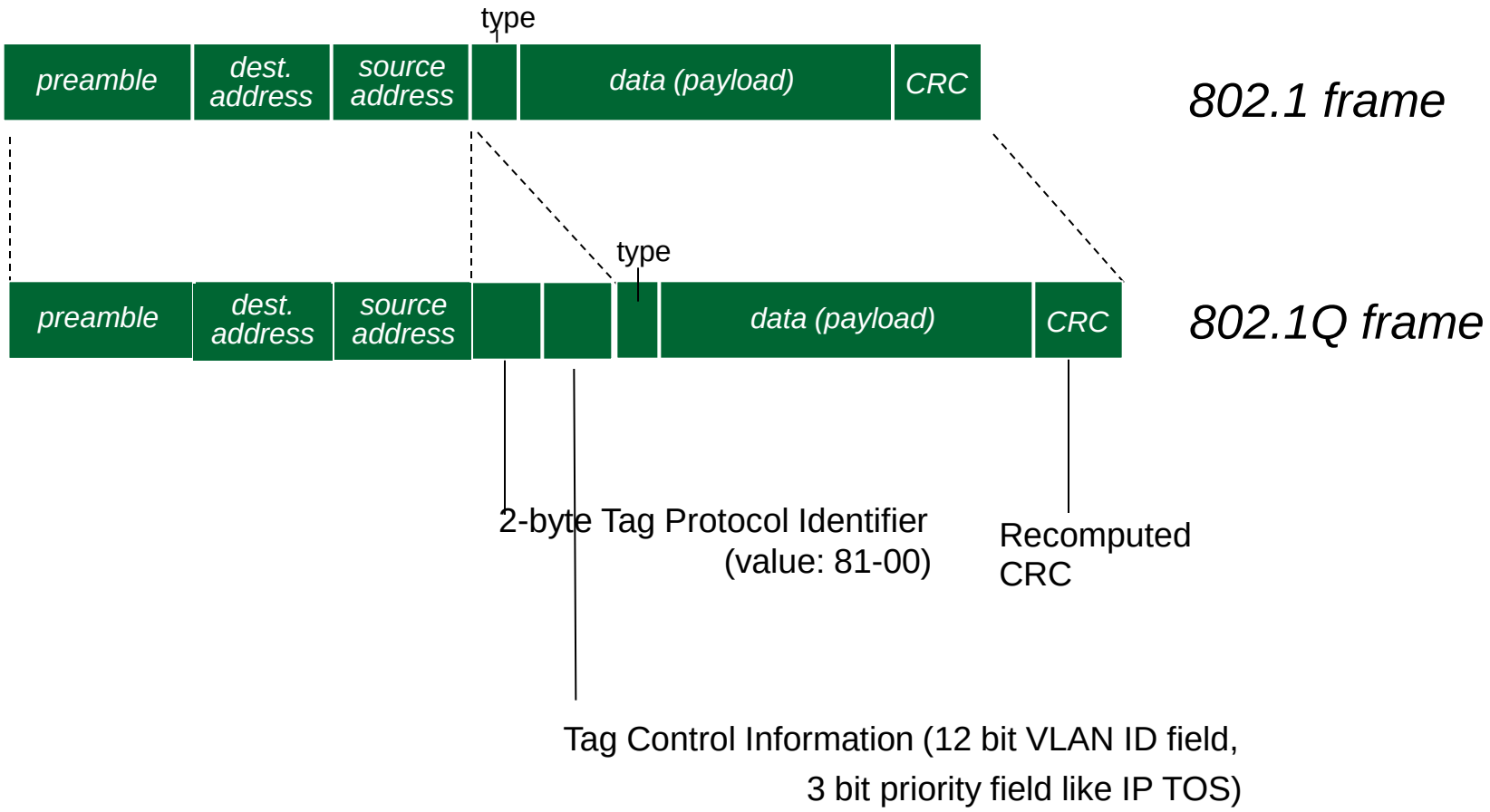


VLANS spanning multiple switches



- *trunk port:* carries frames between VLANS defined over multiple physical switches
  - frames forwarded within VLAN between switches can't be vanilla 802.1 frames (must carry VLAN ID info)
  - 802.1q protocol adds/removed additional header fields for frames forwarded between trunk ports

802.1Q VLAN frame format



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

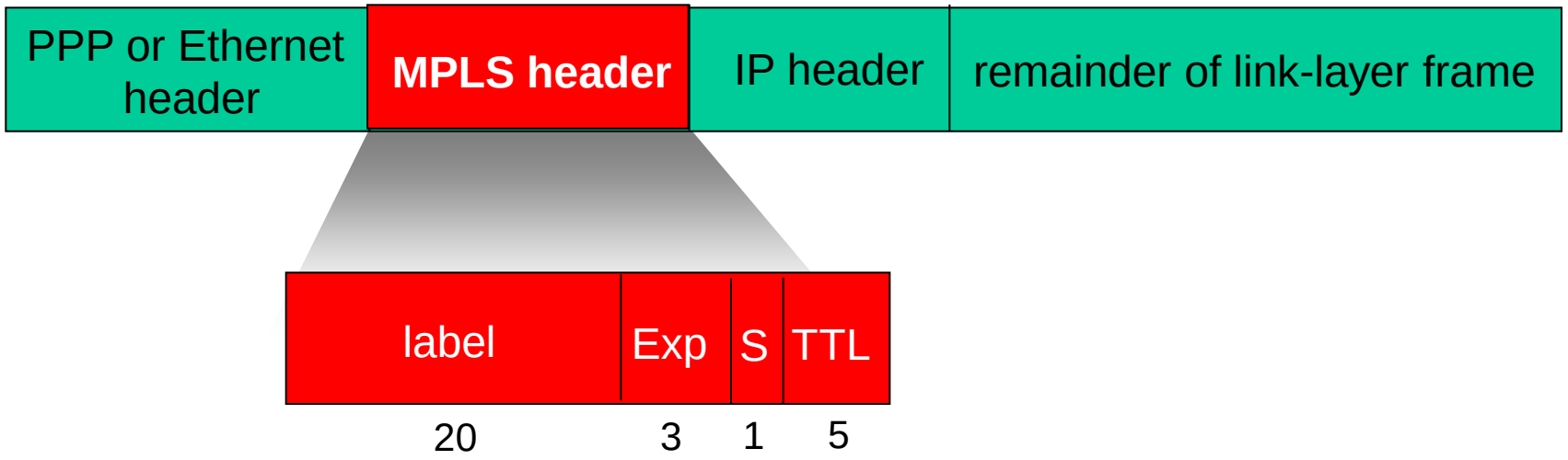
5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

Multiprotocol label switching (MPLS)

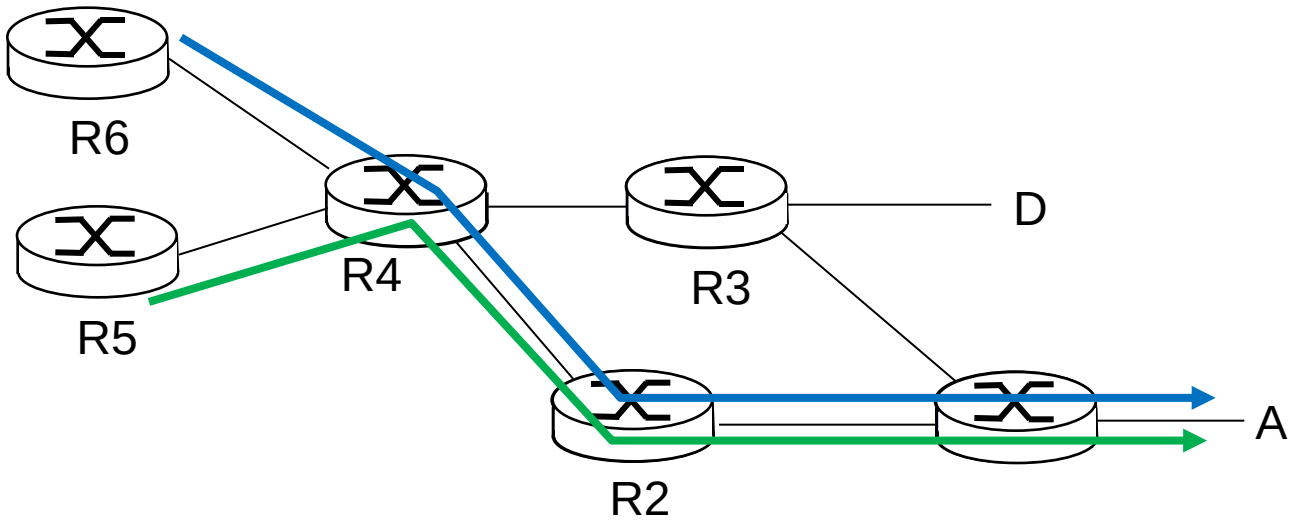
- initial goal: high-speed IP forwarding using fixed length label (instead of IP address)
  - fast lookup using fixed length identifier (rather than shortest prefix matching)
  - borrowing ideas from Virtual Circuit (VC) approach
  - but IP datagram still keeps IP address!



MPLS capable routers

- a.k.a. label-switched router
- forward packets to outgoing interface based only on label value (*don't inspect IP address*)
  - MPLS forwarding table distinct from IP forwarding tables
- *flexibility:* MPLS forwarding decisions can *differ* from those of IP
  - use destination *and* source addresses to route flows to same destination differently (traffic engineering)
  - re-route flows quickly if link fails: pre-computed backup paths (useful for VoIP)

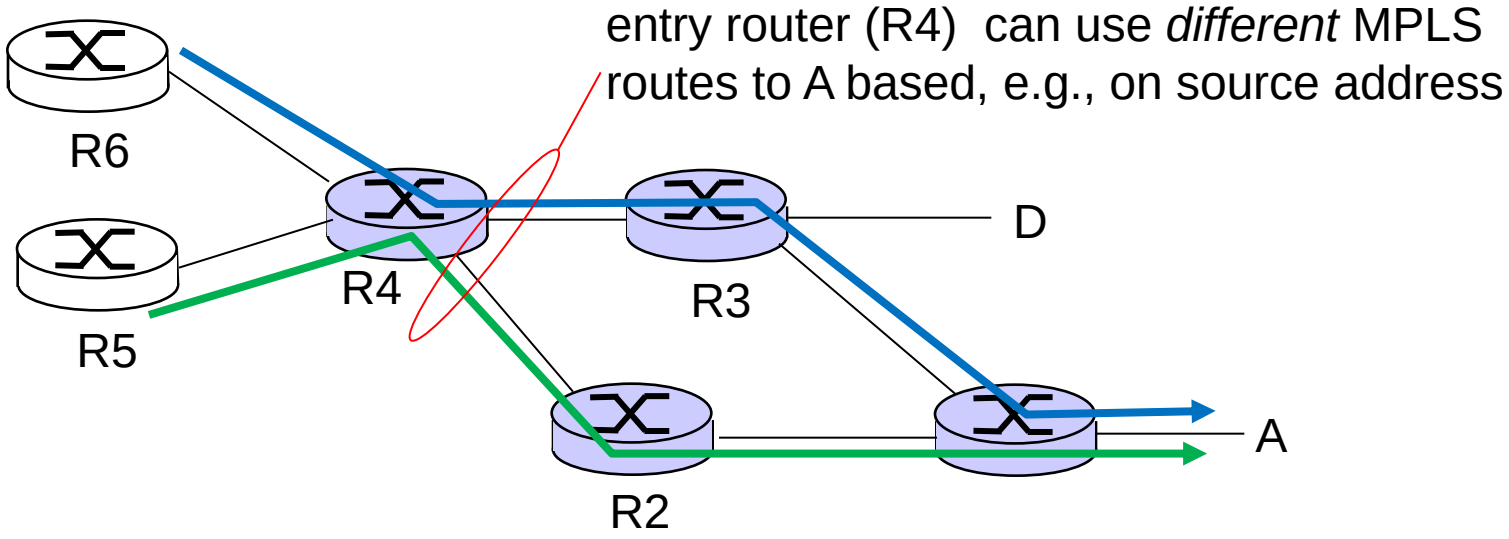
MPLS versus IP paths



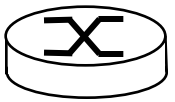
- *IP routing: path to destination determined by destination address alone*


IP router

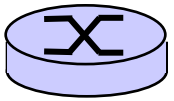
MPLS versus IP paths



- *IP routing: path to destination determined by destination address alone*
- *MPLS routing:* path to destination can be based on source *and* dest. address
  - *fast reroute:* precompute backup routes in case of link failure



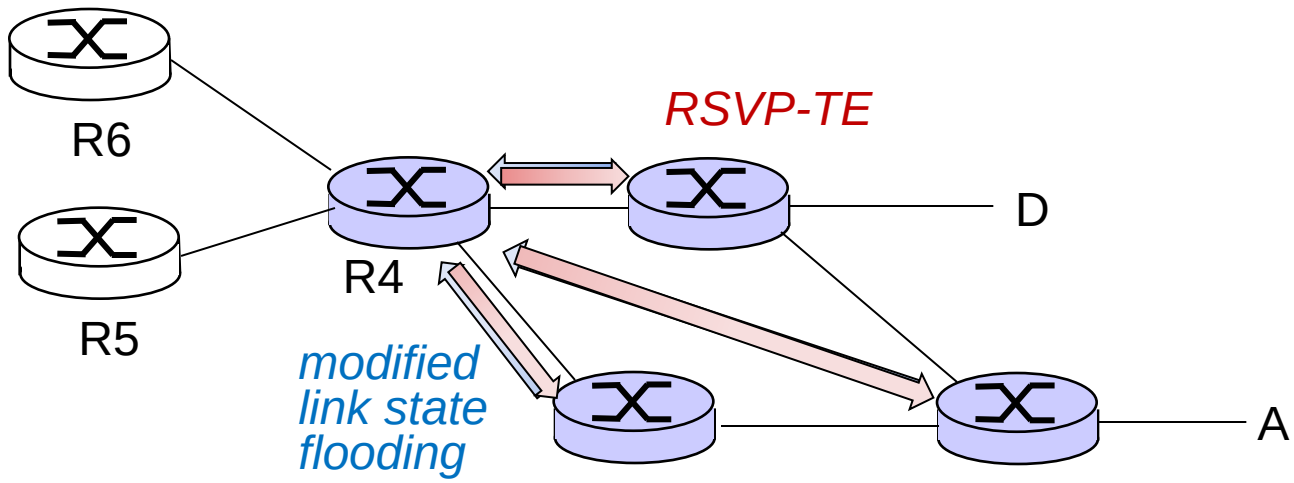
IP-only router



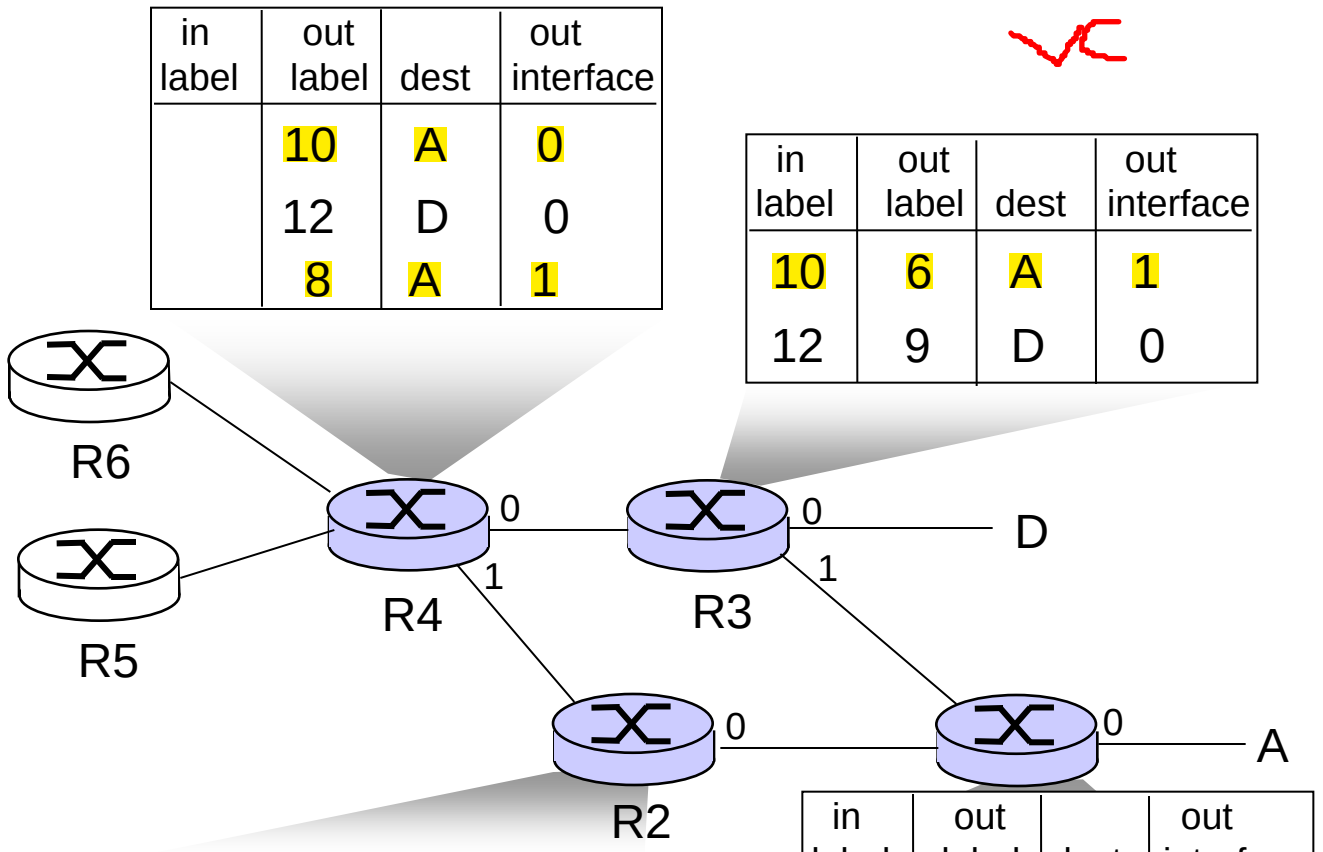
MPLS and IP router

MPLS signaling

- modify OSPF, IS-IS link-state flooding protocols to carry info used by MPLS routing,
  - e.g., link bandwidth, amount of "reserved" link bandwidth
- *entry MPLS router uses RSVP-TE signaling protocol to set up MPLS forwarding at downstream routers*



MPLS forwarding tables



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

Data center networks

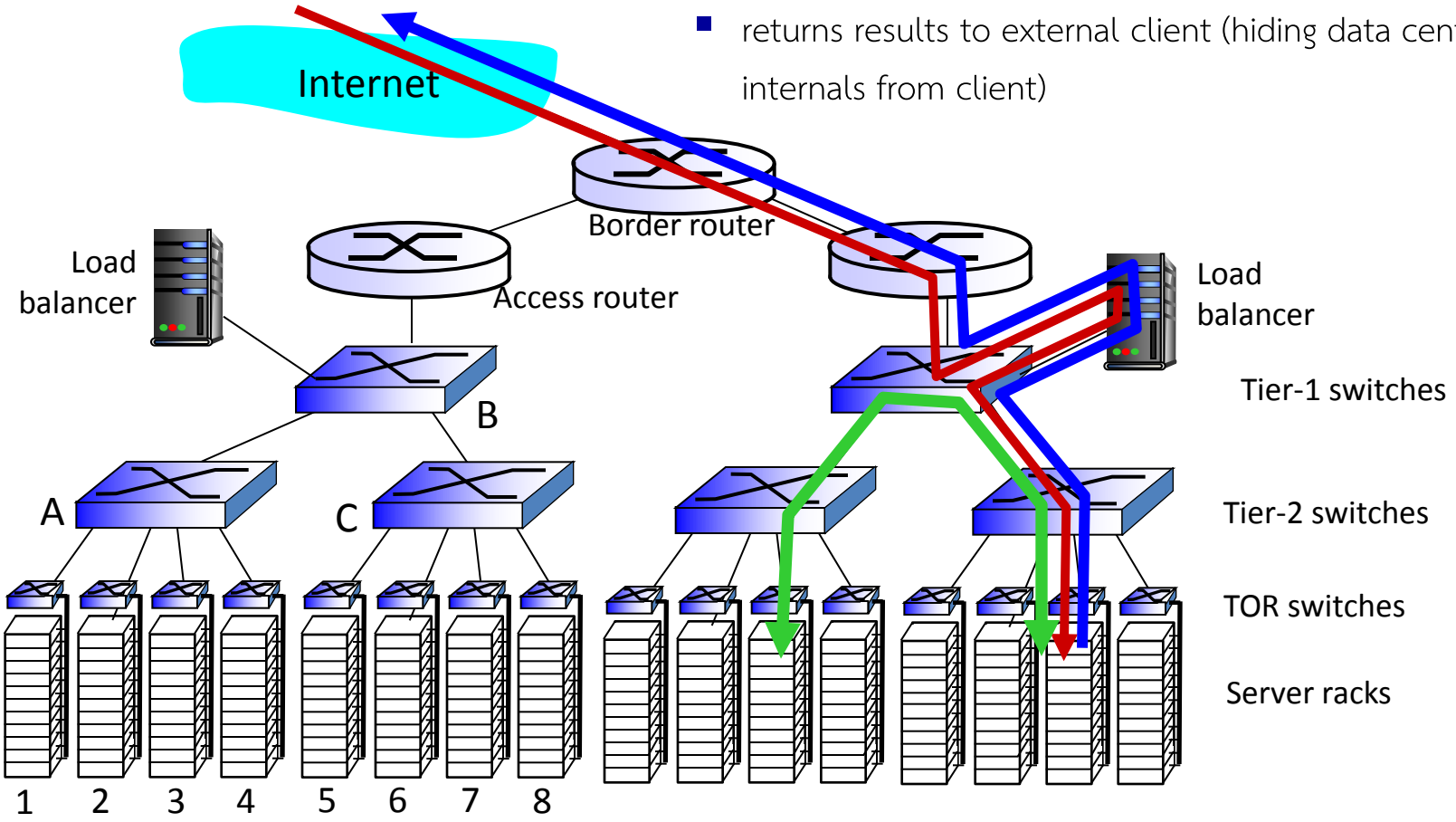
- 10's to 100's of thousands of hosts, often closely coupled, in close proximity:
  - e-business (e.g. Amazon)
  - content-servers (e.g., YouTube, Akamai, Apple, Microsoft)
  - search engines, data mining (e.g., Google)
- challenges:
  - multiple applications, each serving massive numbers of clients
  - managing/balancing load, avoiding processing, networking, data bottlenecks

Inside a 40-ft Microsoft container, Chicago data center

Data center networks

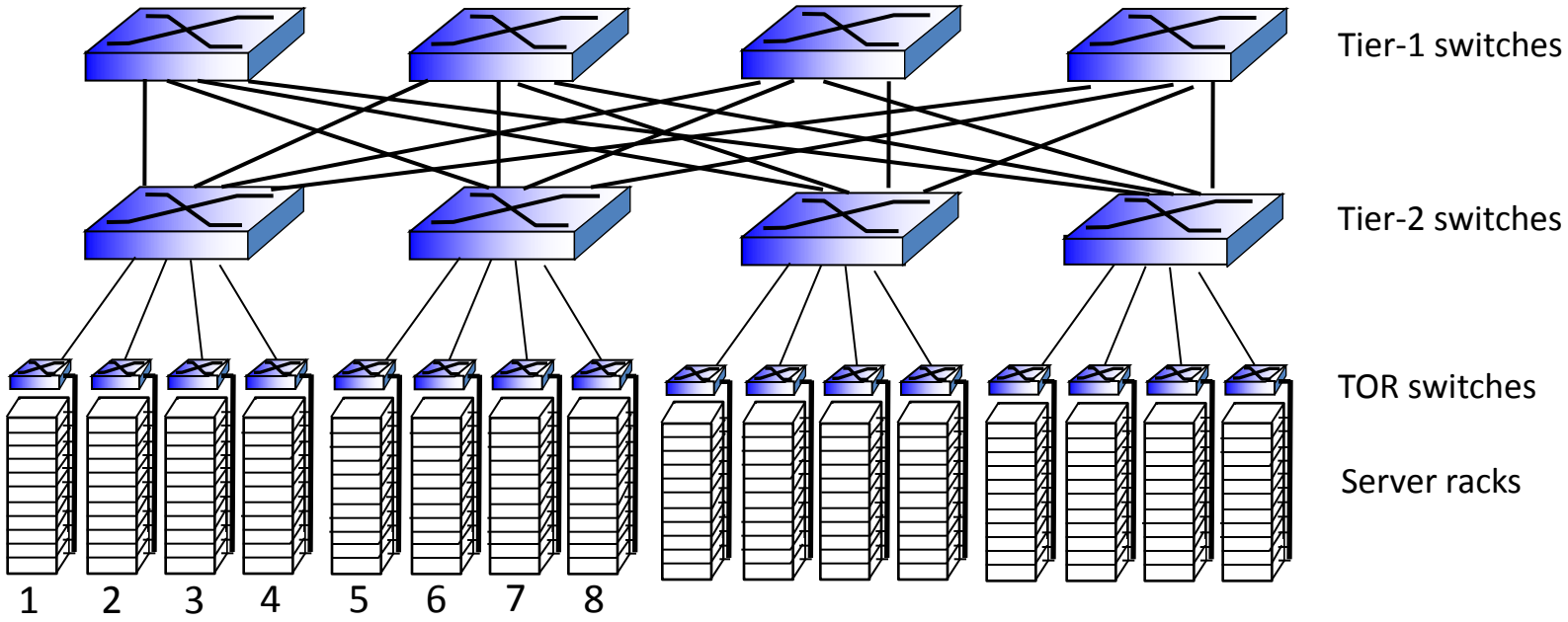
load balancer: application-layer routing

- receives external client requests
- directs workload within data center
- returns results to external client (hiding data center internals from client)



Data center networks

- rich interconnection among switches, racks:
  - increased throughput between racks (multiple routing paths possible)
  - increased reliability via redundancy



Link layer, LANs: outline

5.1 introduction, services

5.2 error detection, correction

5.3 multiple access protocols

5.4 LANs

- addressing, ARP
- Ethernet
- switches
- VLANS

5.5 link virtualization: MPLS

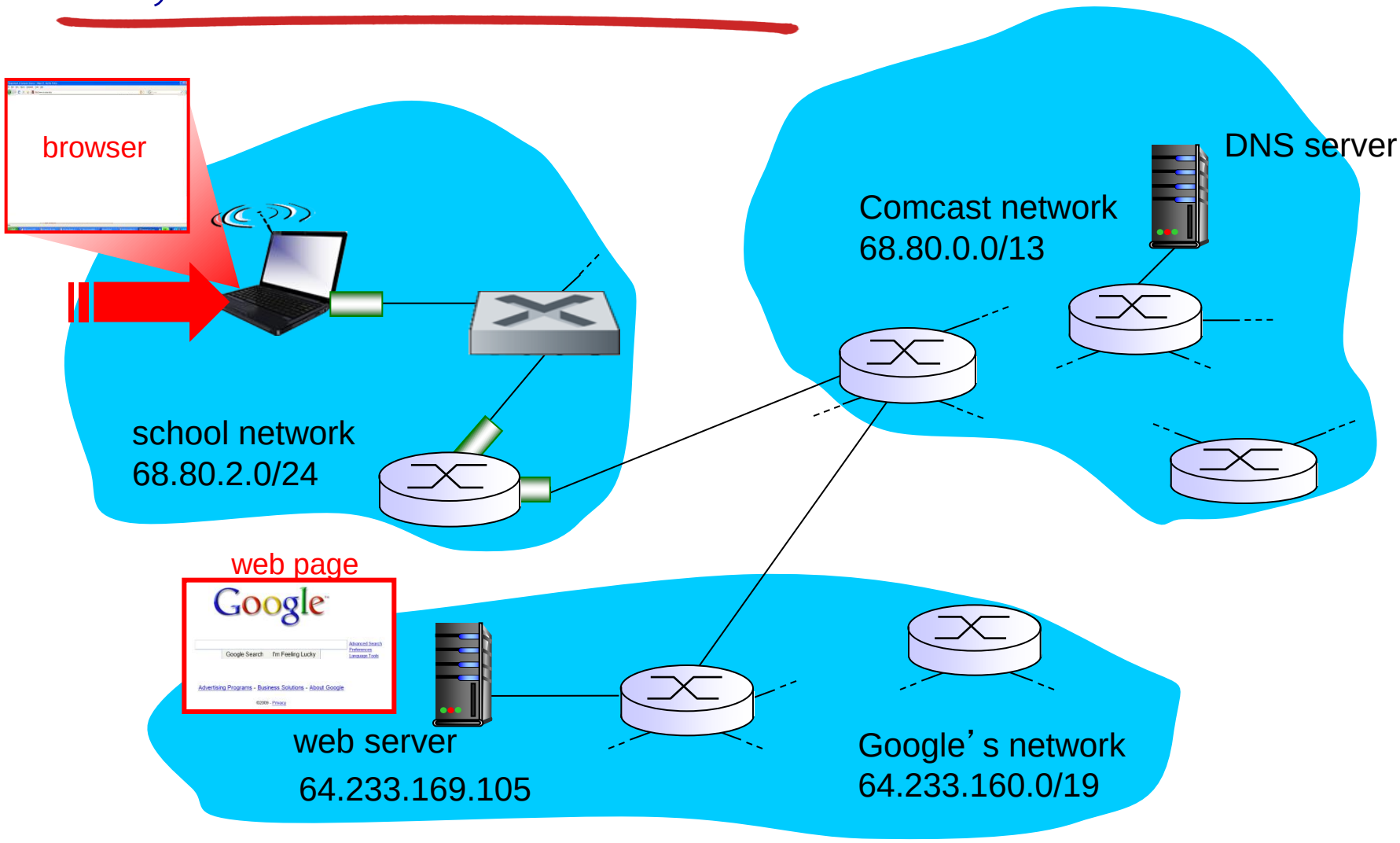
5.6 data center networking

5.7 a day in the life of a web request

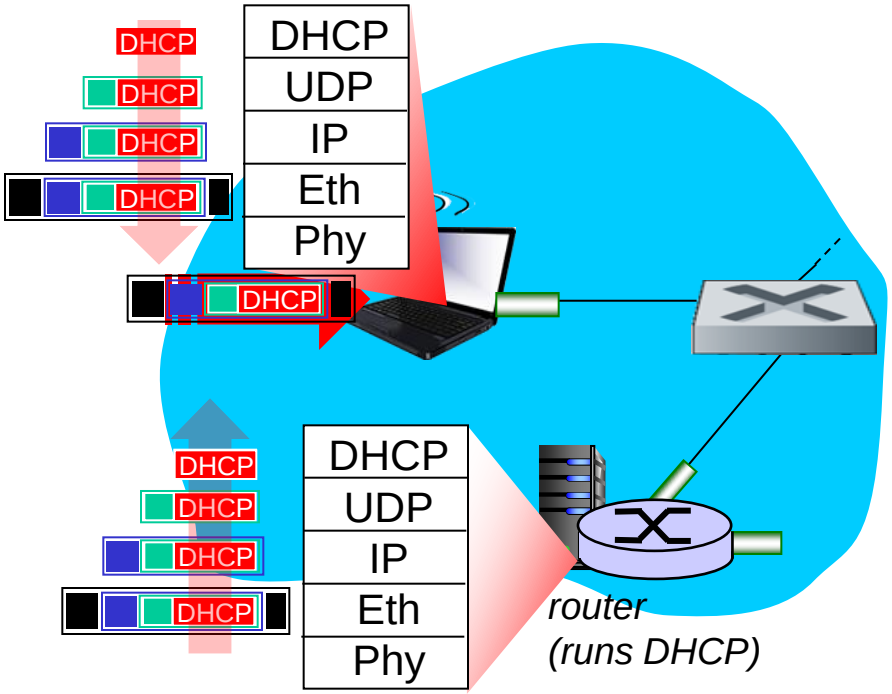
Synthesis: a day in the life of a web request

- journey down protocol stack complete!
  - application, transport, network, link
- putting-it-all-together: synthesis!
  - *goal:* identify, review, understand protocols (at all layers) involved in seemingly simple scenario: requesting www page
  - *scenario:* student attaches laptop to campus network, requests/receives www.google.com

A day in the life: scenario

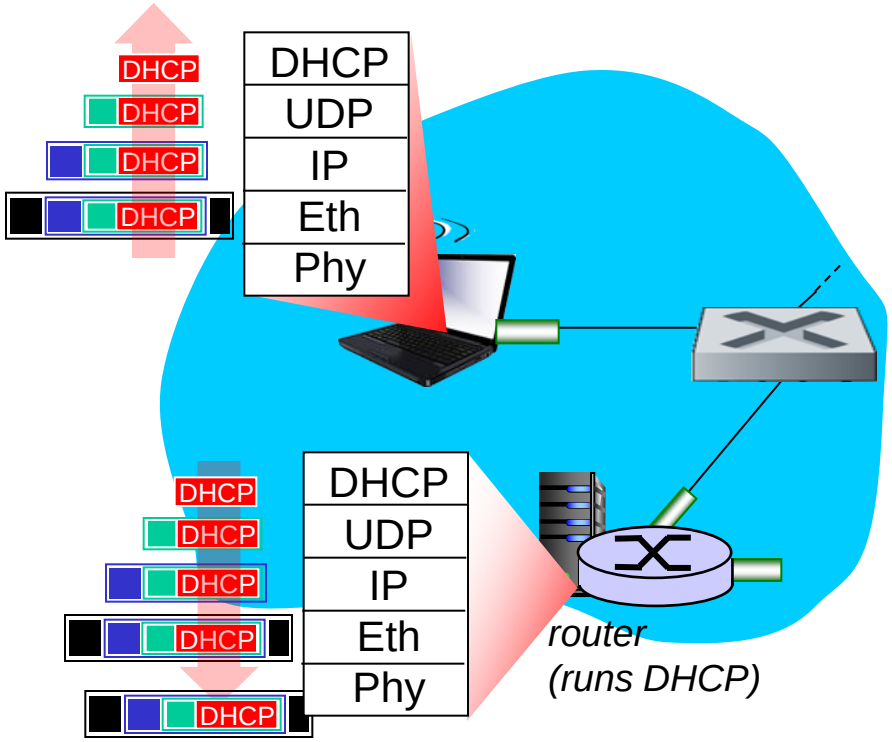


A day in the life… connecting to the Internet



- connecting laptop needs to get its own IP address, addr of first-hop router, addr of DNS server: use *DHCP*
- DHCP request *encapsulated* in *UDP*, encapsulated in *IP*, encapsulated in *802.3* Ethernet
- Ethernet frame *broadcast* (dest: FFFFFFFFFFFF) on LAN, received at router running *DHCP* server
- Ethernet *demuxed* to IP demuxed, UDP demuxed to DHCP

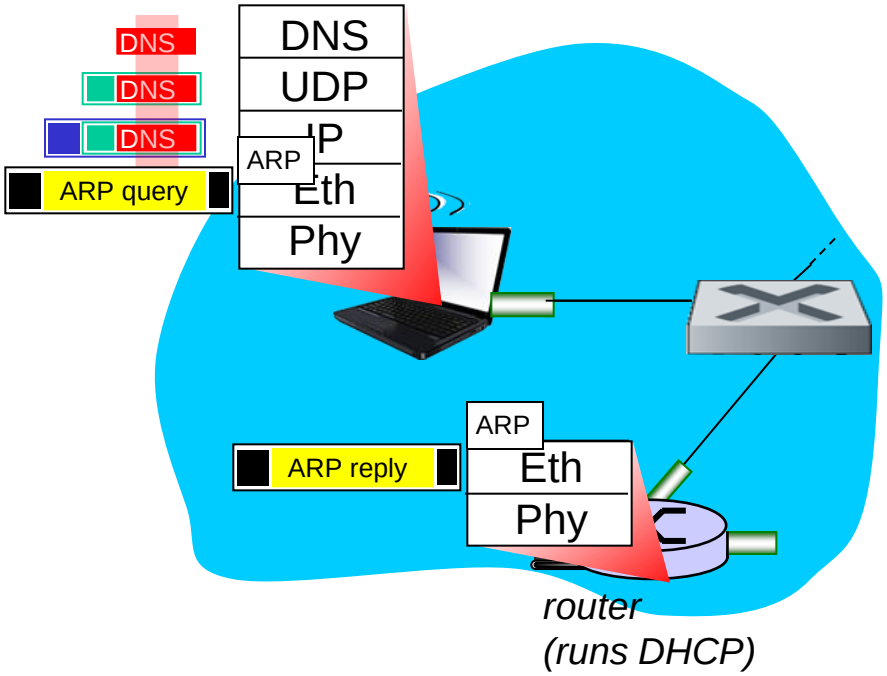
A day in the life… connecting to the Internet



- DHCP server formulates *DHCP ACK* containing client's IP address, IP address of first-hop router for client, name & IP address of DNS server
- encapsulation at DHCP server, frame forwarded (*switch learning*) through LAN, demultiplexing at client
- DHCP client receives DHCP ACK reply

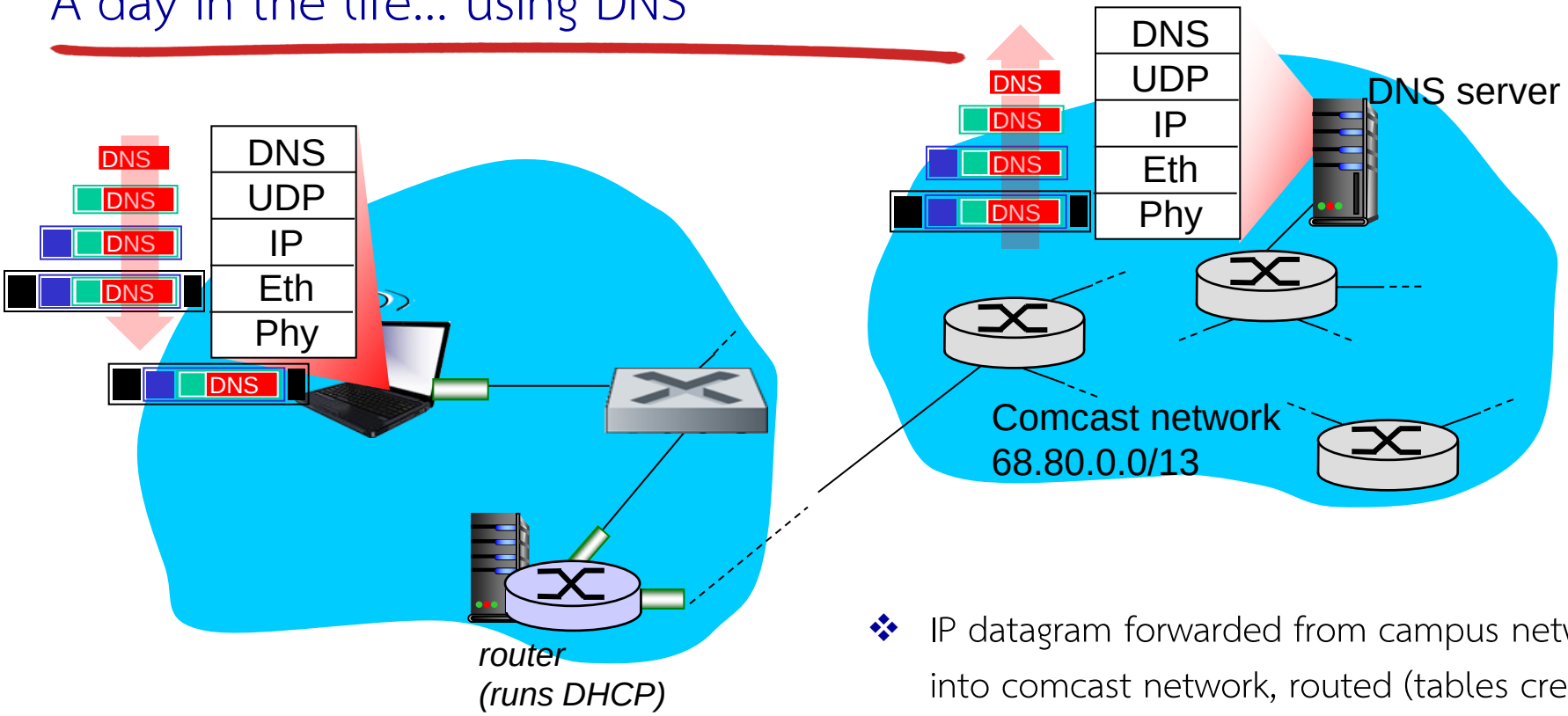
Client now has IP address, knows name & addr of DNS server, IP address of its first-hop router

A day in the life... ARP (before DNS, before HTTP)



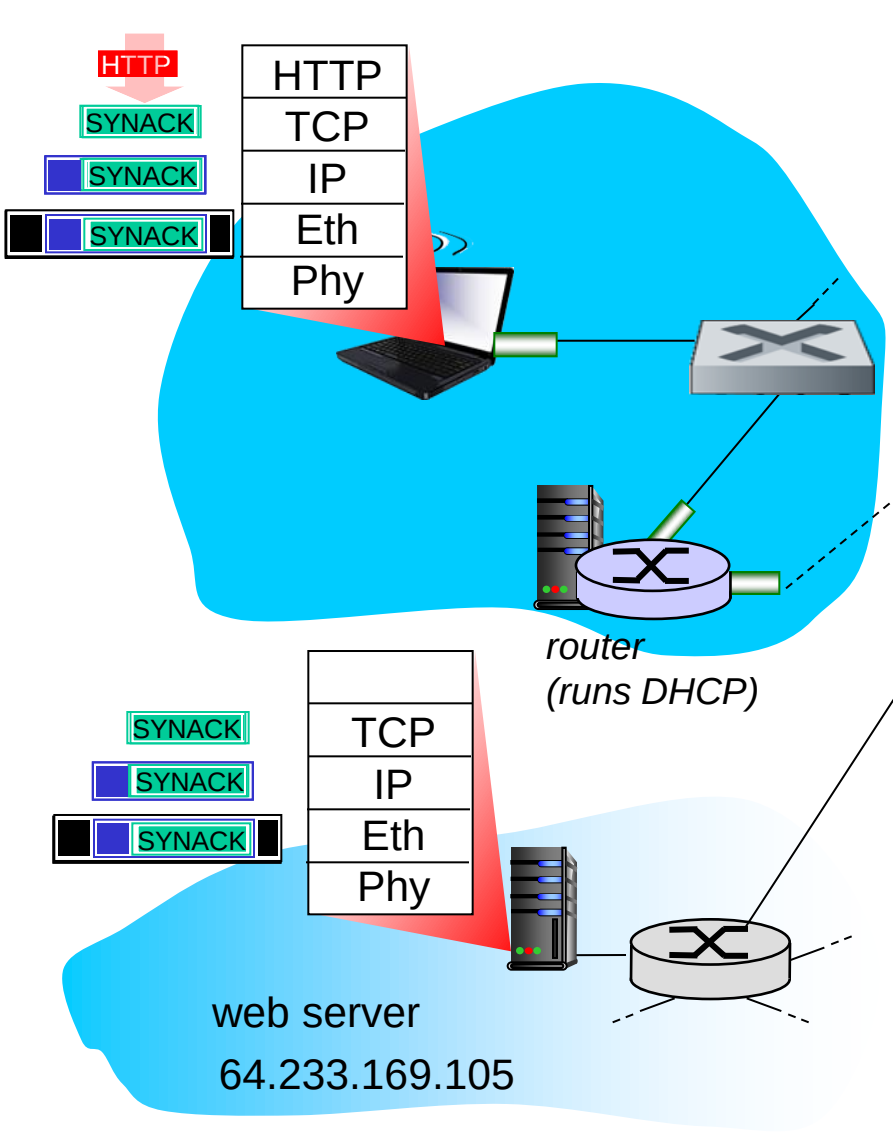
- before sending *HTTP* request, need IP address of www.google.com: *DNS*
- DNS query created, encapsulated in UDP, encapsulated in IP, encapsulated in Eth. To send frame to router, need MAC address of router interface: *ARP*
- *ARP query* broadcast, received by router, which replies with *ARP reply* giving MAC address of router interface
- client now knows MAC address of first hop router, so can now send frame containing DNS query

A day in the life… using DNS



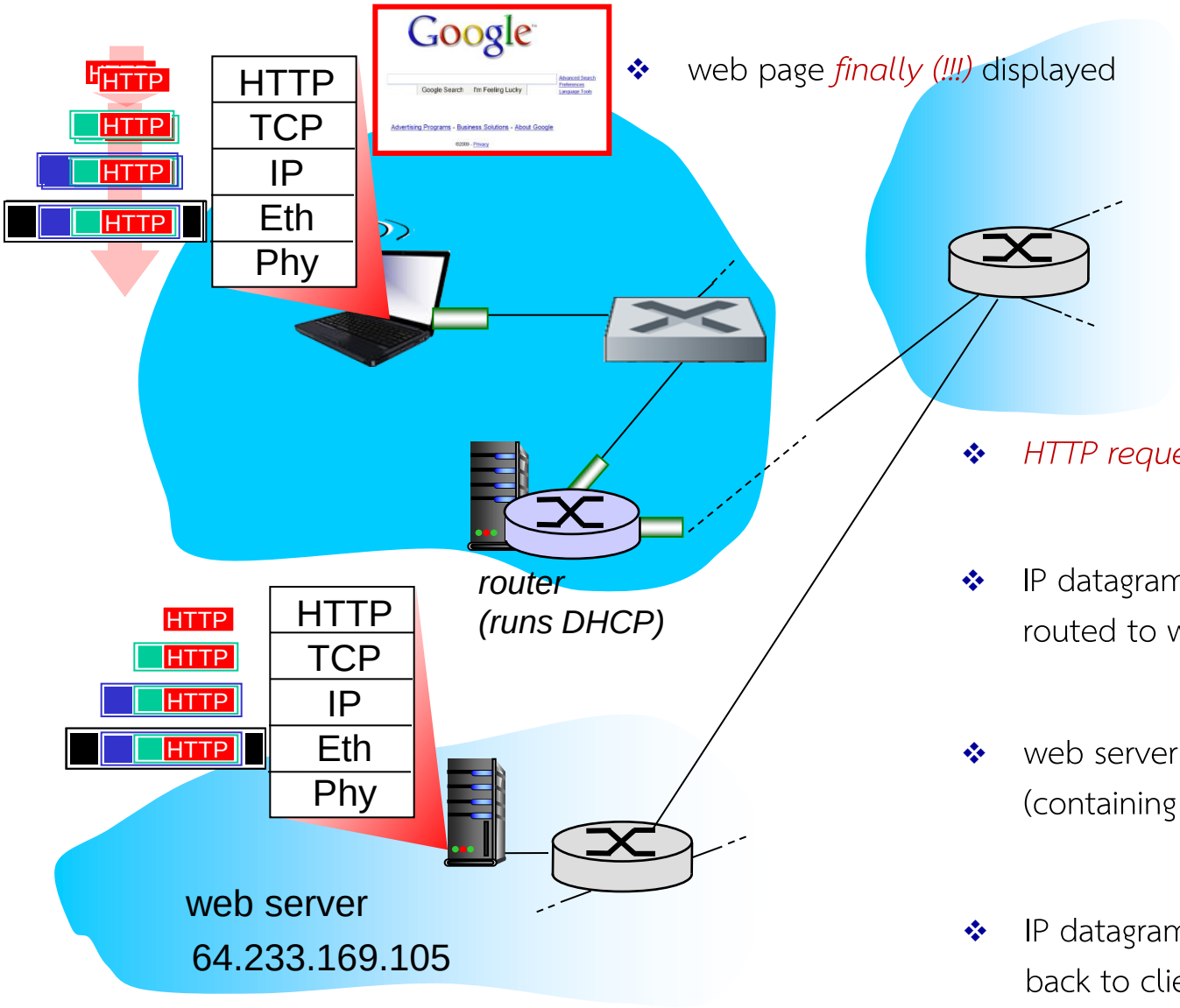
- IP datagram containing DNS query forwarded via LAN switch from client to 1st hop router
- IP datagram forwarded from campus network into comcast network, routed (tables created by *RIP, OSPF, IS-IS* and/or *BGP* routing protocols) to DNS server
- demux'ed to DNS server
- DNS server replies to client with IP address of www.google.com

A day in the life...TCP connection carrying HTTP



- to send HTTP request, client first opens *TCP socket* to web server
- TCP *SYN segment* (step 1 in 3-way handshake) *inter-domain routed* to web server
- web server responds with *TCP SYNACK* (step 2 in 3-way handshake)
- TCP *connection established!*

A day in the life... HTTP request/reply



- web page *finally (!!!)* displayed
- *HTTP request* sent into TCP socket
- IP datagram containing HTTP request routed to www.google.com
- web server responds with *HTTP reply* (containing web page)
- IP datagram containing HTTP reply routed back to client

Chapter 5: Summary

- principles behind data link layer services:
  - error detection, correction
  - sharing a broadcast channel: multiple access
  - link layer addressing
- instantiation and implementation of various link layer technologies
  - Ethernet
  - switched LANS, VLANs
  - virtualized networks as a link layer: MPLS
- synthesis: a day in the life of a web request

Chapter 5: let's take a breath

- journey down protocol stack *complete* (except PHY)
- solid understanding of networking principles, practice
- ..... could stop here .... but *lots* of interesting topics!
  - wireless
  - multimedia
  - security
  - network management