LISP

(Locator/Identifier Separation Protocol)

Damien Saucez*

June 28th, 2010

http://inl.info.ucl.ac.be

*Thanks to Olivier Bonaventure and Pierre François

Department of Computing Science and Engineering
Université catholique de Louvain (UCL)
Place Sainte-Barbe, 2, B-1348, Louvain-la-Neuve (Belgium)

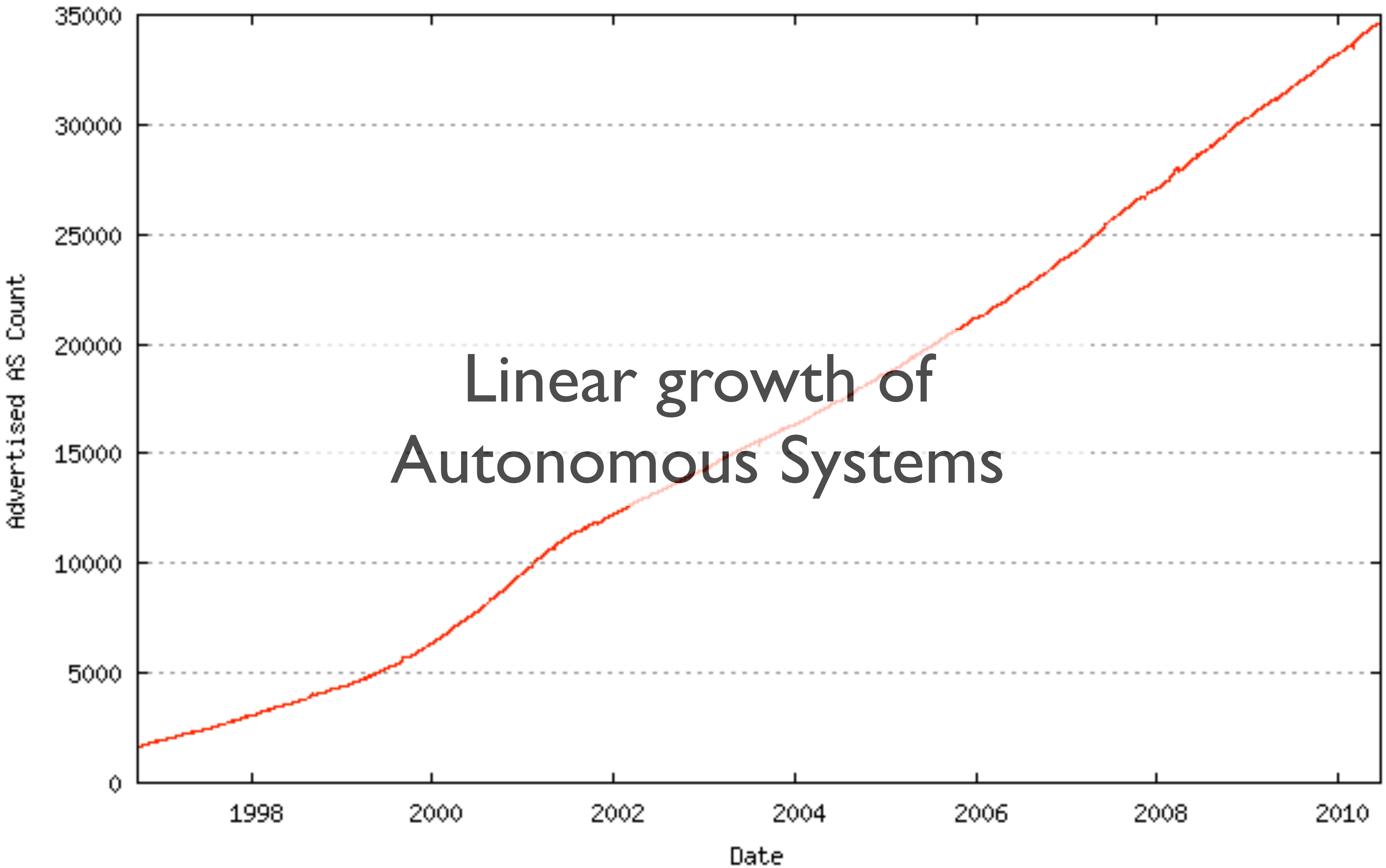
Agenda

- The Internet is evolving
- Separating Identifiers from Locators
- LISP, a network-based Loc/ID split solution
  - LISP in a nutshell
  - How LISP has been obtained?
- Conclusion

The Internet is evolving

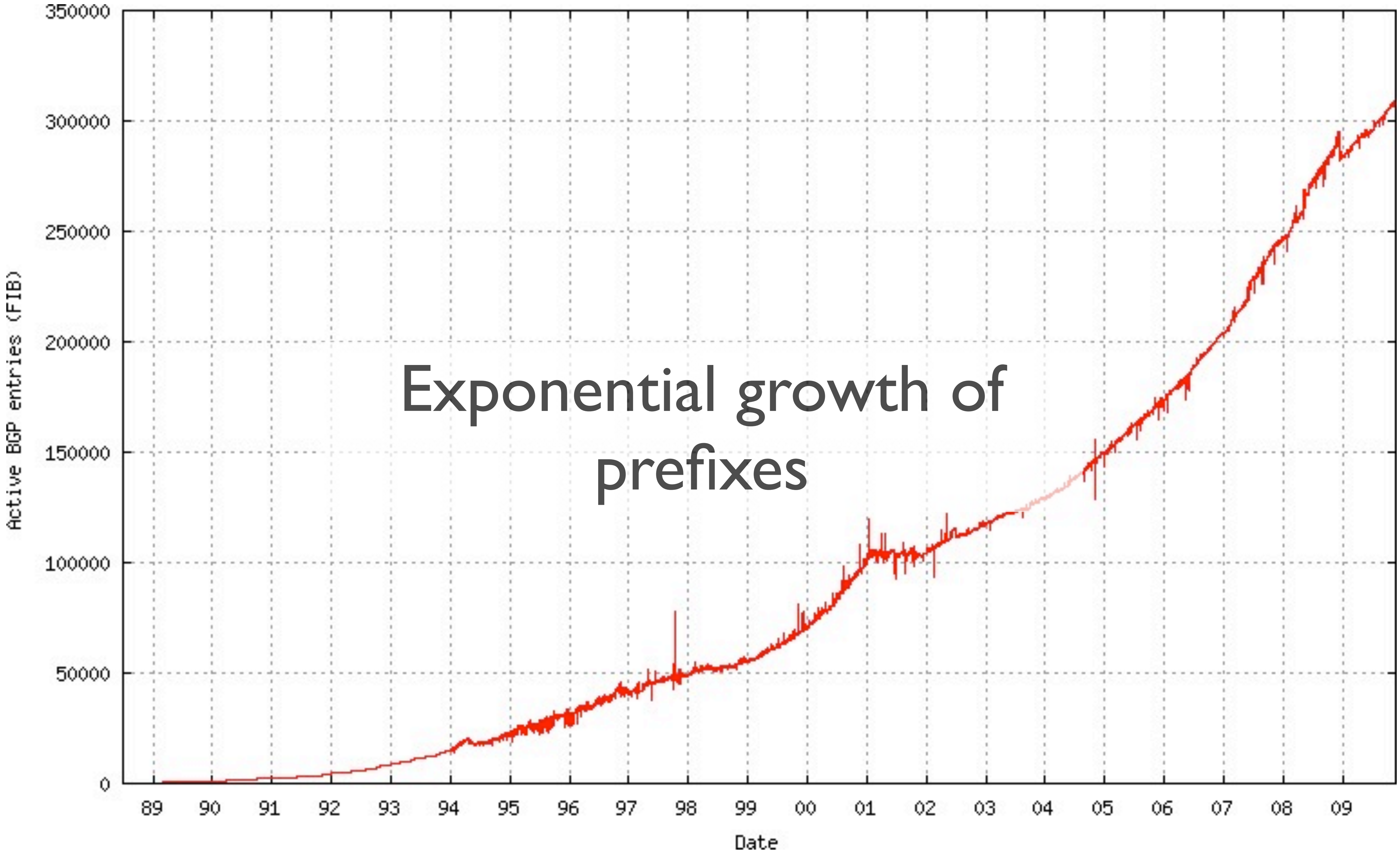
(does it like?)

More networks



[http://bgp.potaroo.net]

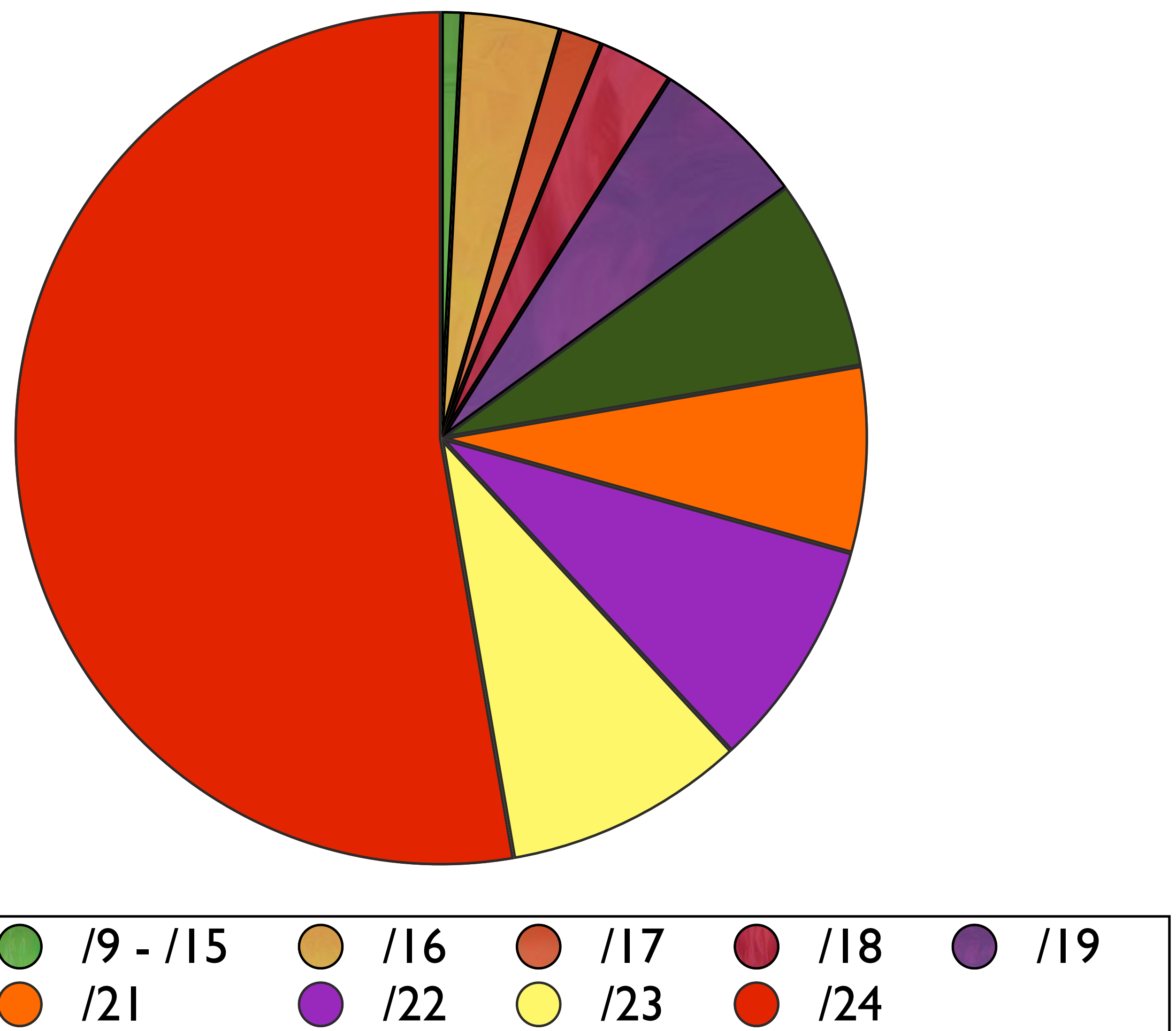
More prefixes



[http://bgp.potaroo.net]

What do the entries look like?

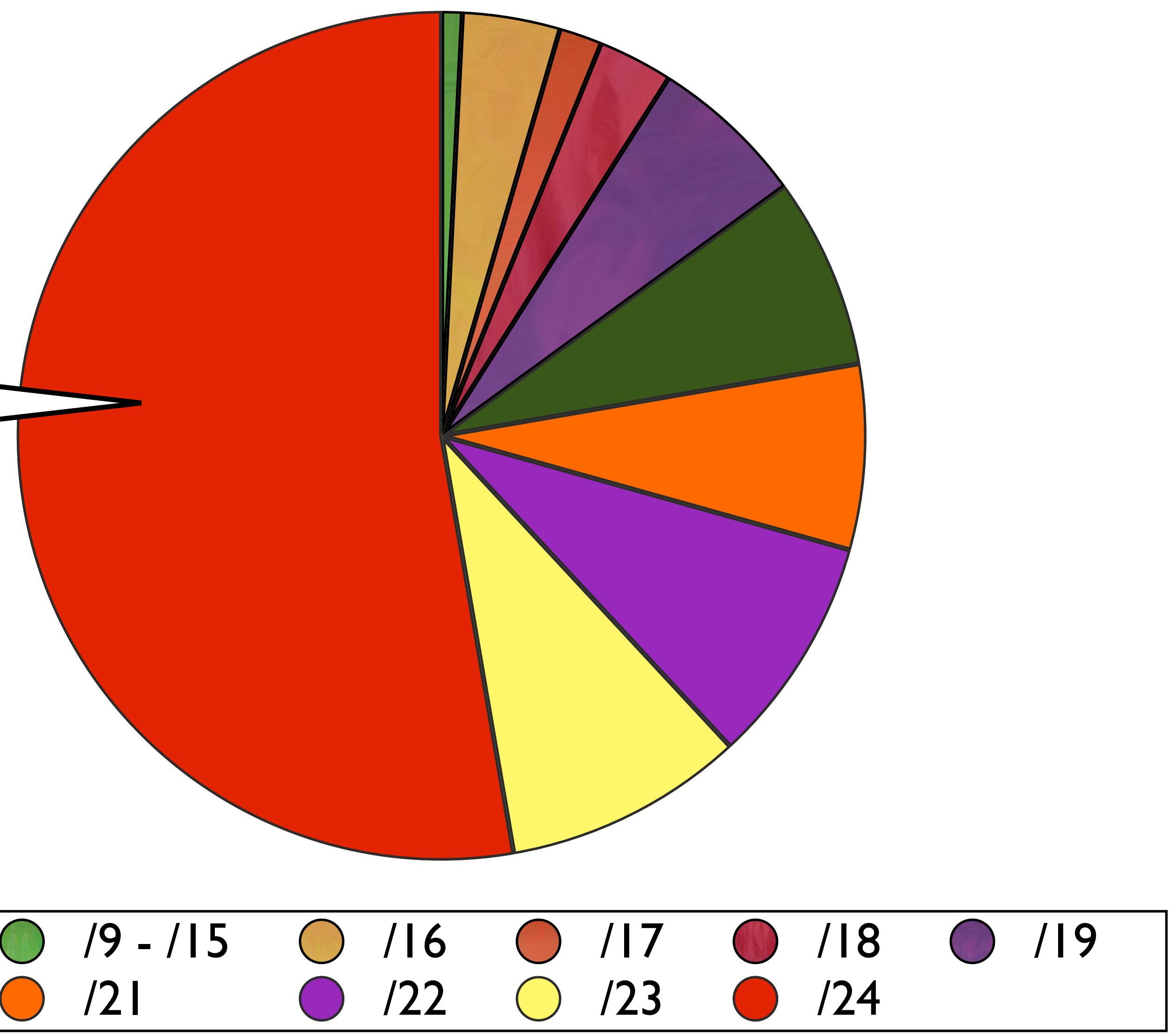
- Distribution of prefixes versus length (filtered)



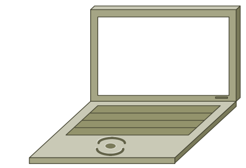
What do the entries look like?

- Distribution of prefixes versus length (filtered)

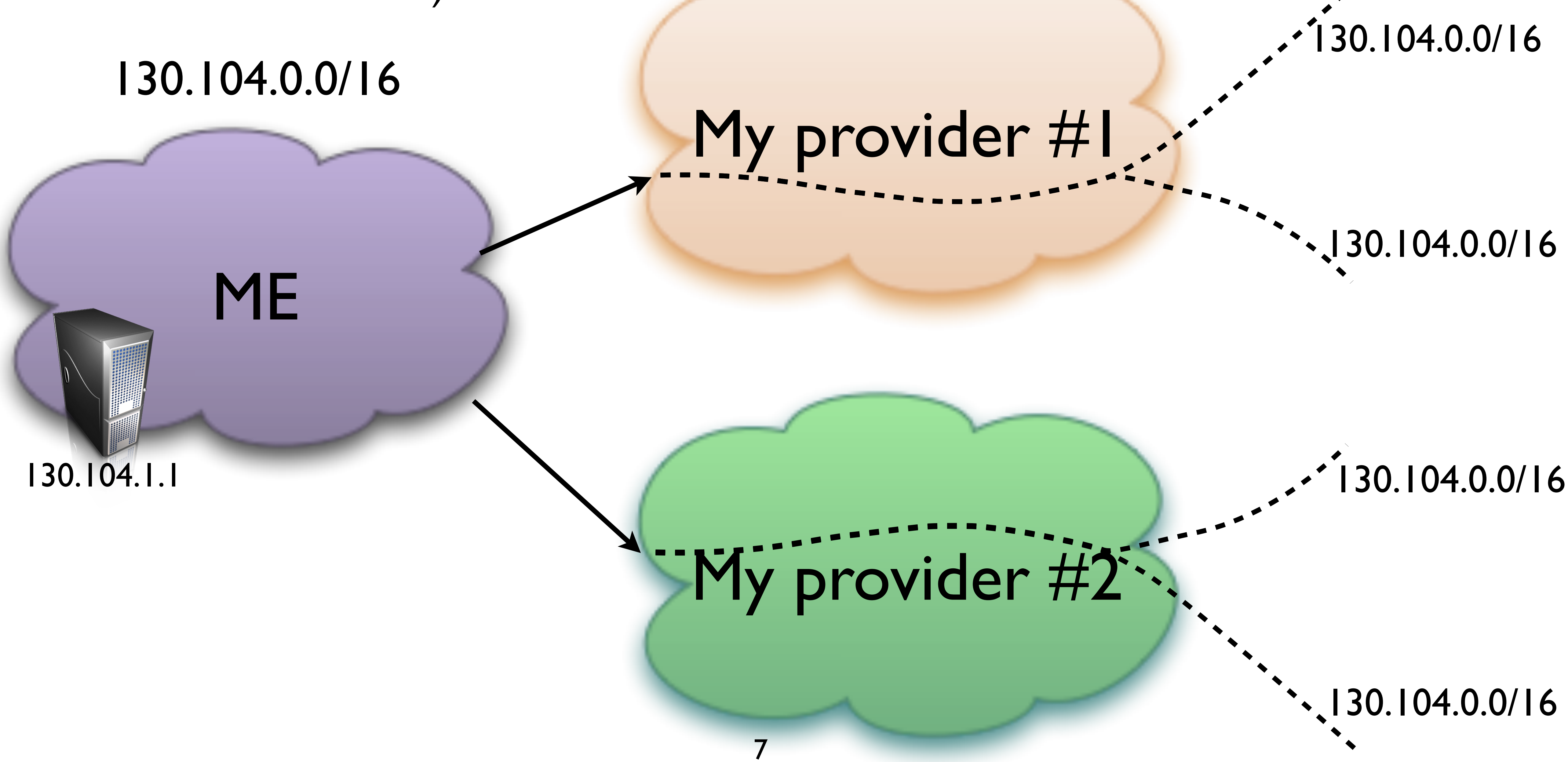
Half of the prefixes are as small as possible!



Why so may (small) prefixes? (1)

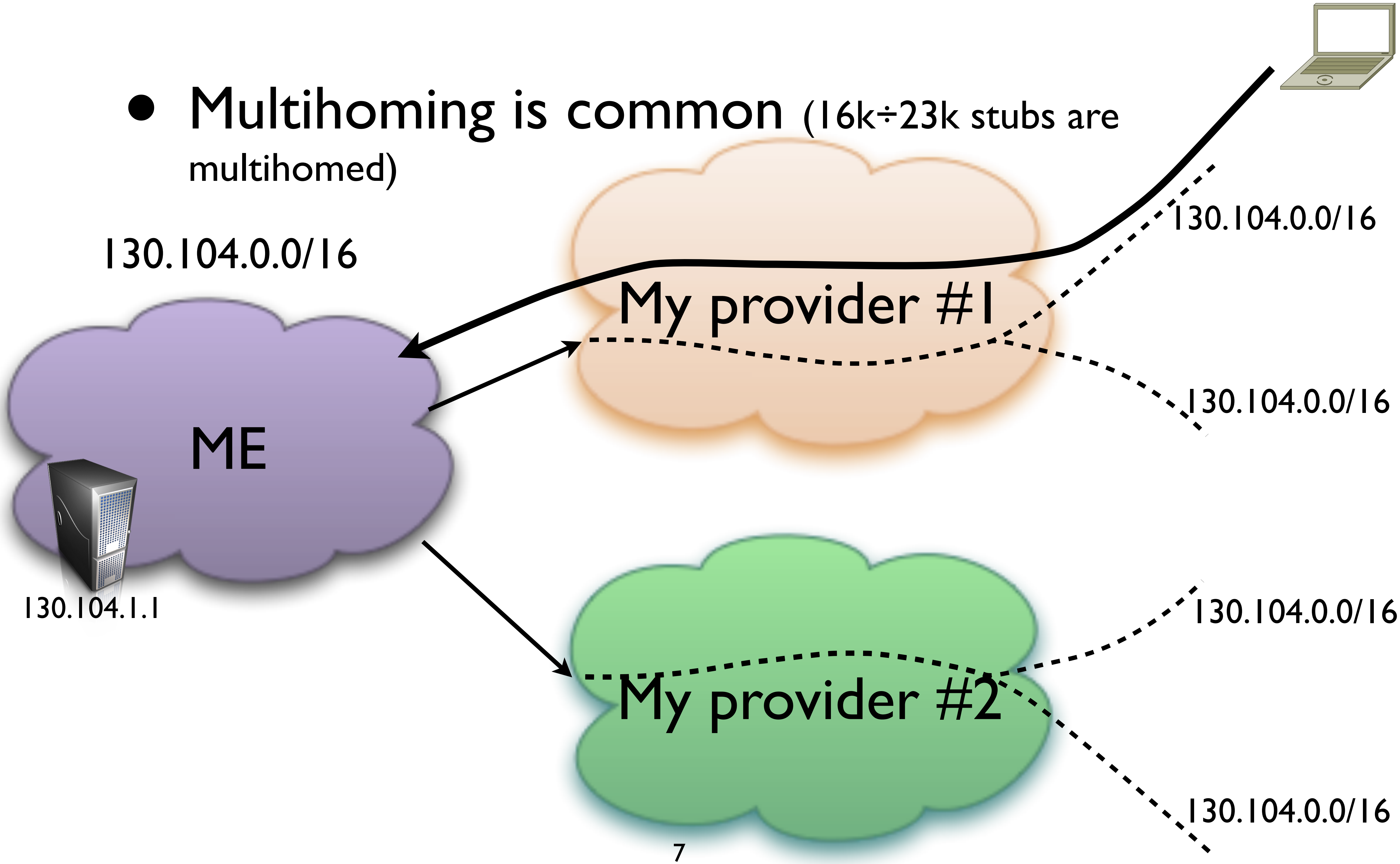


- Multihoming is common (16k÷23k stubs are multihomed)



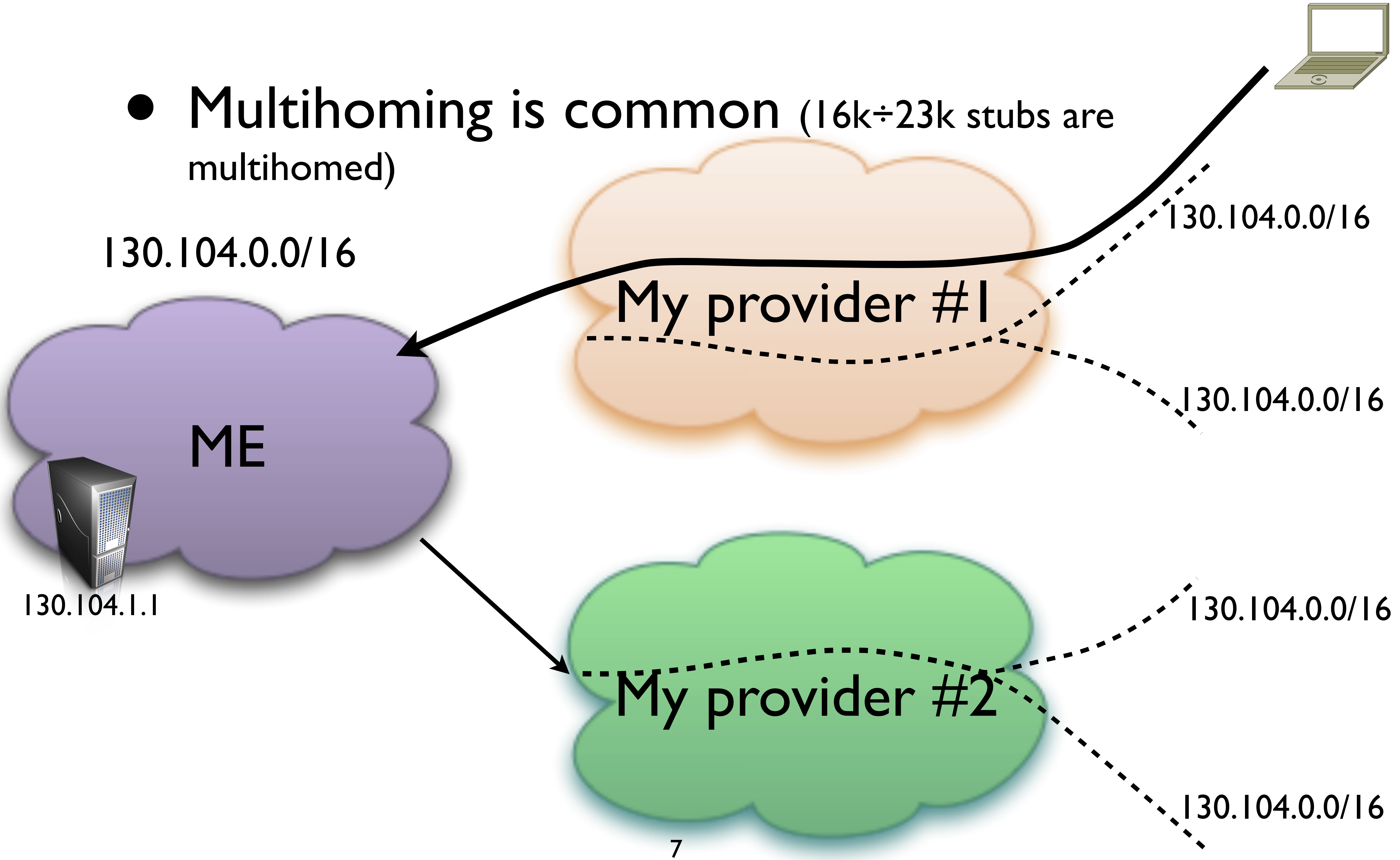
Why so may (small) prefixes? (1)

- Multihoming is common (16k÷23k stubs are multihomed)



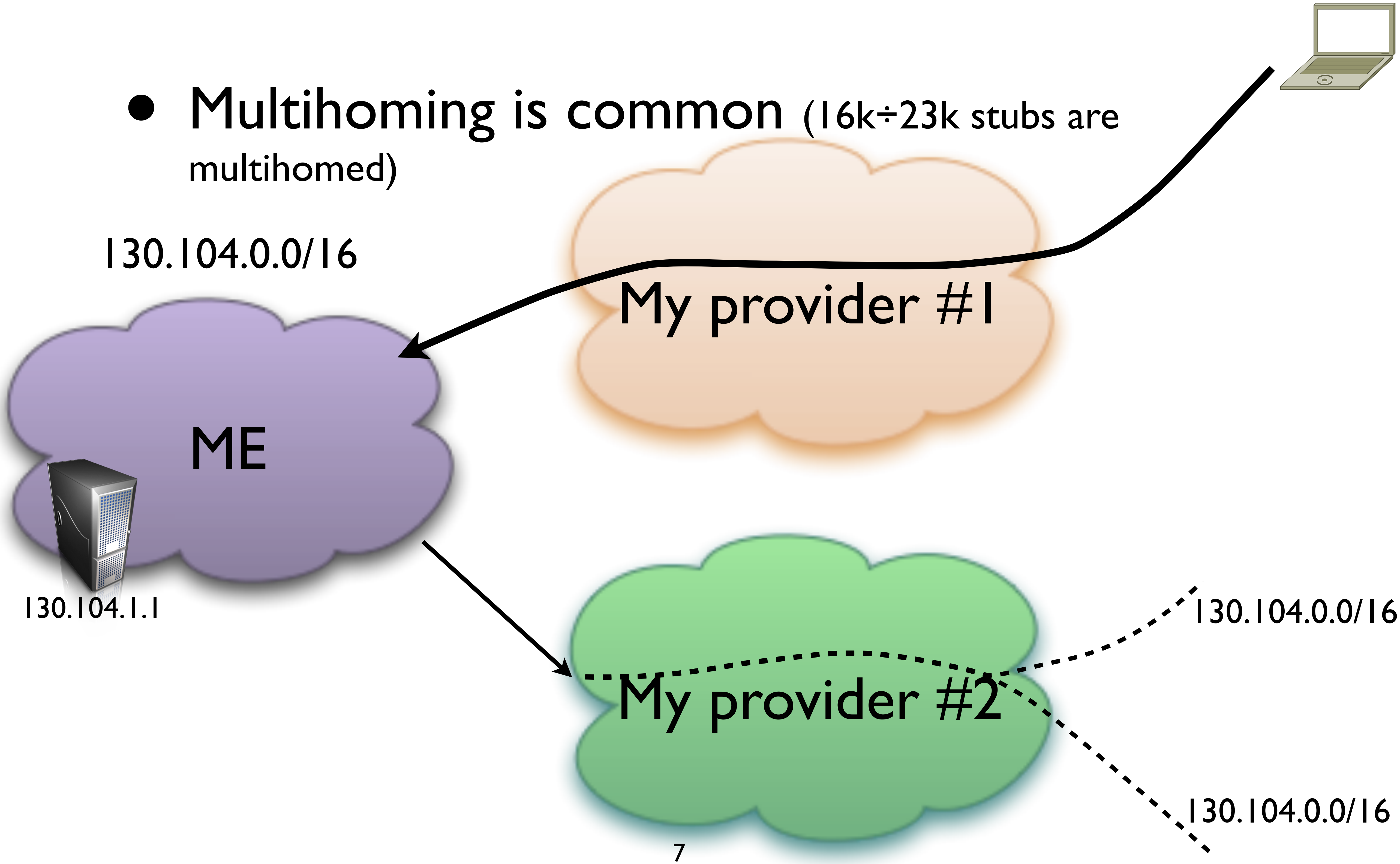
Why so may (small) prefixes? (1)

- Multihoming is common (16k÷23k stubs are multihomed)



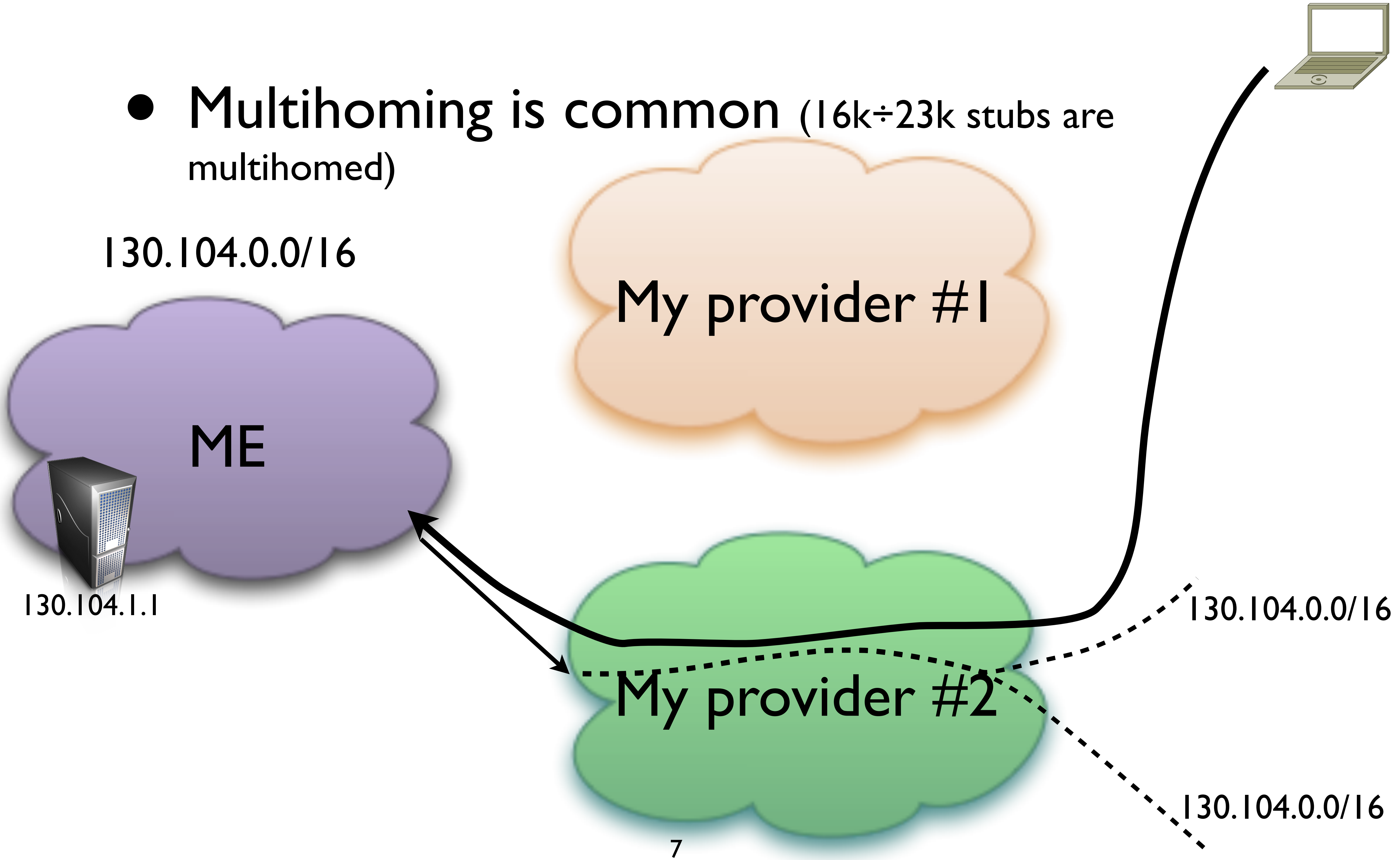
Why so may (small) prefixes? (1)

- Multihoming is common (16k÷23k stubs are multihomed)



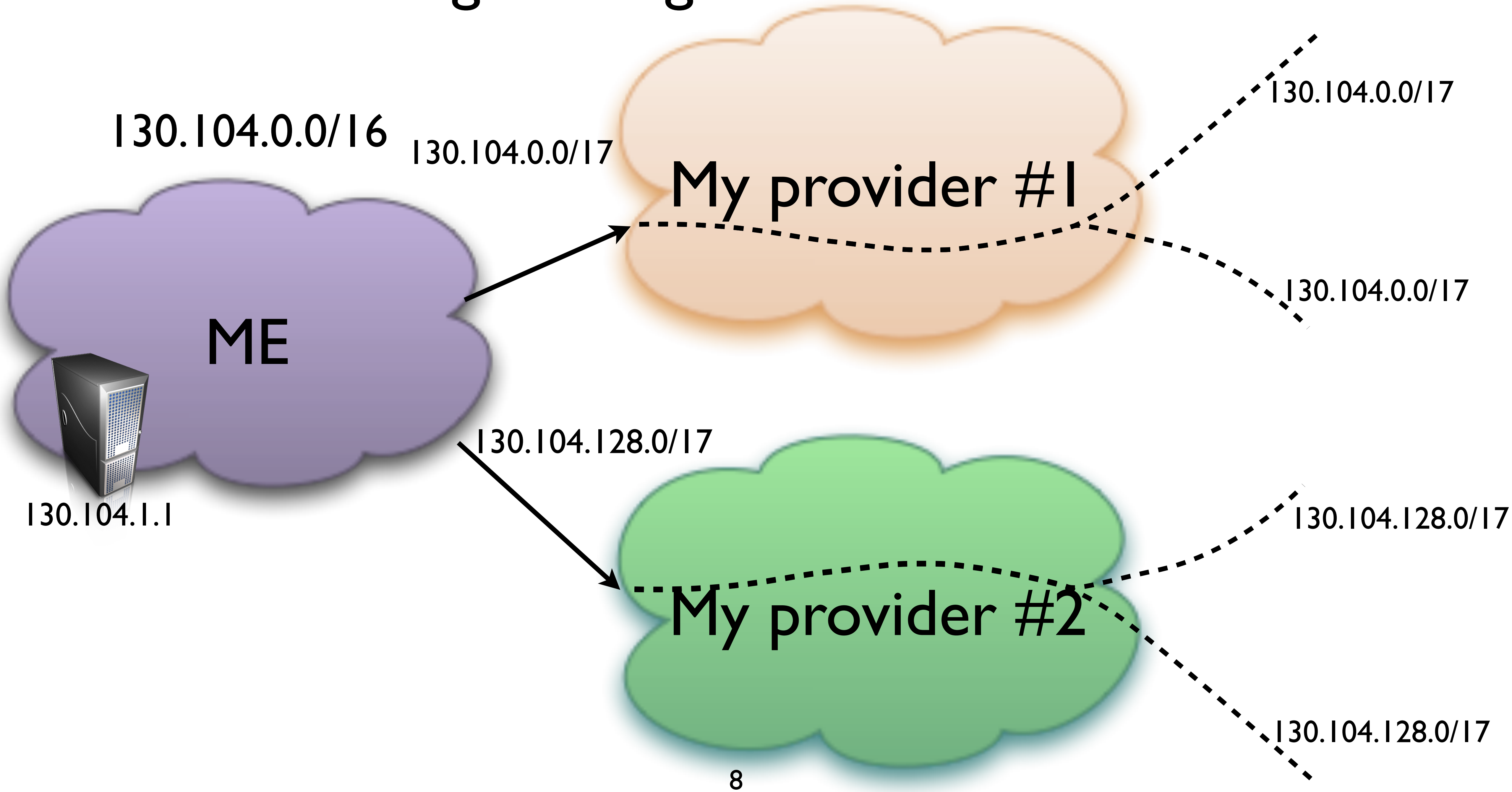
Why so may (small) prefixes? (1)

- Multihoming is common (16k÷23k stubs are multihomed)



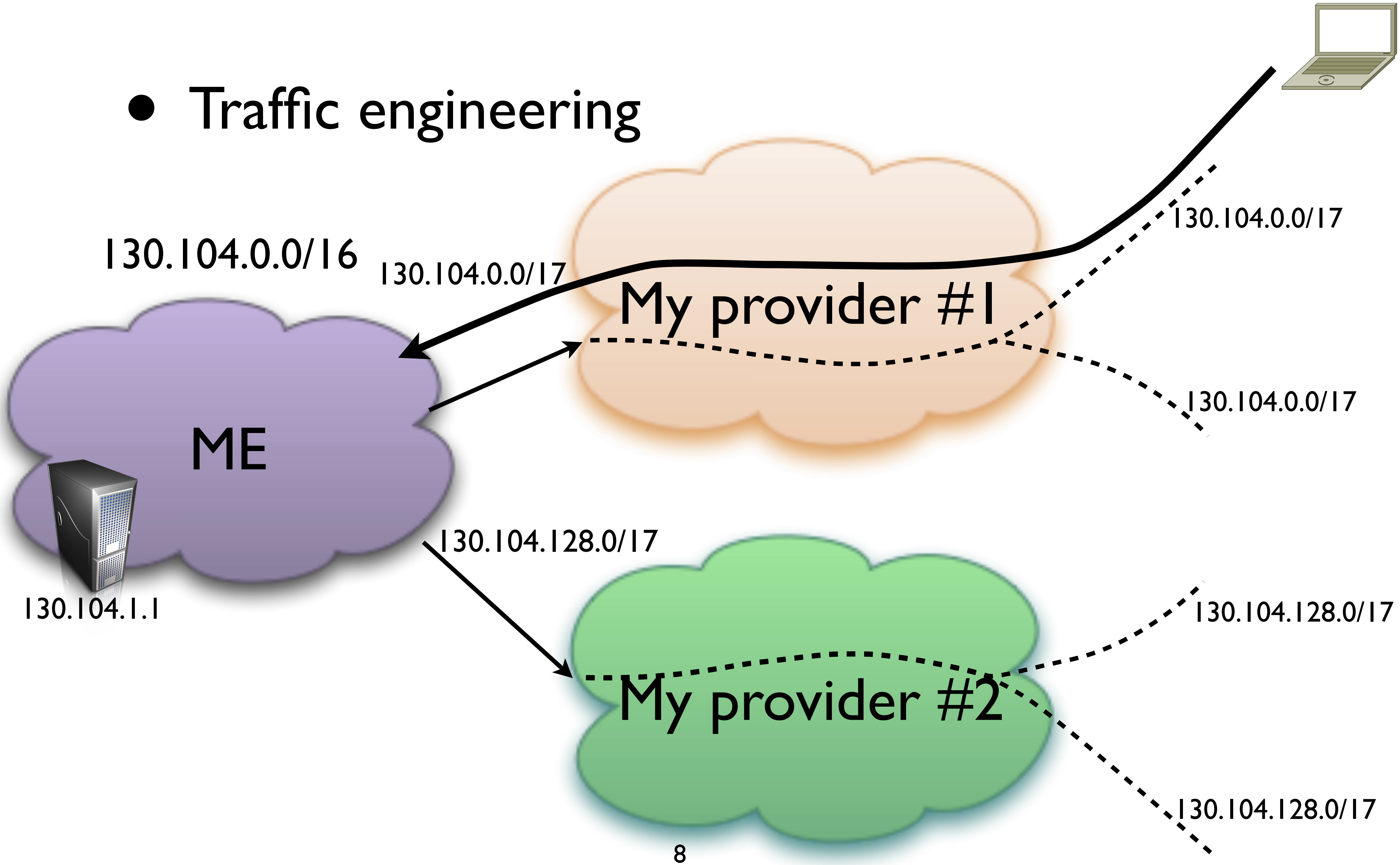
Why so may (small) prefixes? (2)

- Traffic engineering



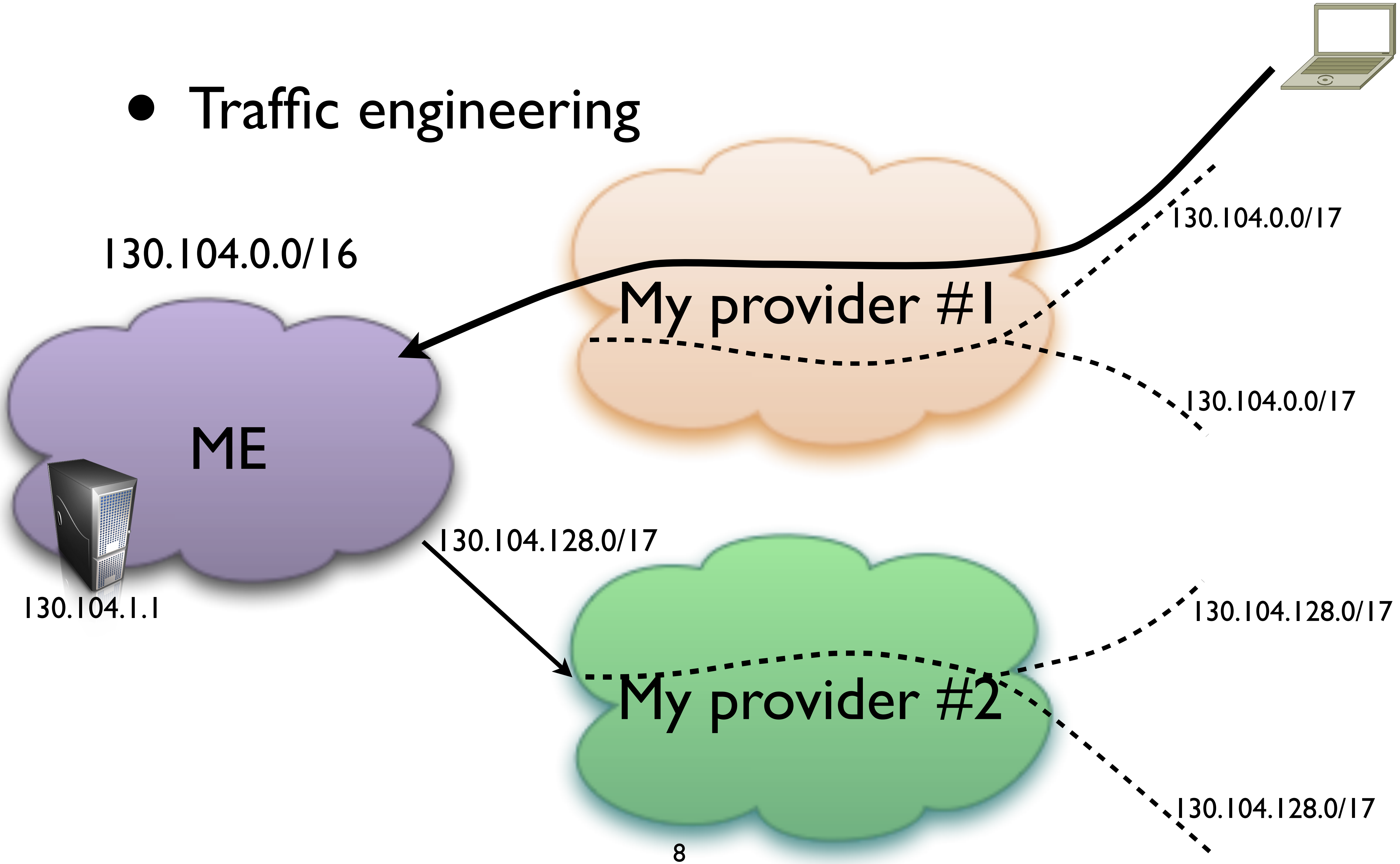
Why so may (small) prefixes? (2)

- Traffic engineering



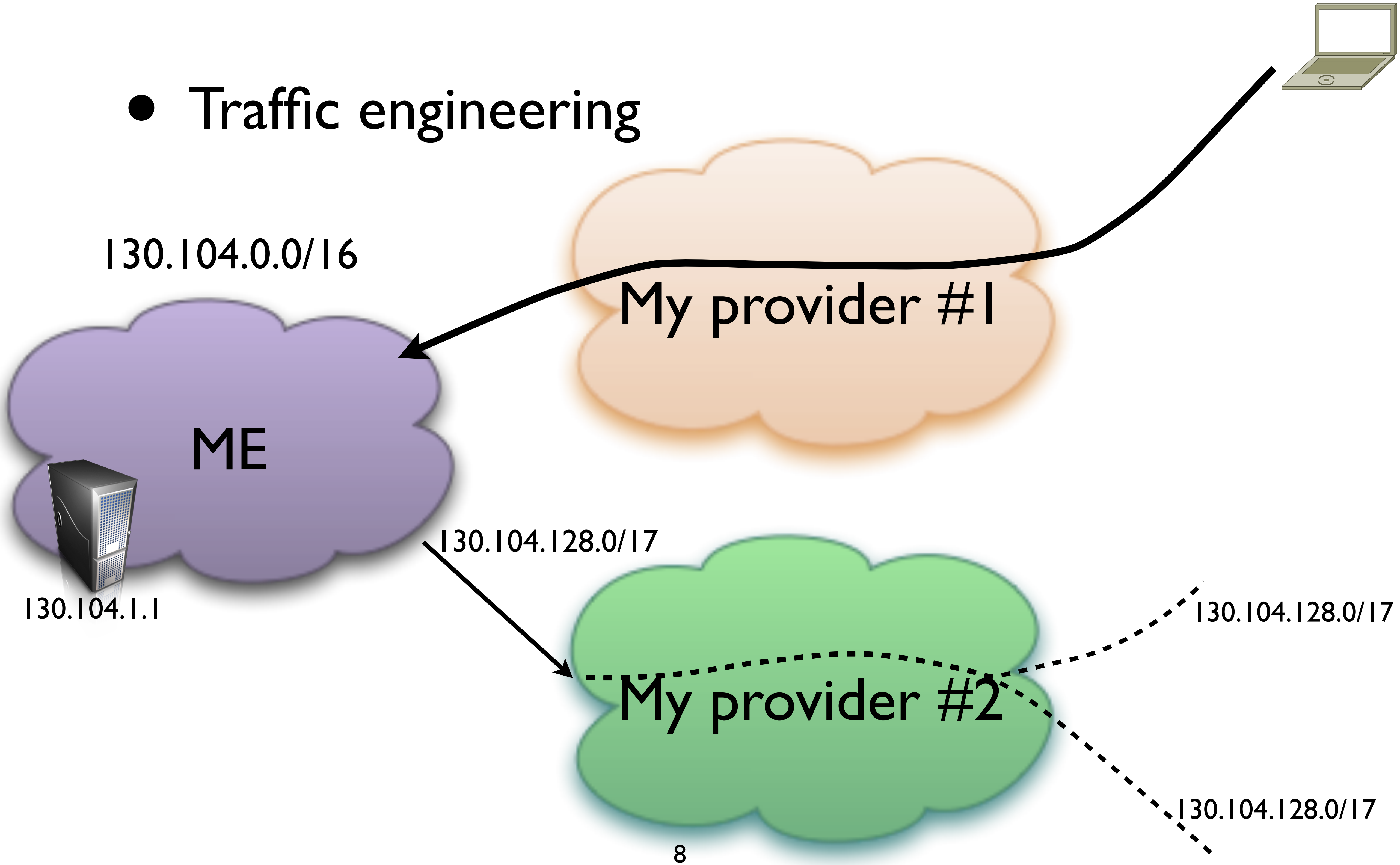
Why so may (small) prefixes? (2)

- Traffic engineering



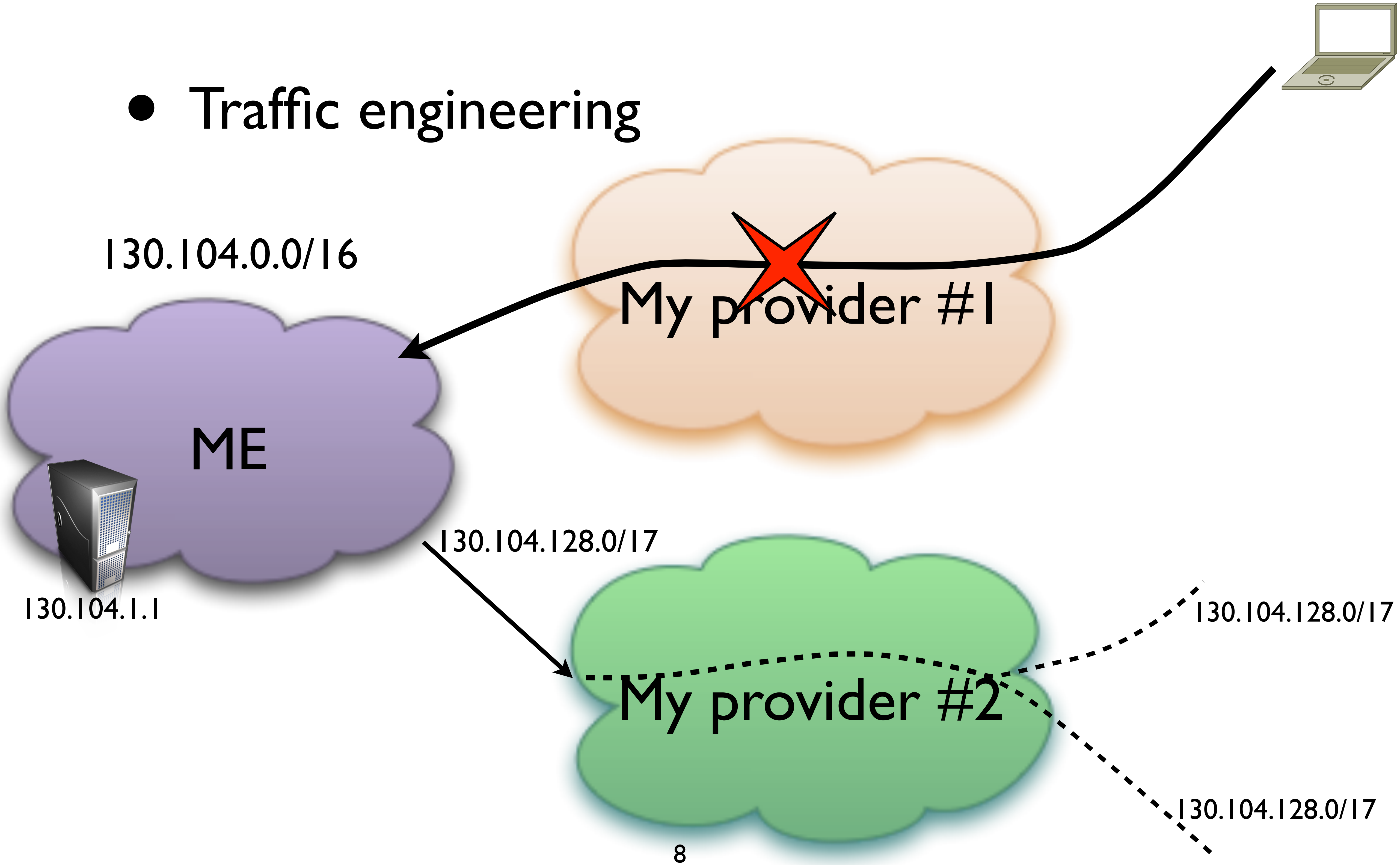
Why so may (small) prefixes? (2)

- Traffic engineering



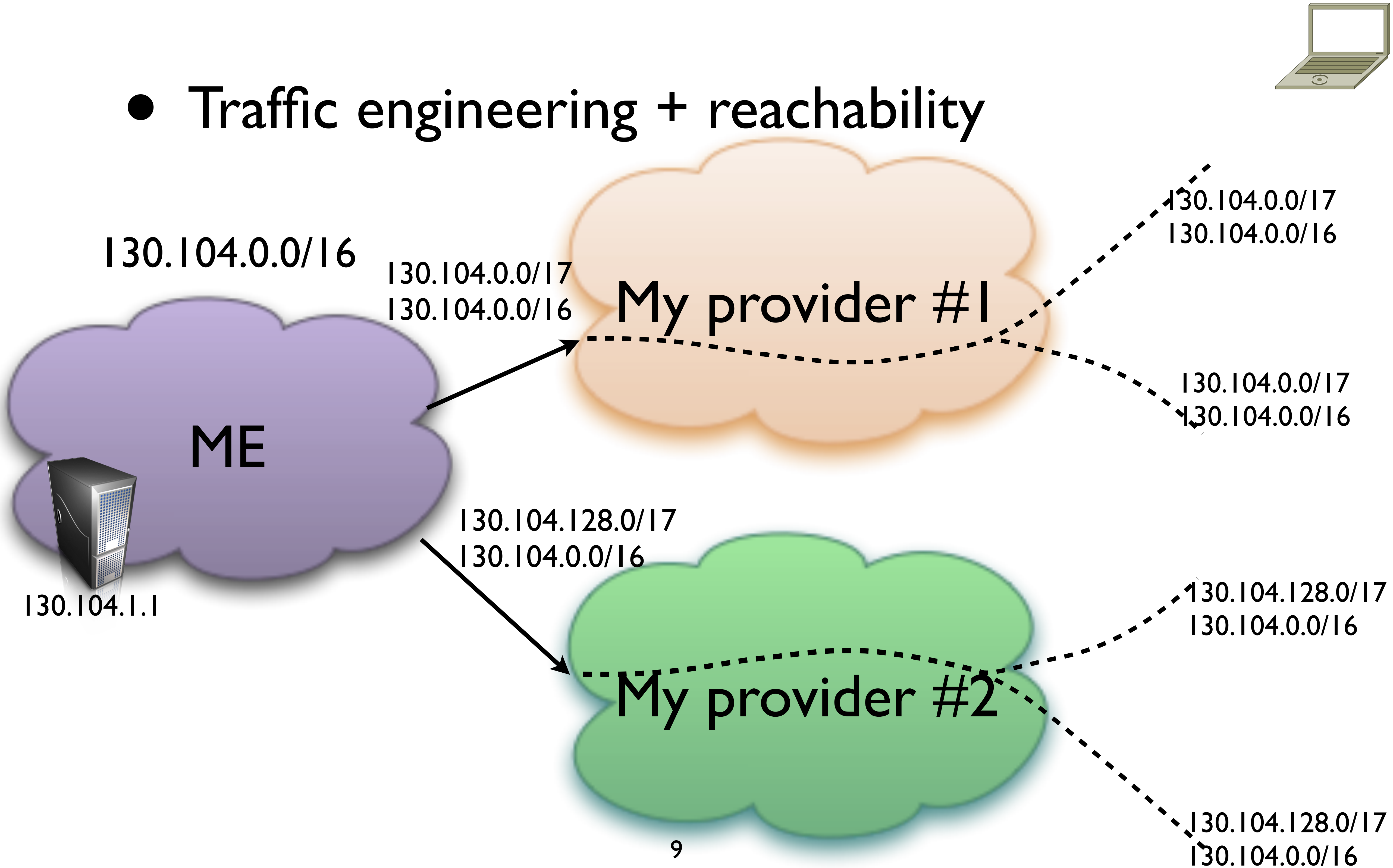
Why so may (small) prefixes? (2)

- Traffic engineering



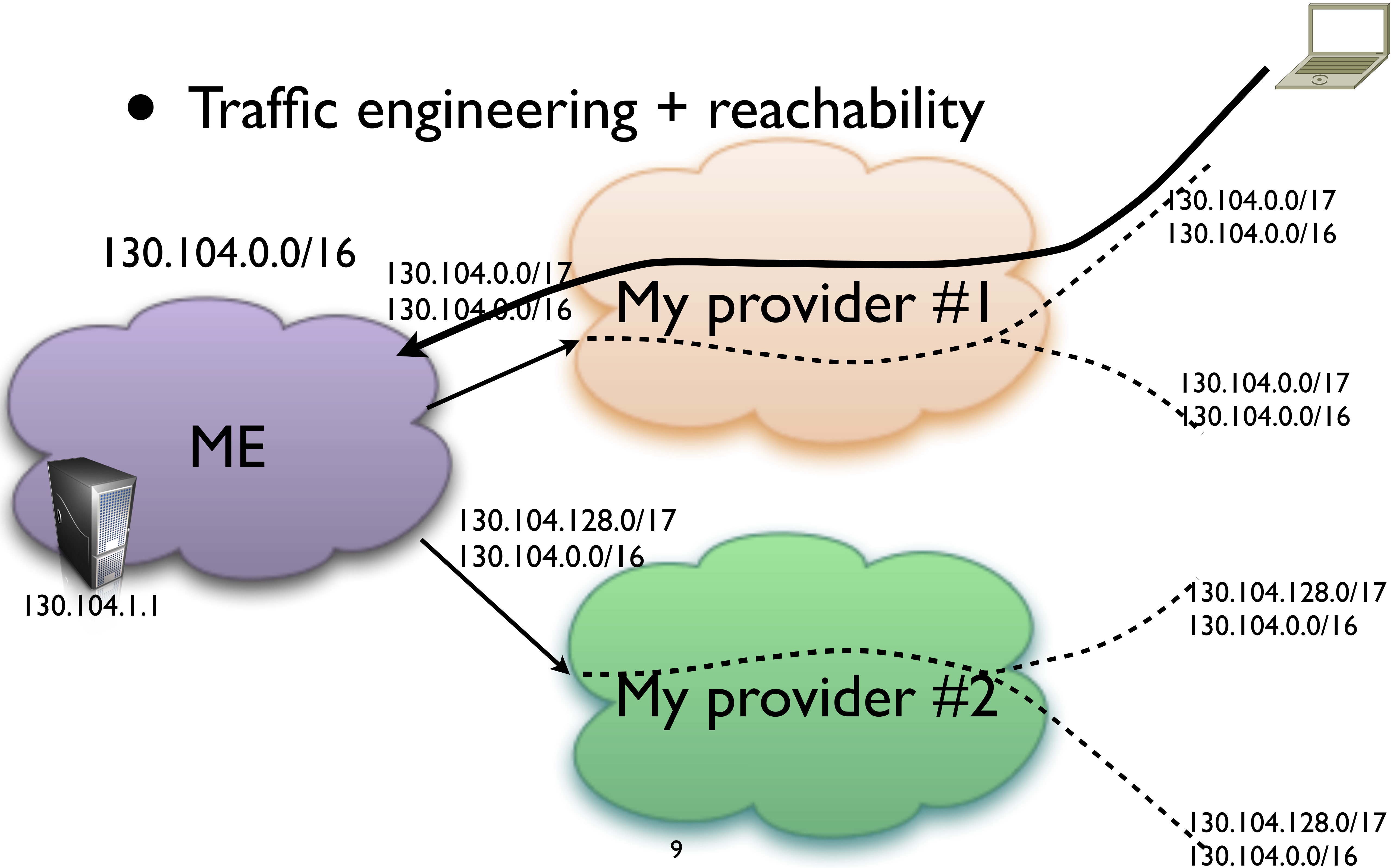
Why so may (small) prefixes? (3)

- Traffic engineering + reachability



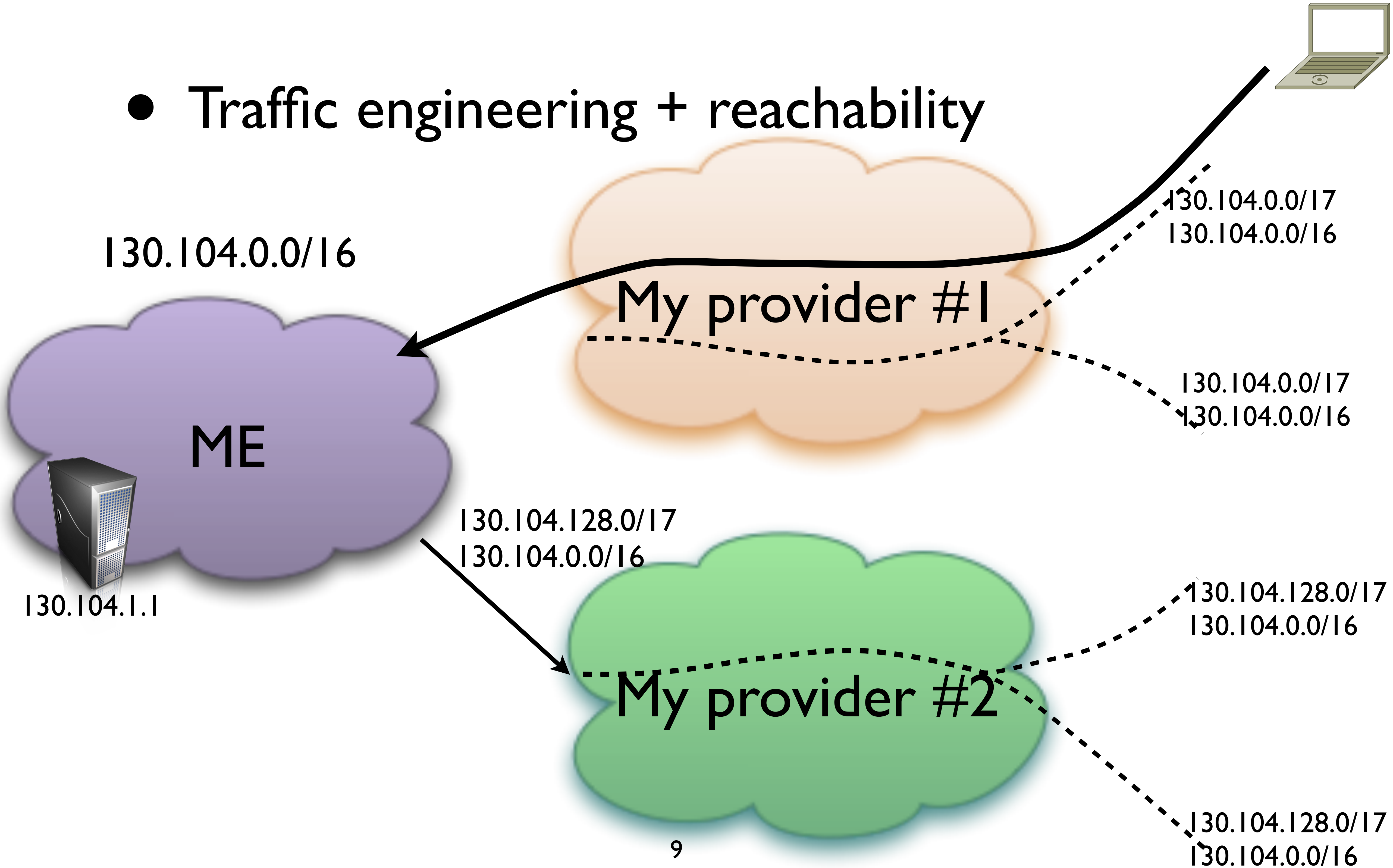
Why so may (small) prefixes? (3)

- Traffic engineering + reachability



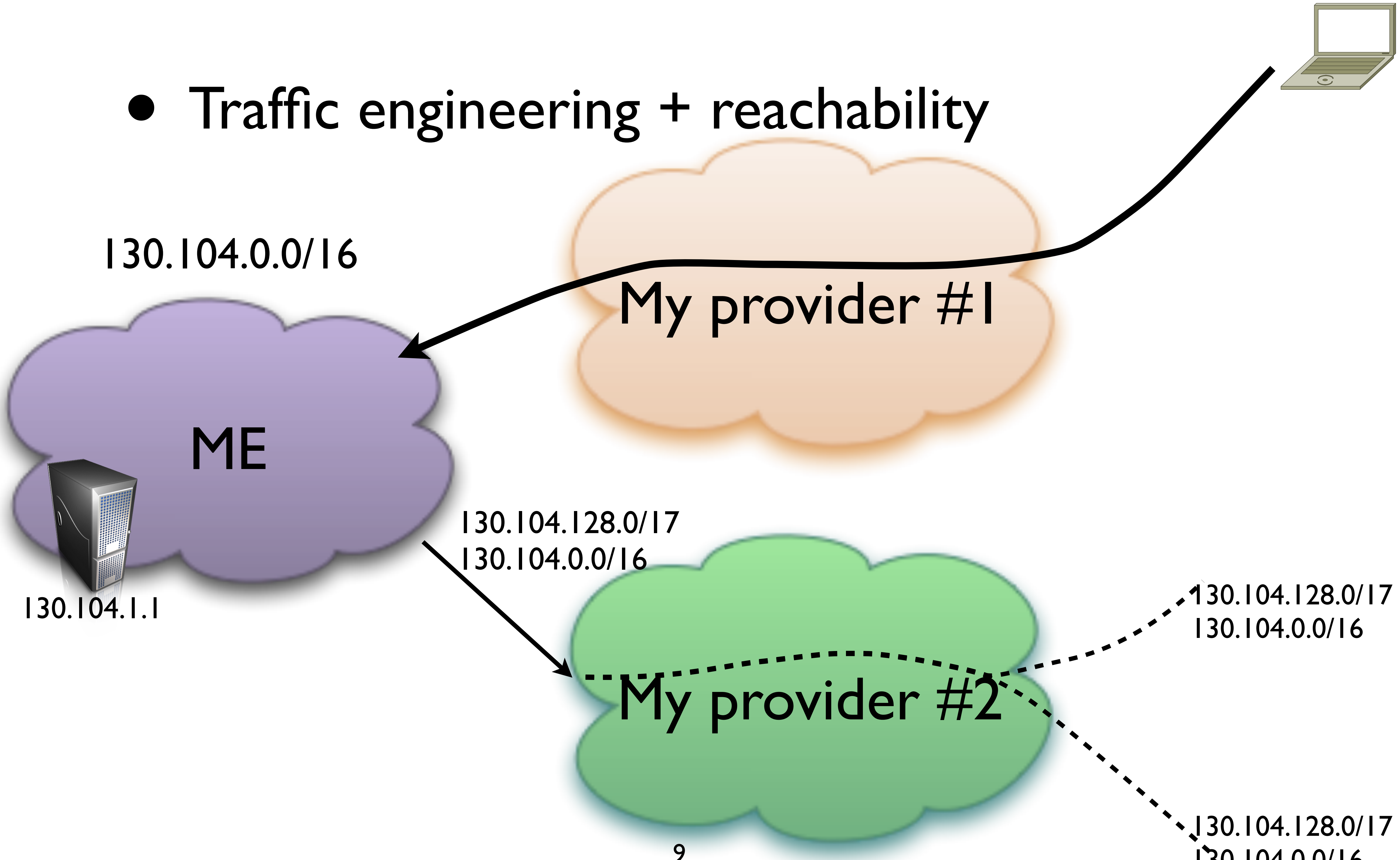
Why so may (small) prefixes? (3)

- Traffic engineering + reachability



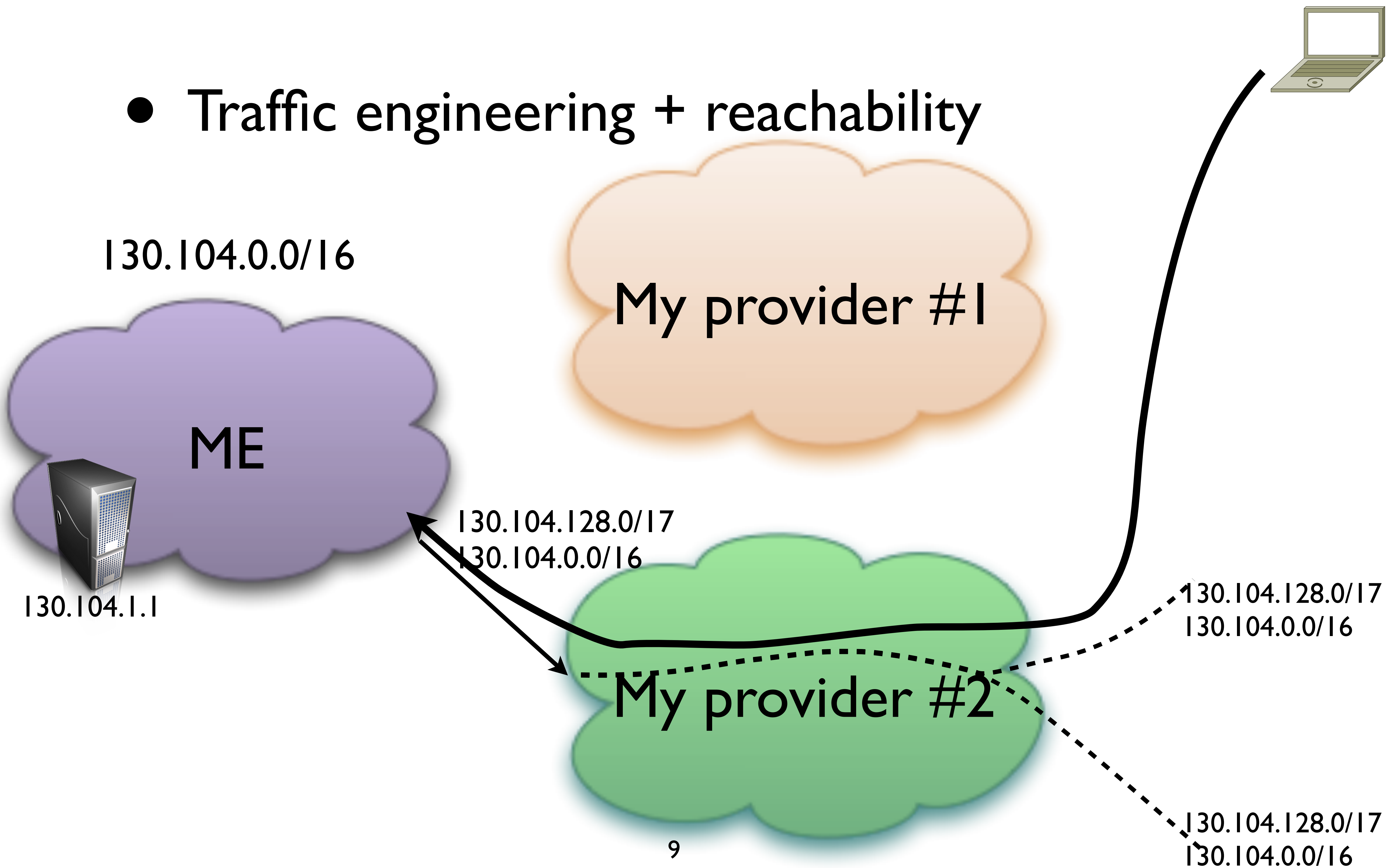
Why so may (small) prefixes? (3)

- Traffic engineering + reachability



Why so may (small) prefixes? (3)

- Traffic engineering + reachability



Why so may (small) prefixes? (4)

- Allocation of IP prefixes to sites
  - Initial solution chosen by IANA
    - First come, first served for all qualifying sites

```
130.100.0.0/16 ripencc  adv
130.101.0.0/16 arin     adv
130.102.0.0/16 apnic    adv
130.103.0.0/16 arin     unadv
130.104.0.0/16 ripencc  adv
```

    - Few constraints on which sites qualify for an IP prefix, owned forever
    - Classful network design (/8, /16, /24)
  - Hard to aggregate

Why so may (small) prefixes? (5)

- Allocation of IP prefixes to sites
  - Solution chosen by RIRs after CIDR
    - Provider Independent (PI) Prefixes
      - Given by RIRs to qualifying sites (basically ISPs paying their membership dues to the RIR)
      - Owned by the site forever and can be globally announced

Why so may (small) prefixes? (6)

- Allocation of IP prefixes to sites
    - Solution chosen by RIRs after CIDR
        - Provider Aggregatable (PA) Prefixes
            - Given by ISPs from their own address block to customers
            - Customers are expected to return their prefix to its owner if they change from ISP
        - ... but provider lock-in, renumbering burden...

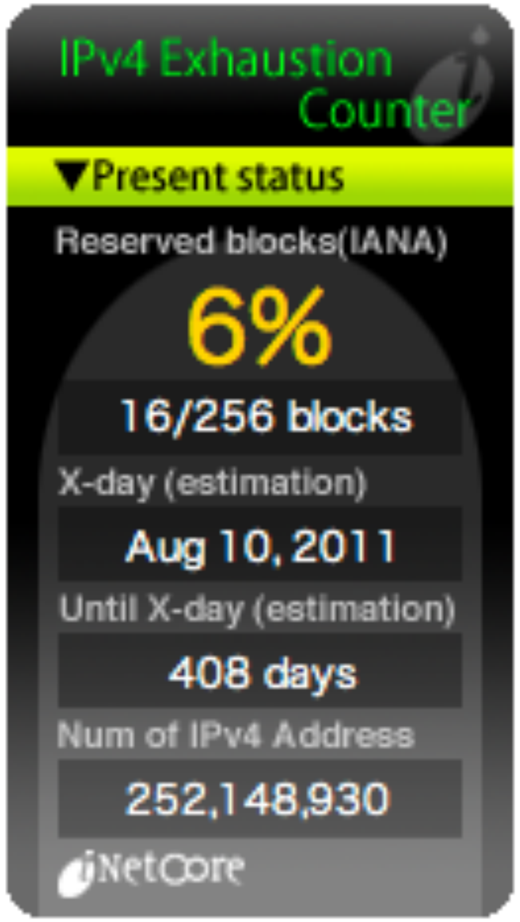
Traffic Engineering

- Outgoing TE is “easy”
- Incoming TE is “hard”
  - Injection of prefixes limited to /24s and prone to aggregation
  - BGP tweaks (prepending&co) are tweaks
  - Hard/costly to have a per client TE

Routing table

- Prefixes are announced to all the Internet
  - FIB size may become a problem
- Changes are potentially seen by everybody
  - Churn may become a problem

IPv4 exhaustion



- Hum, yes, in top of this we are experiencing IPv4 addresses exhaustion!

Source: http://www.potaroo.net/tools/ipv4/

Internet is not going so well

- Really many prefixes
  - Churn
- Hard to do fine grained incoming traffic engineering
- IP addresses are becoming as rare as gold!

Internet is not going so well

- Really many prefixes
  - Churn
- Hard to do fine grained incoming traffic engineering
- IP addresses are becoming as rare as gold!
- **How can we improve it?**

Separating Identifiers from Locators

The complementary roles of IP addresses

- The IP addresses currently used by endhosts play two complementary roles
  - Identifier role: the IP address identifies (with port) the endpoint of transport flows
  - Locator role: the IP address indicates the paths used to reach the endhost
    - these paths are updated by routing protocols after each topology change

The Locator/Identifier Separation

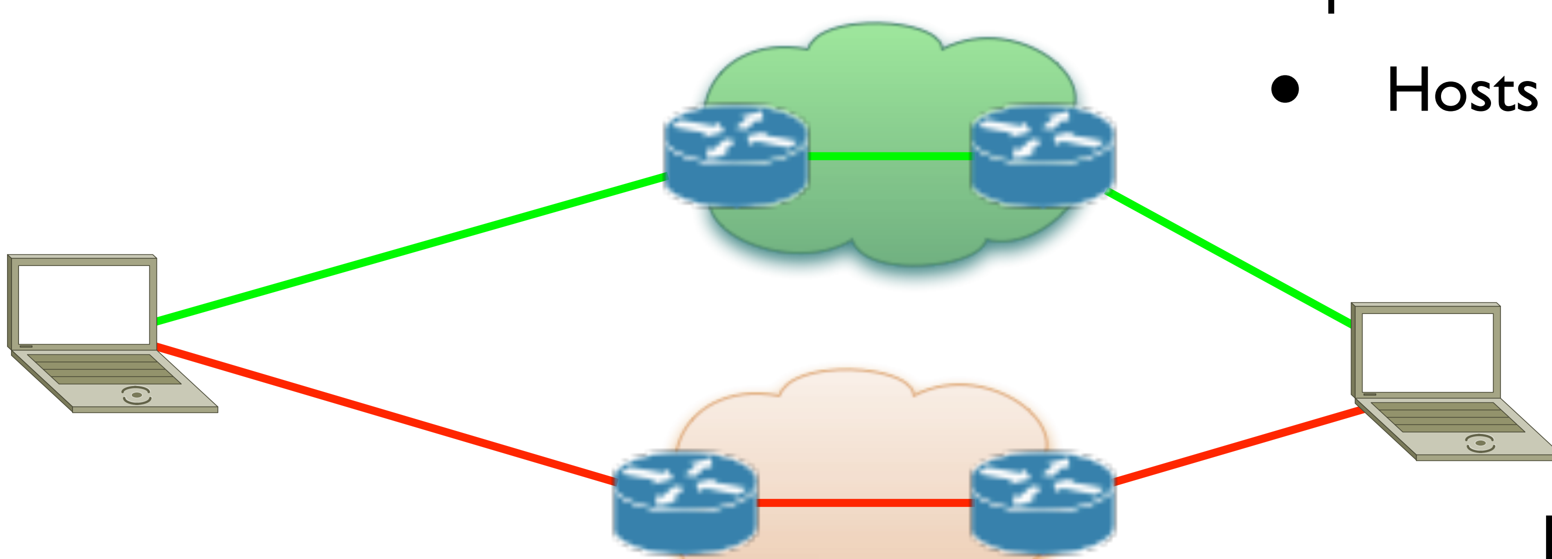
- Today, changing the locator means changing the identifier, breaking the pending flows
- Separating the locator and the identifier roles to avoid breaking the flows
  - Host-based approach
  - Network-based approach

Host-based Loc/ID split

Transport layer

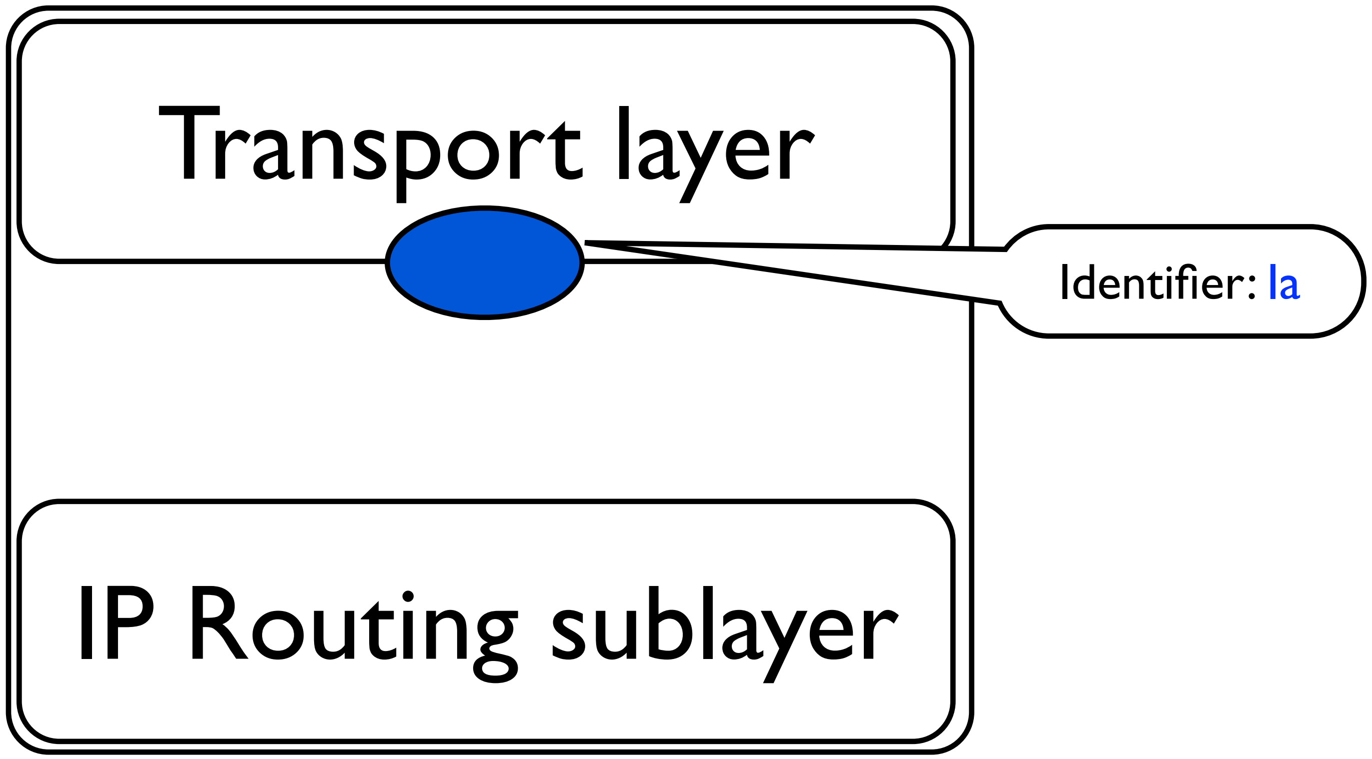
IP Routing sublayer

- Roles
  - Translates the packets so that
    - Transport layer only sees the host identifier
    - IP Routing sublayer sees only locators
  - Manages the set of locators
  - Switches from one locator to another upon move or after link failure
    - Hosts maintain some state

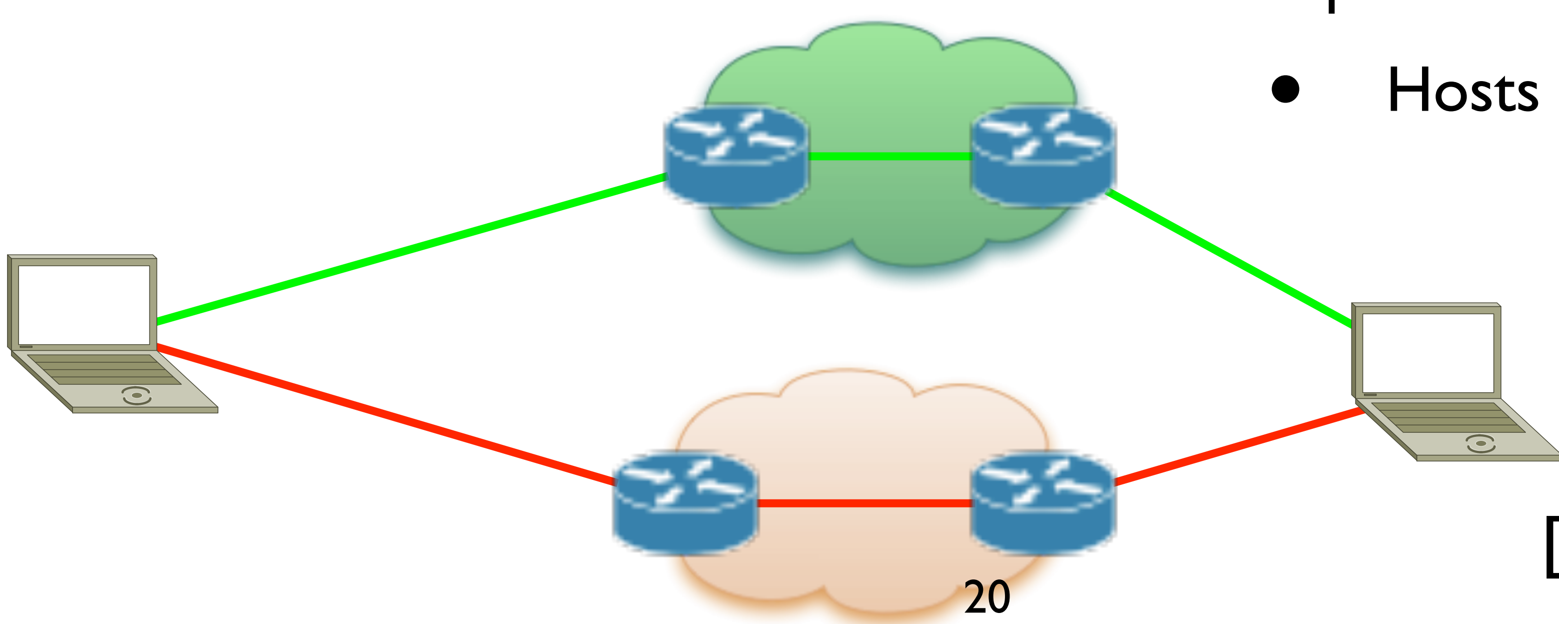


[HIP, ILNP, shim6, Six/One]

Host-based Loc/ID split

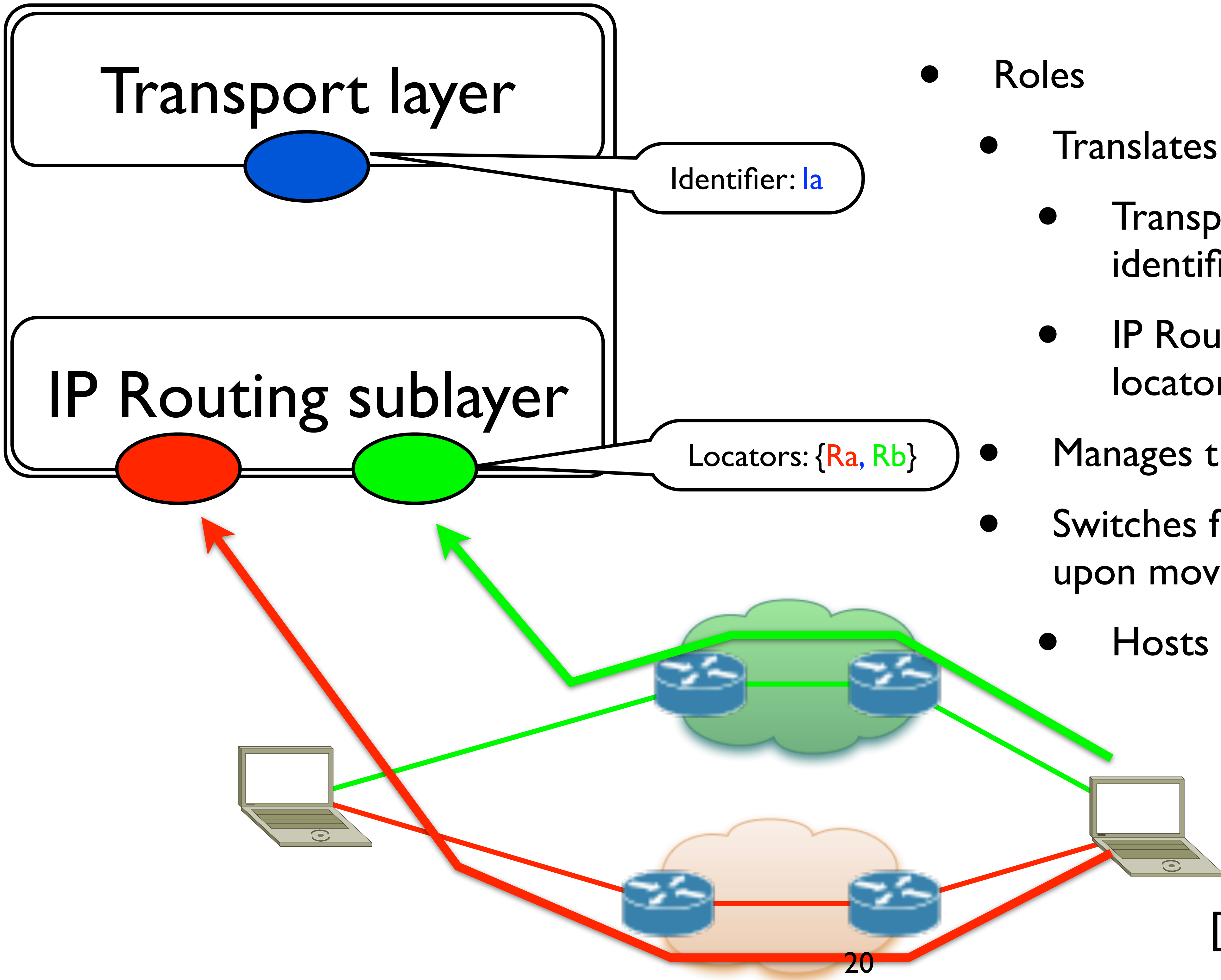


- Roles
  - Translates the packets so that
    - Transport layer only sees the host identifier
    - IP Routing sublayer sees only locators
  - Manages the set of locators
  - Switches from one locator to another upon move or after link failure
    - Hosts maintain some state



[HIP, ILNP, shim6, Six/One]

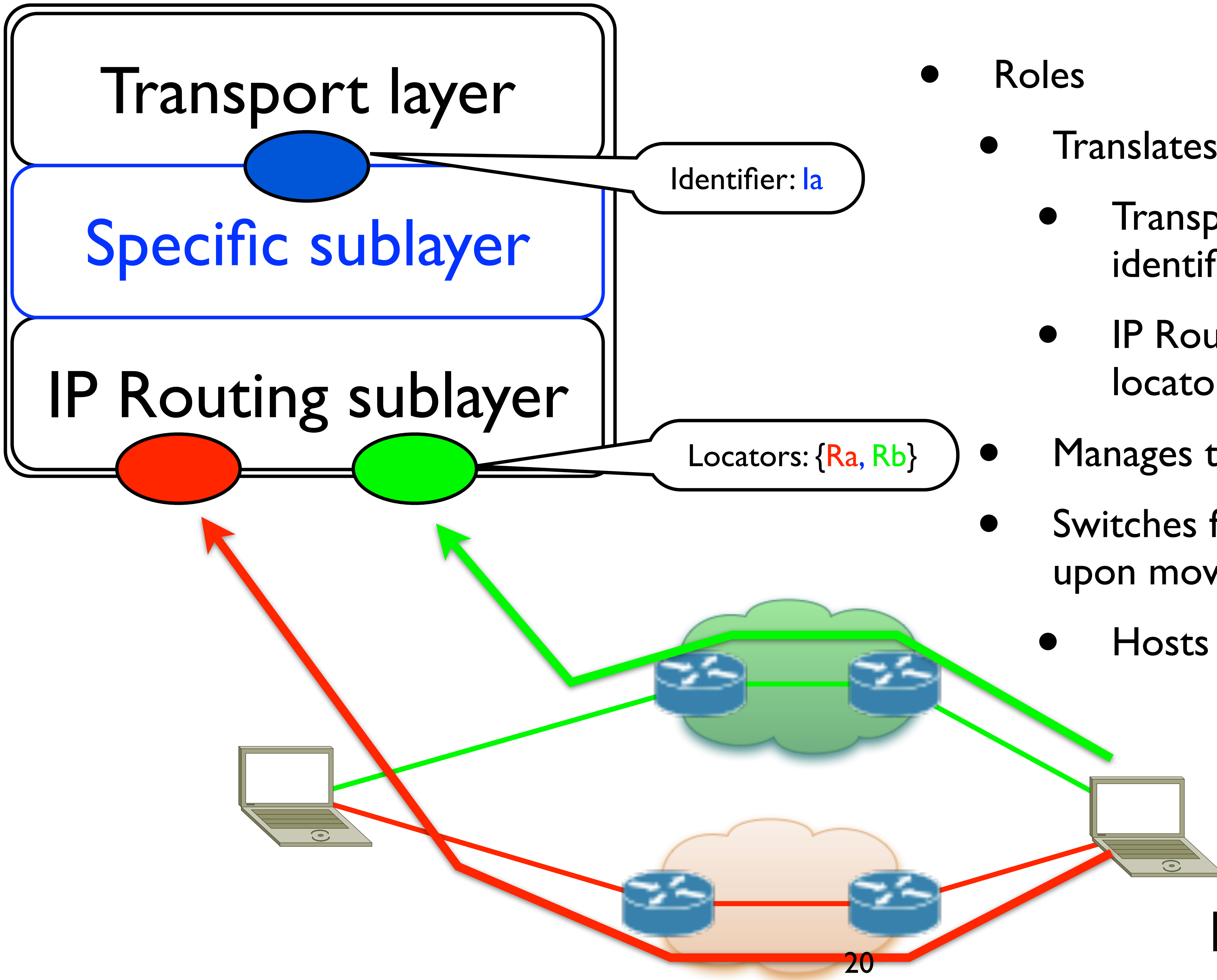
Host-based Loc/ID split



- Roles
  - Translates the packets so that
    - Transport layer only sees the host identifier
    - IP Routing sublayer sees only locators
  - Manages the set of locators
  - Switches from one locator to another upon move or after link failure
    - Hosts maintain some state

[HIP, ILNP, shim6, Six/One]

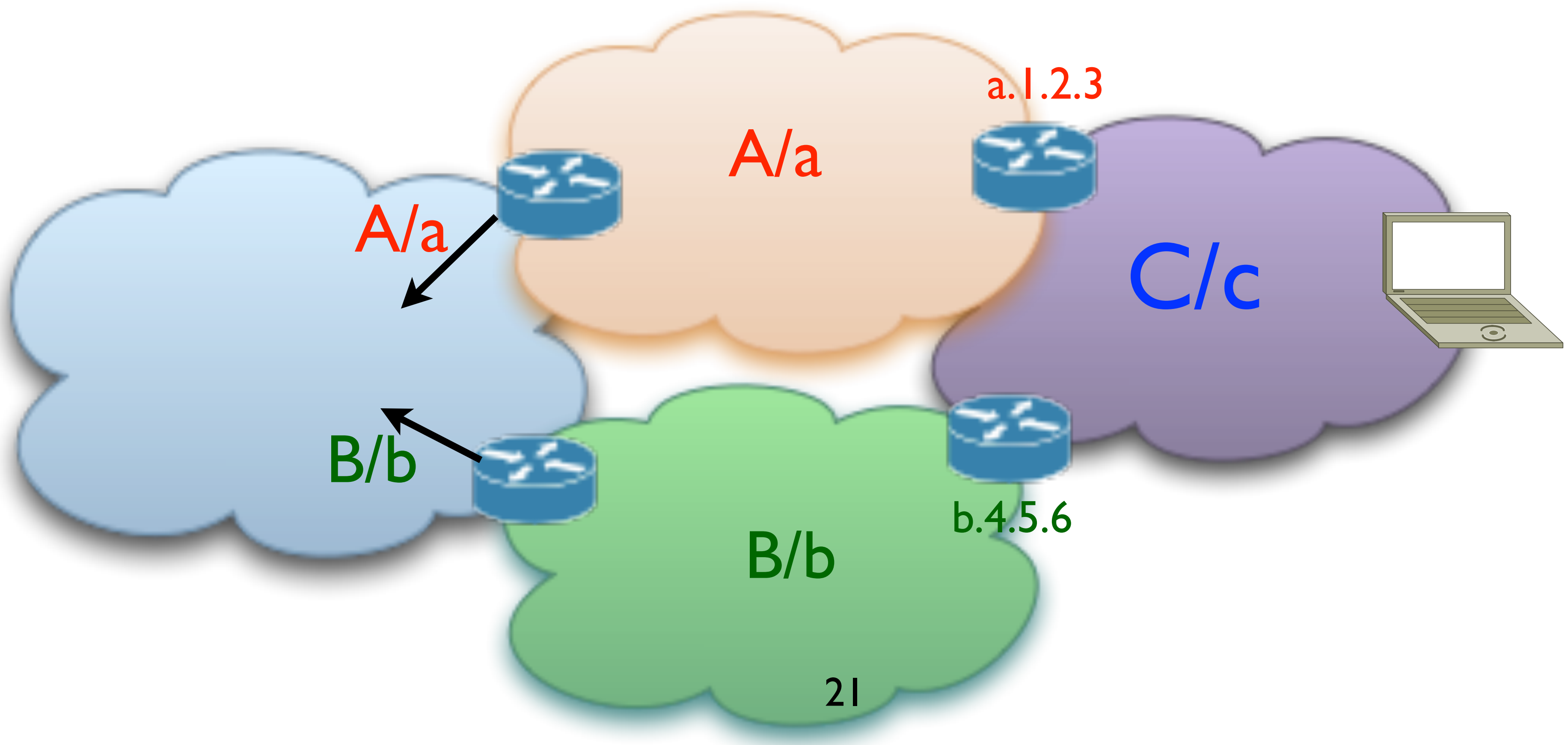
Host-based Loc/ID split



- Roles
  - Translates the packets so that
    - Transport layer only sees the host identifier
    - IP Routing sublayer sees only locators
  - Manages the set of locators
  - Switches from one locator to another upon move or after link failure
    - Hosts maintain some state

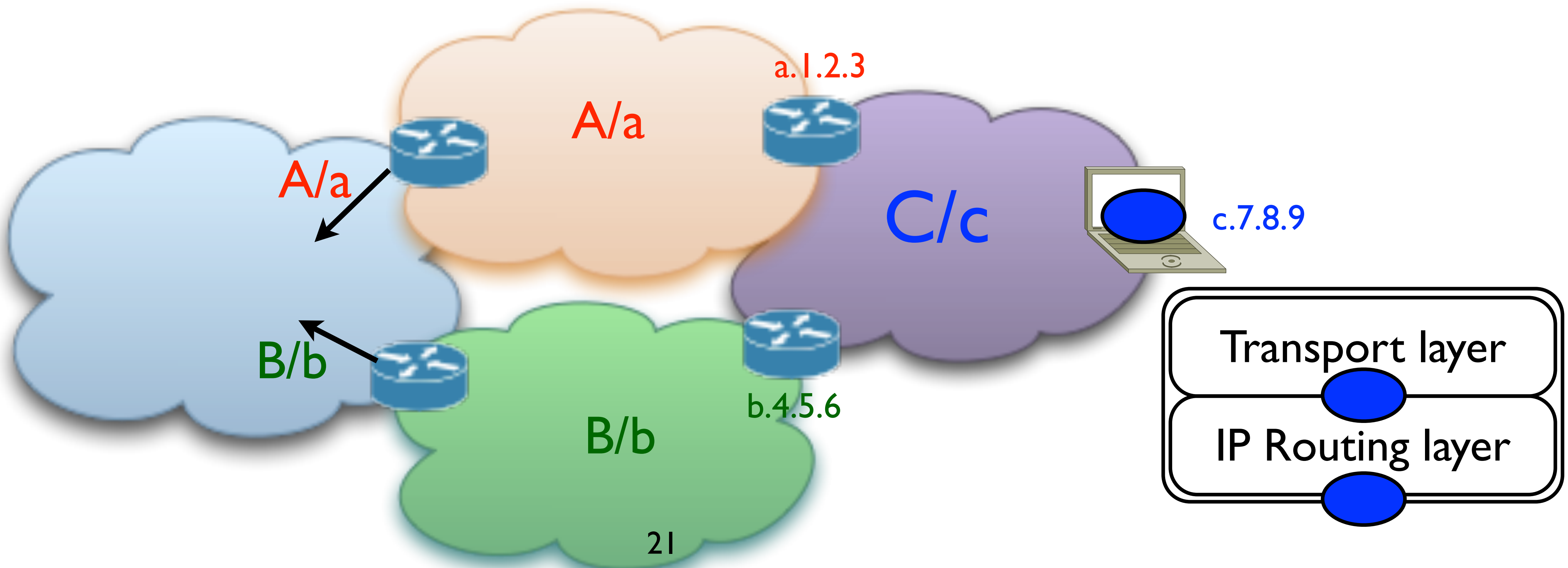
[HIP, ILNP, shim6, Six/One]

Network-based Loc/ID split



Network-based Loc/ID split

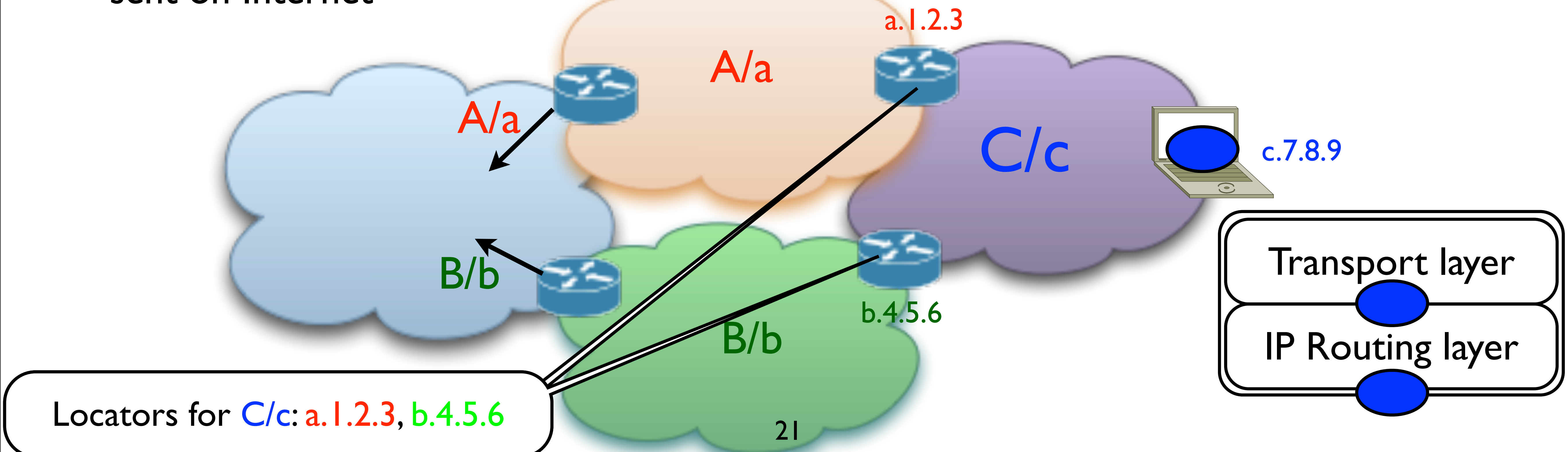
- Host's IP stack unchanged
  - Each host has one stable IP address
  - Used as identifier
  - **Not globally routable**



Network-based Loc/ID split

- Each edge router owns
  - Globally routed addresses used as locators
- **Mapping mechanism** is used to find locators associated to one identifier
- Packets from hosts are modified before being sent on Internet

- Host's IP stack unchanged
  - Each host has one stable IP address
  - Used as identifier
  - **Not globally routable**



Host vs Network-based Loc/ID split

- We need both!
- At work, connected directly to the wall
  - Let my company doing the stuff for the whole network
- In the street, calling with Skype over WIFI&3G
  - Prefer WIFI to 3G

Peter Paul Rubens

LISP, a network-based Loc/ID split solution

[LISP]

LISP in a nutshell

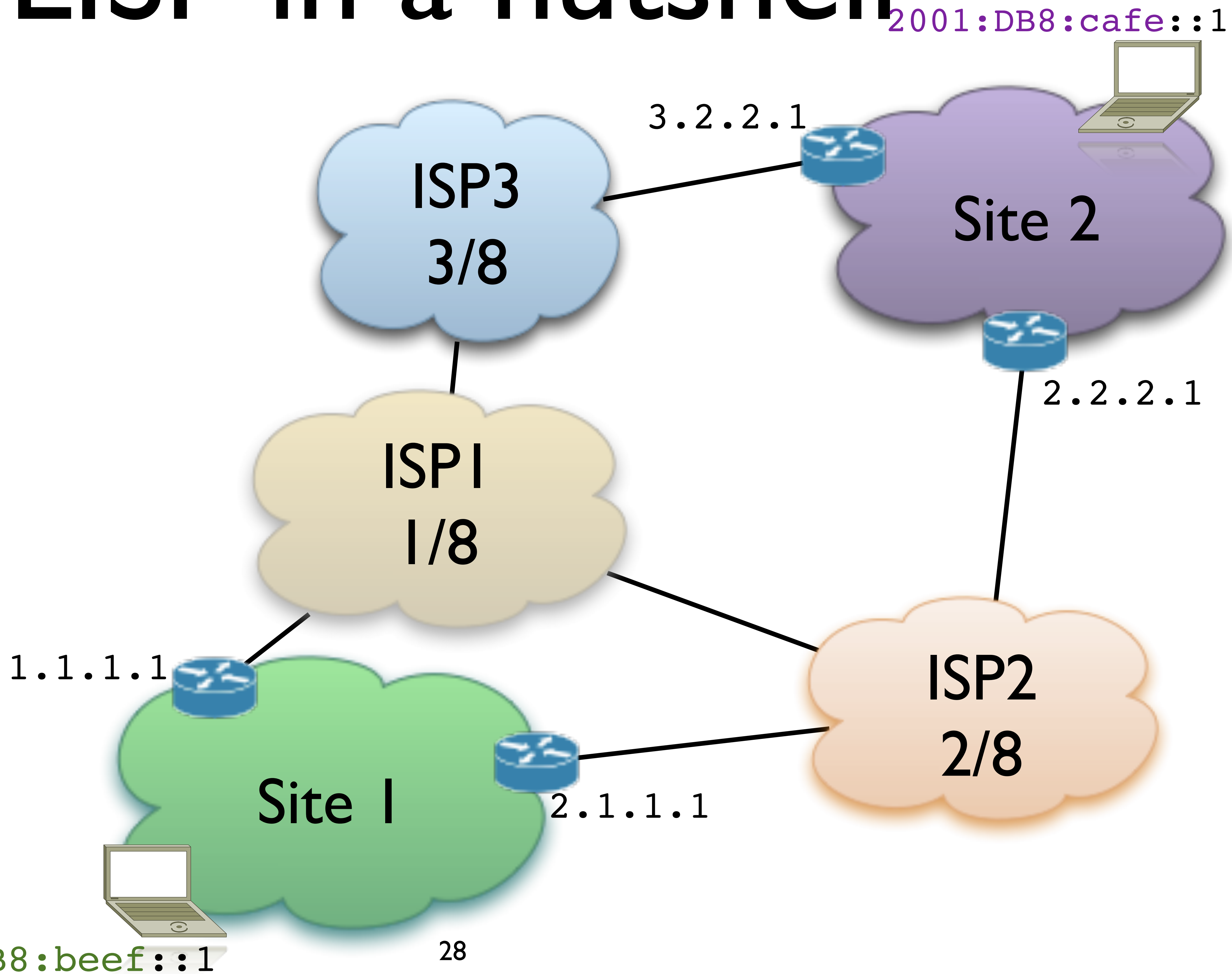
The Locator Identifier Separation Protocol (1/2)

- Define a router-based solution where current IP addresses are separated in two different spaces:
  - **Endpoint Identifiers (EID)**
    - Identify end-hosts
    - Non-globally routable
    - Hosts in a given site are expected to use EIDs in the same prefix
  - **Routing Locators (RLOC)**
    - Attached to routers (router interfaces)
    - Globally routable

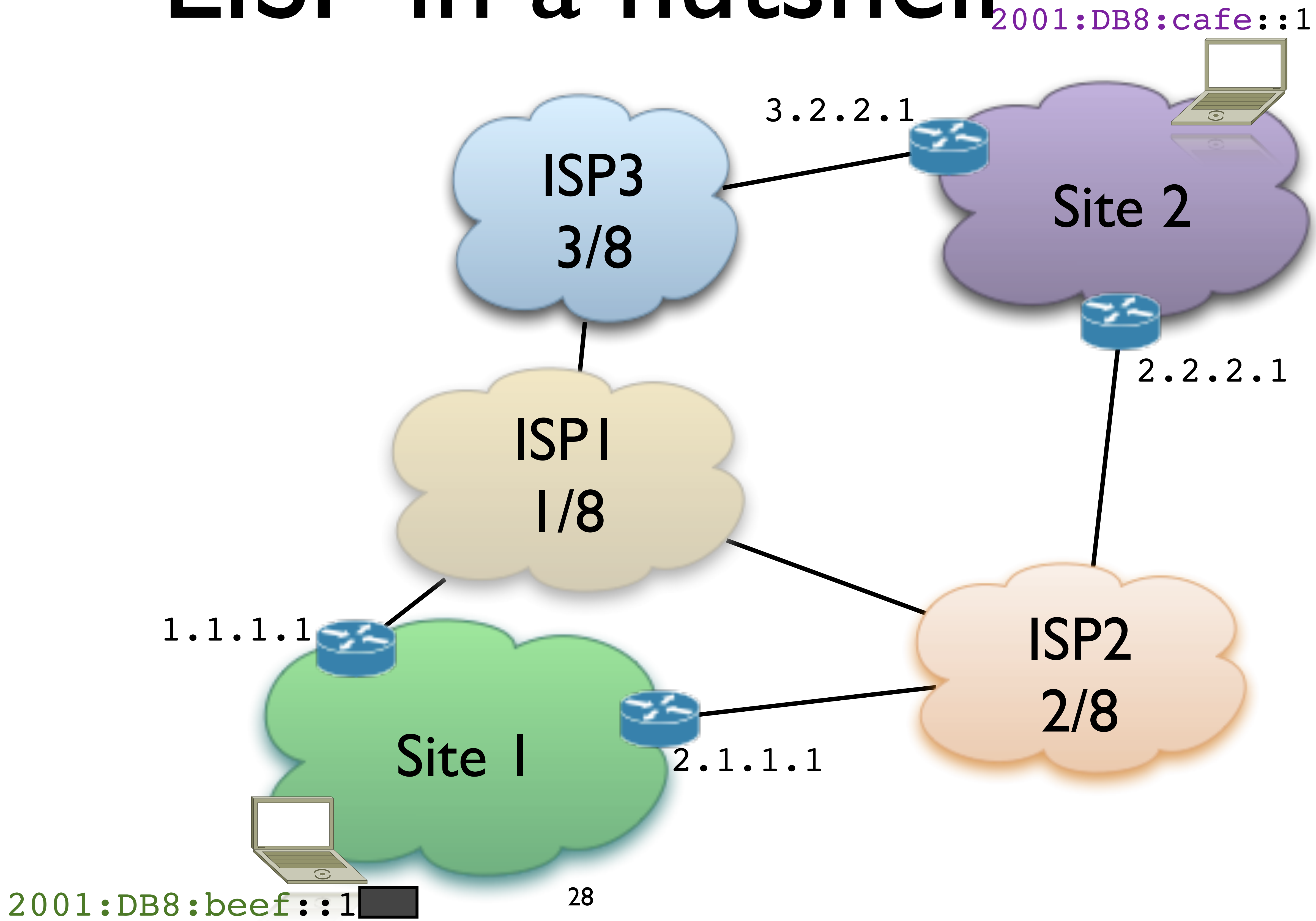
The Locator Identifier Separation Protocol (2/2)

- Follows the Map-and-Encap principle
  - A **mapping system** maps EID prefixes onto site routers RLOCs
  - Routers **encapsulate** the packets received from hosts before sending them towards the destination RLOC
  - Routers **decapsulate** the packets received from the Internet before sending them towards the destination hosts

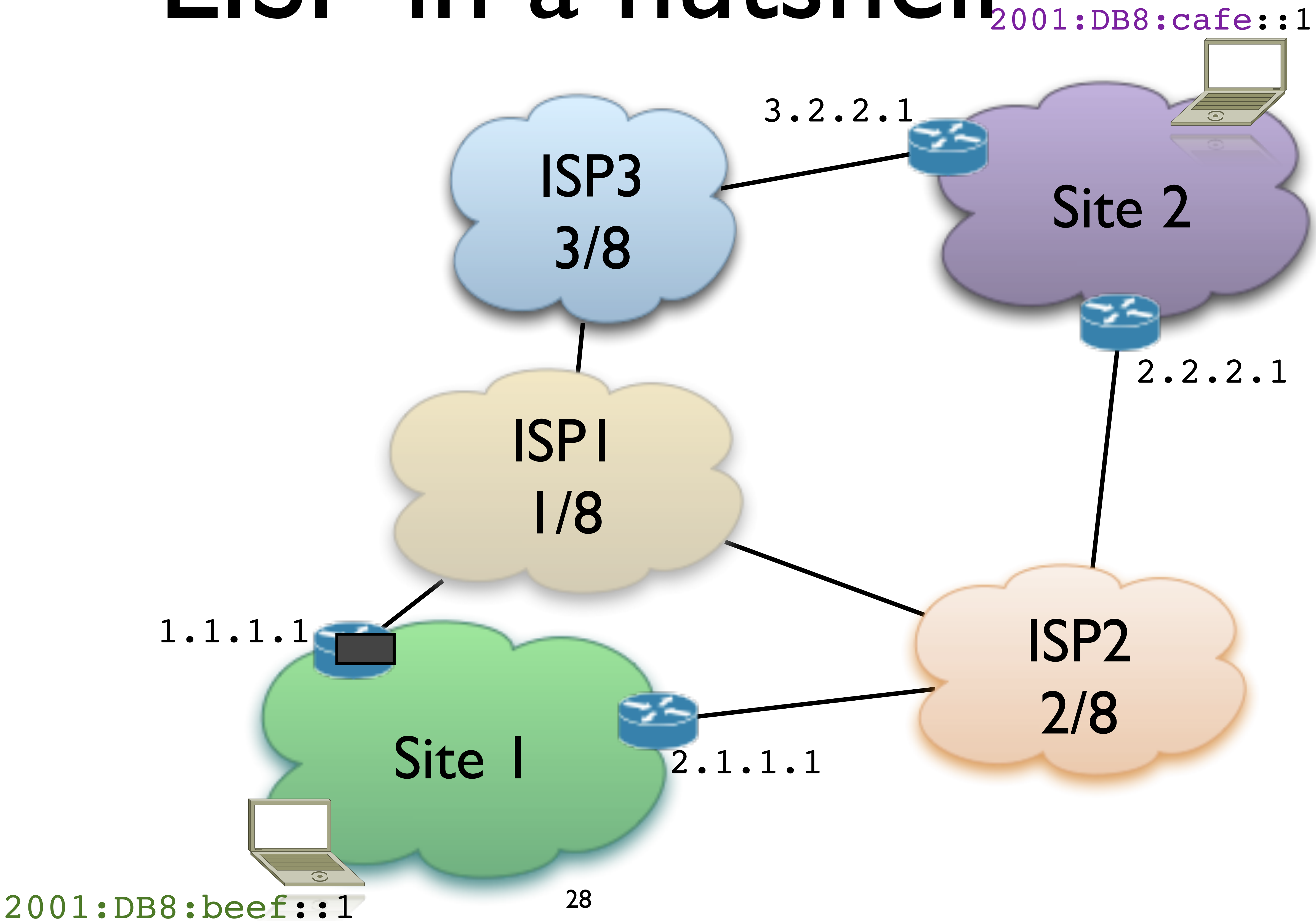
LISP in a nutshell



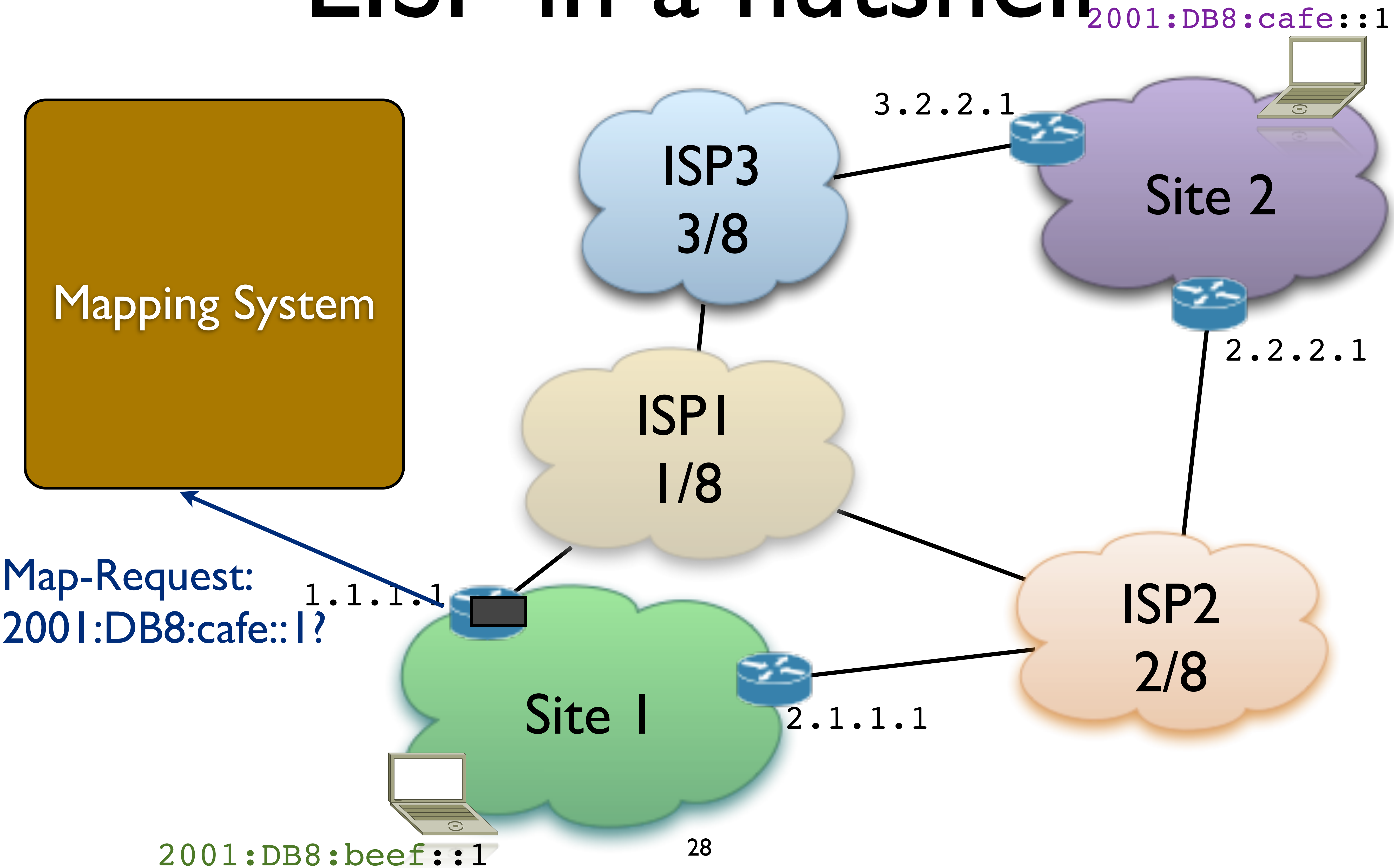
LISP in a nutshell



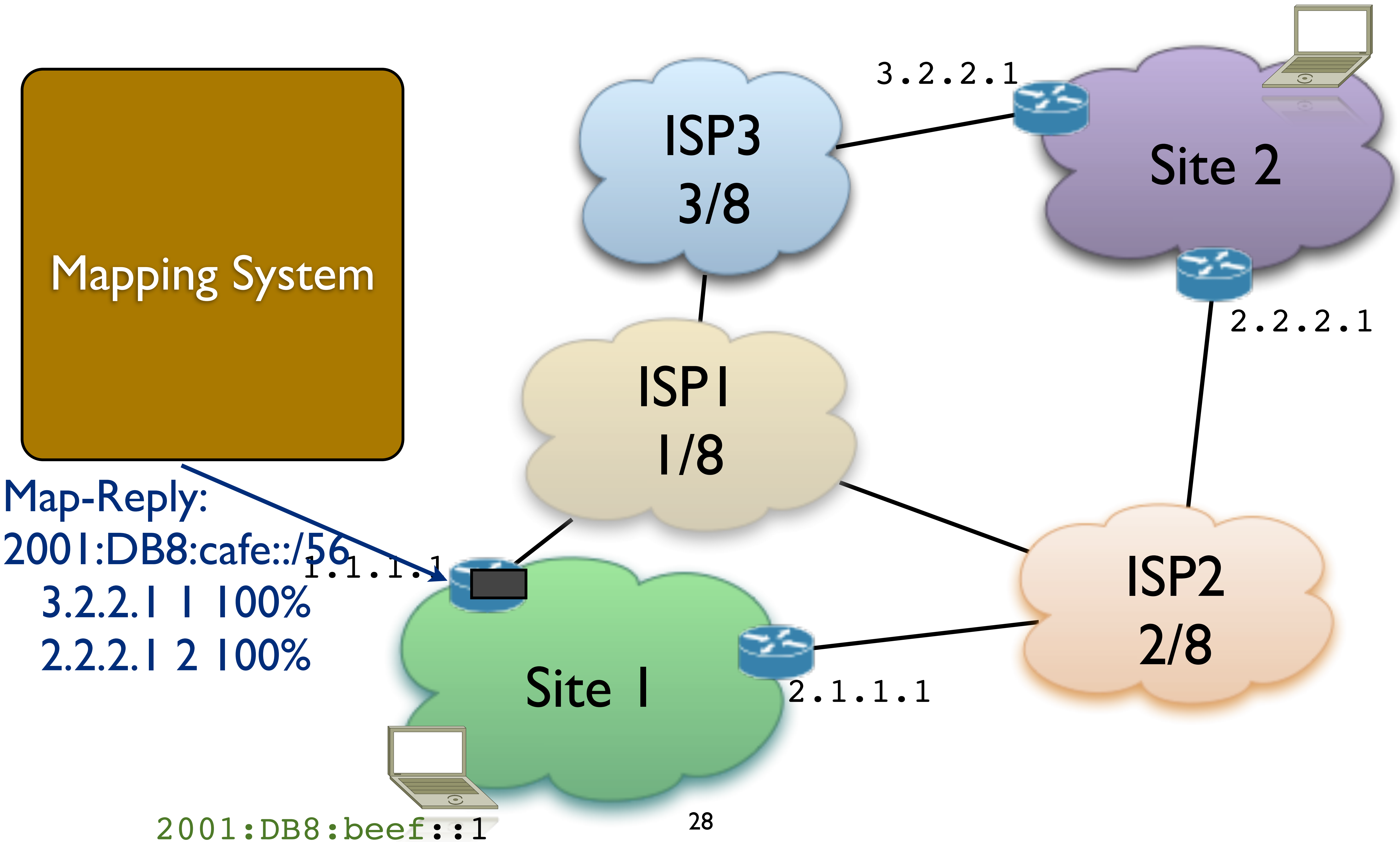
LISP in a nutshell



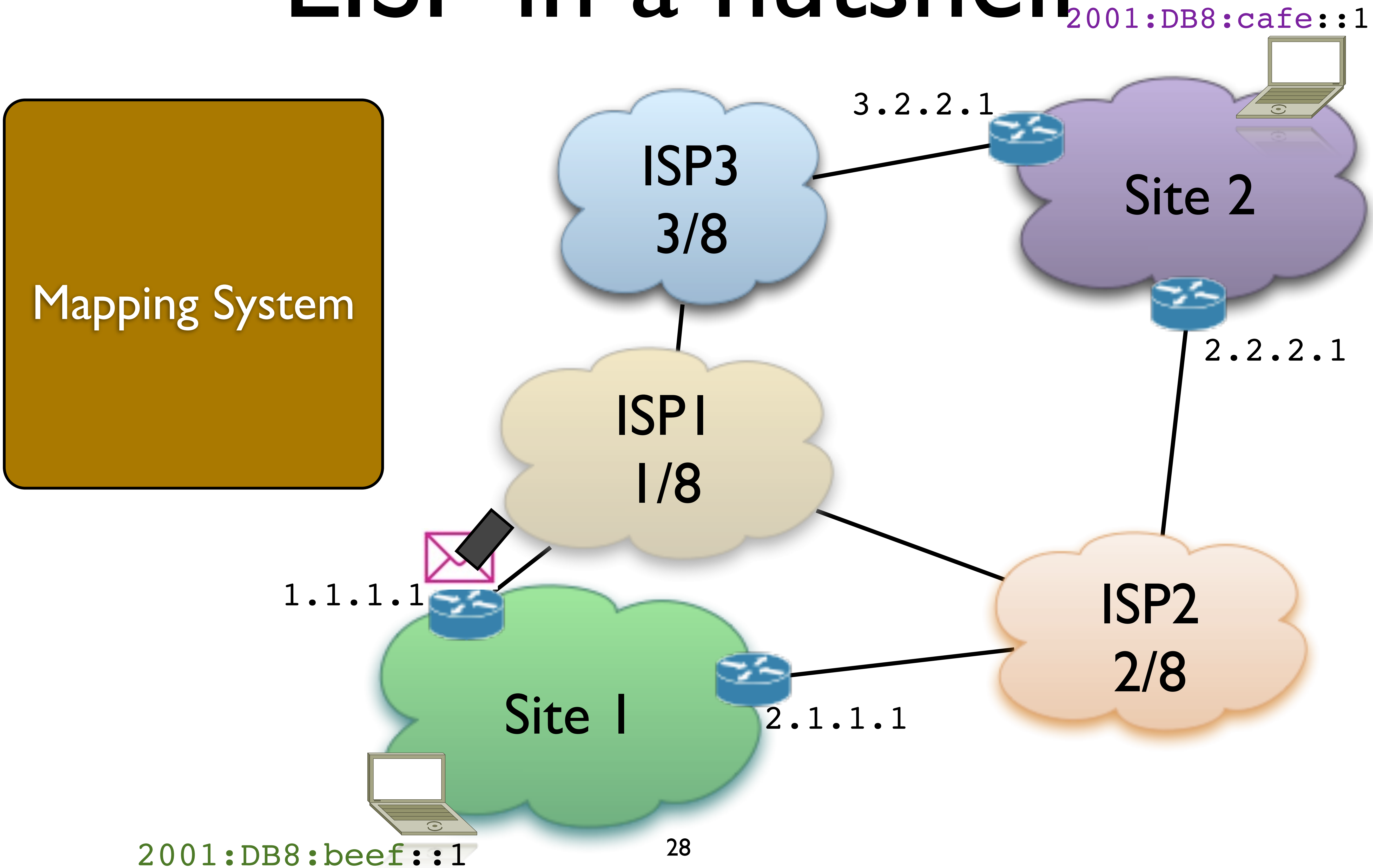
LISP in a nutshell



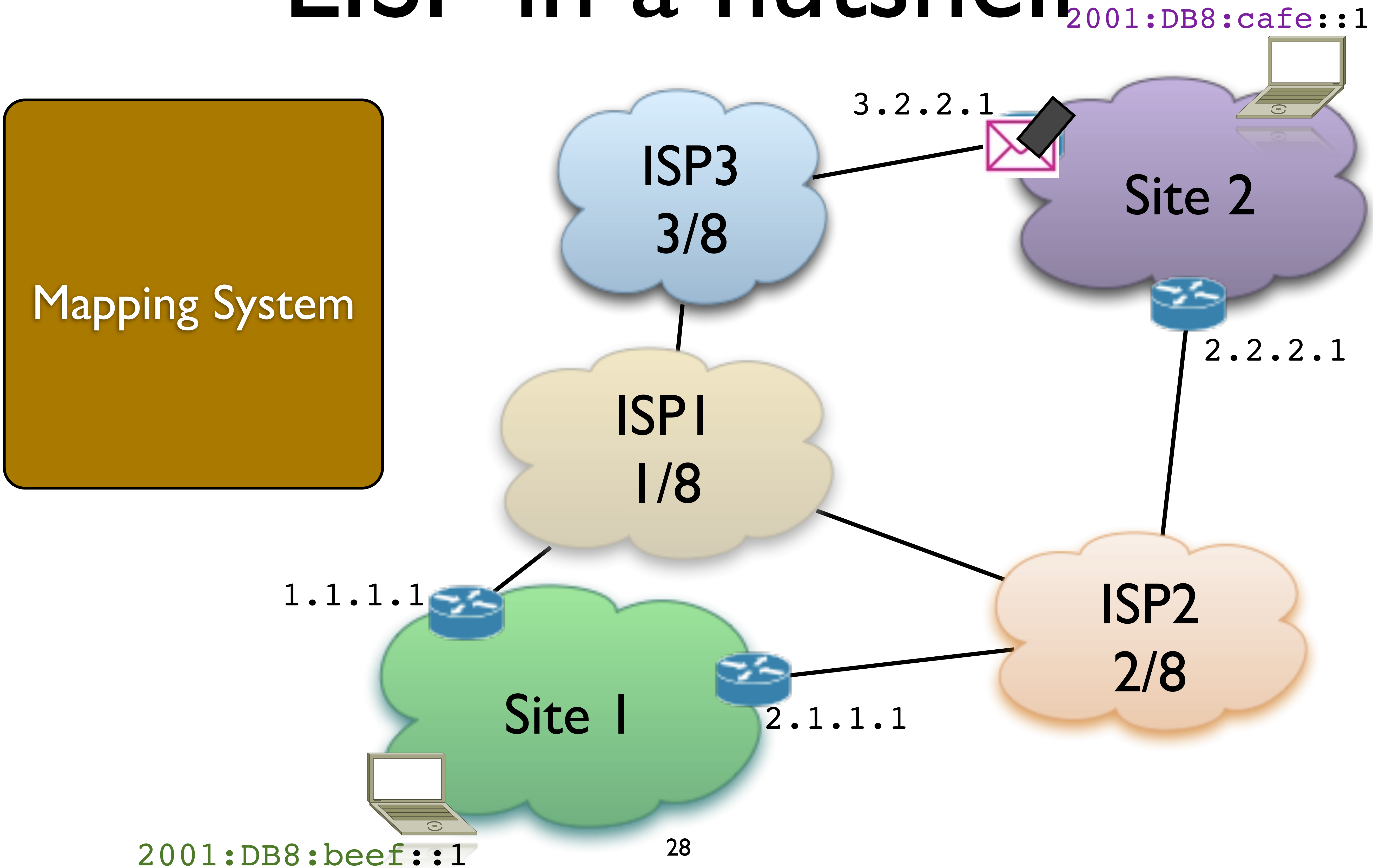
LISP in a nutshell



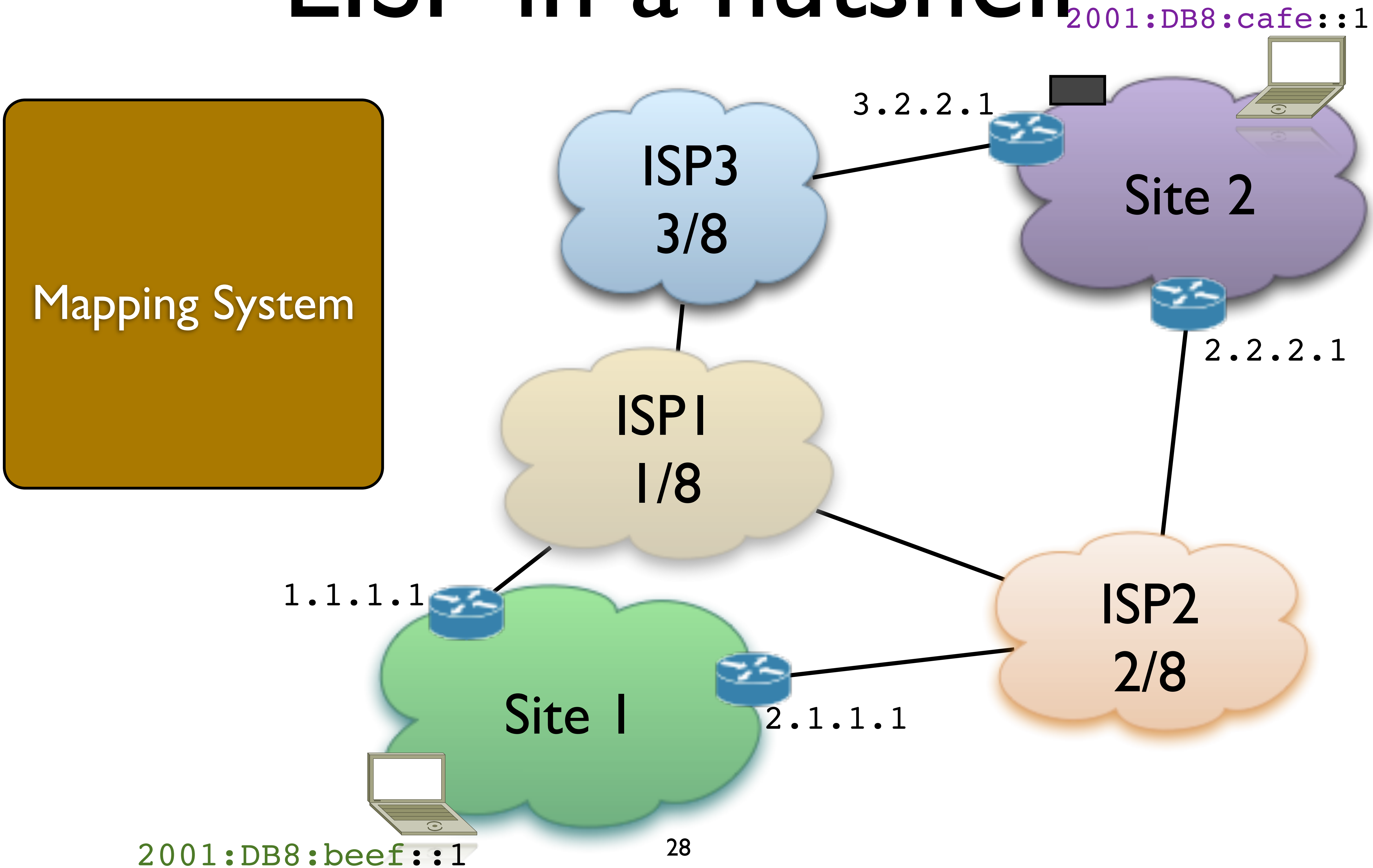
LISP in a nutshell



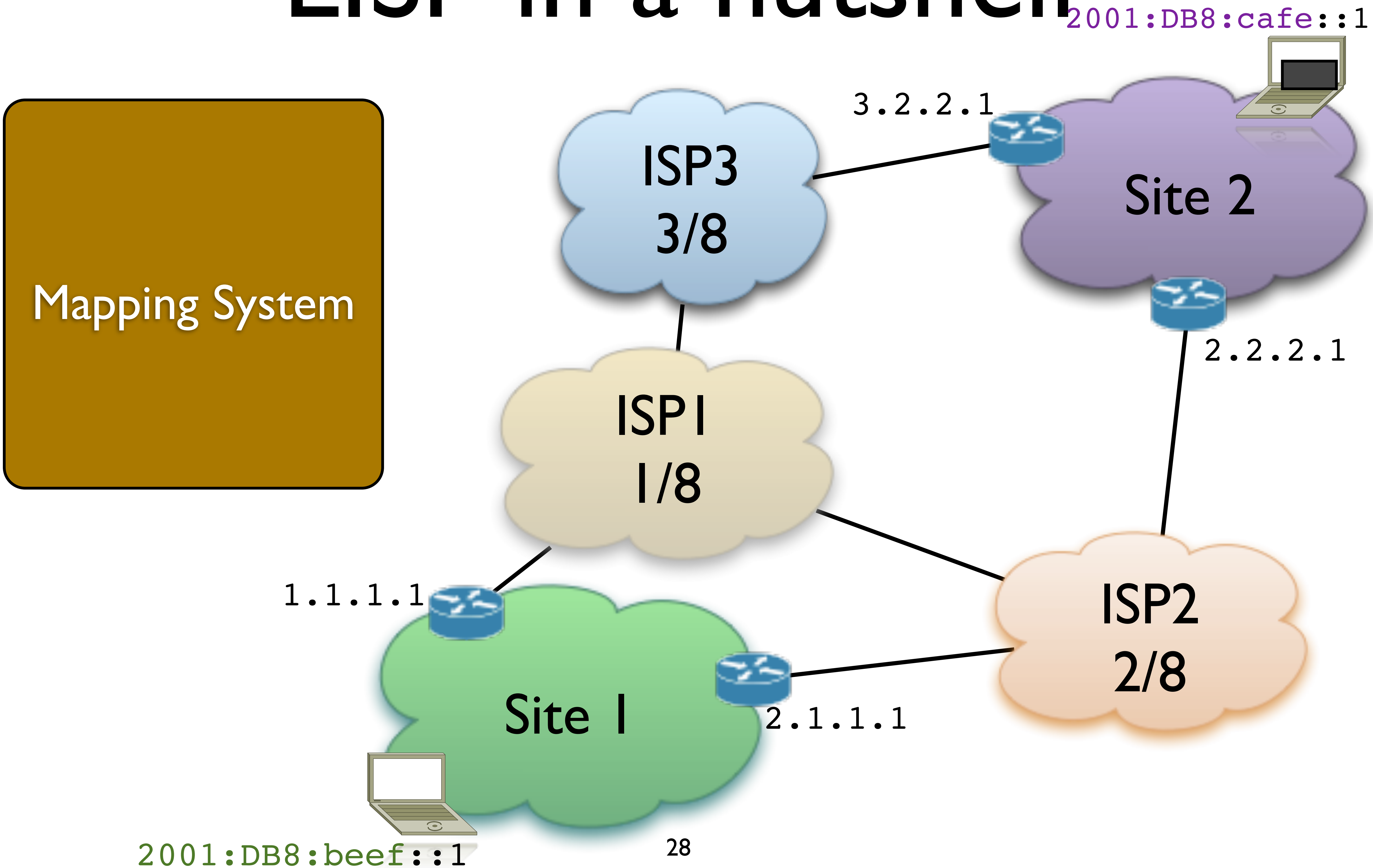
LISP in a nutshell



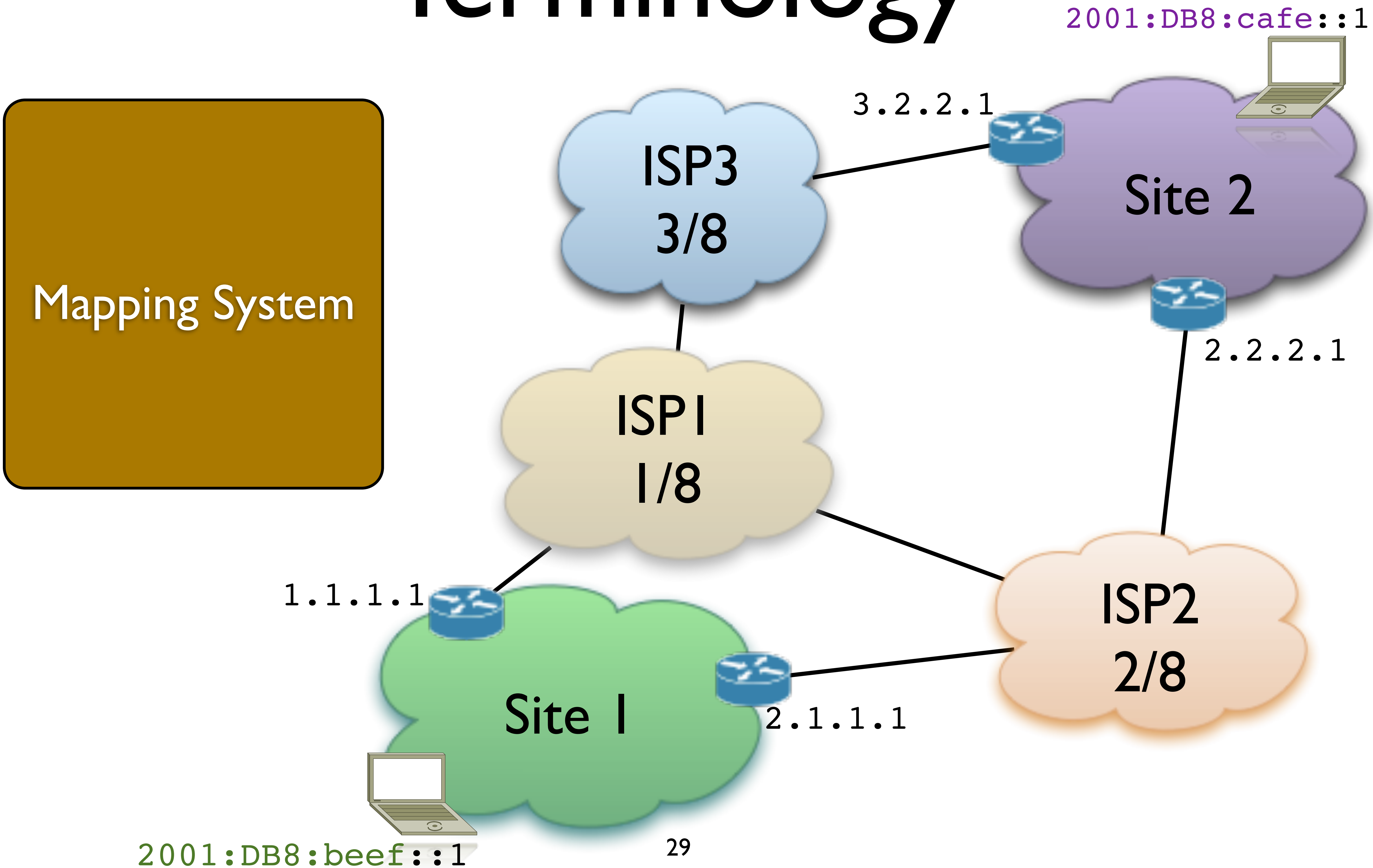
LISP in a nutshell



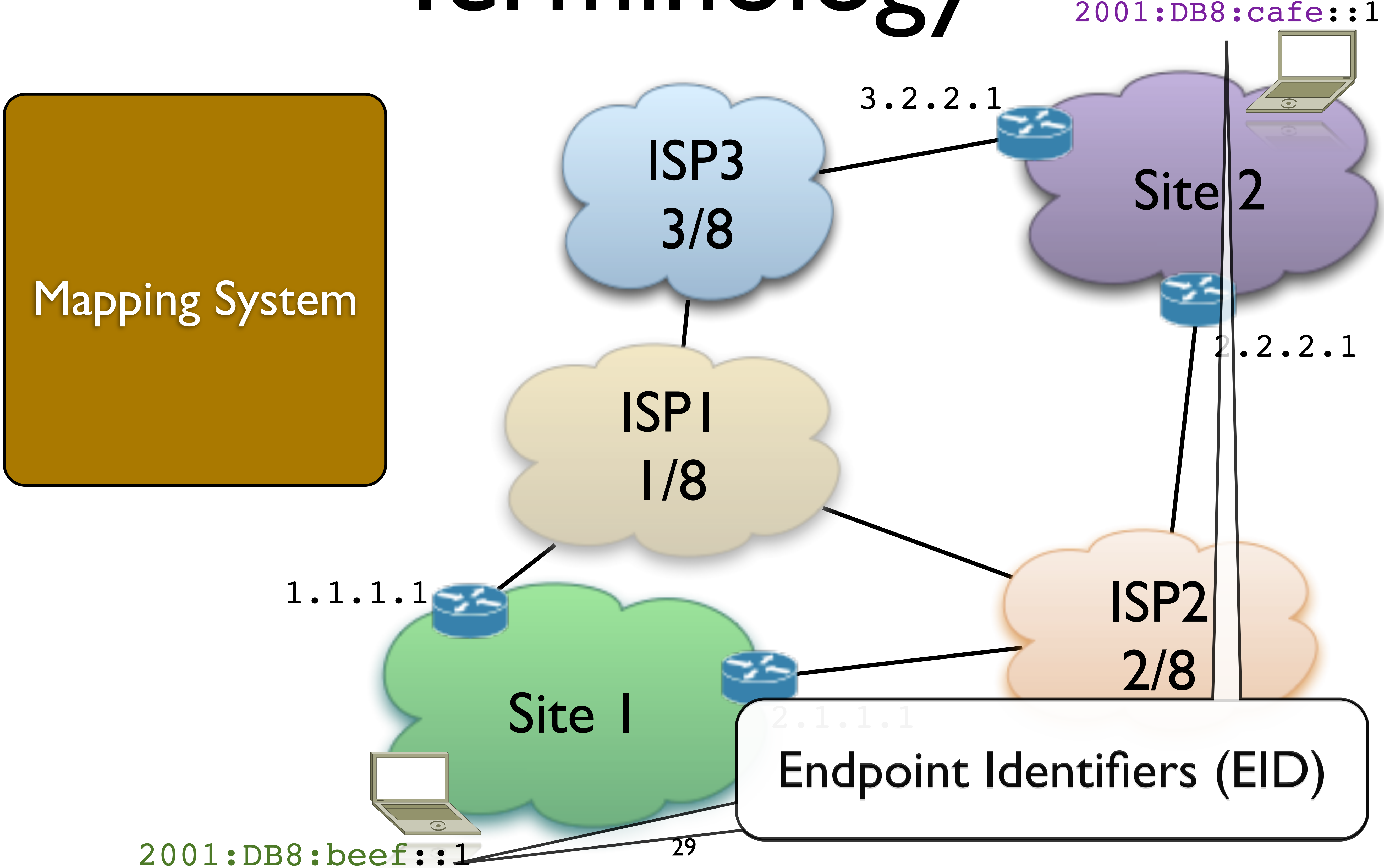
LISP in a nutshell



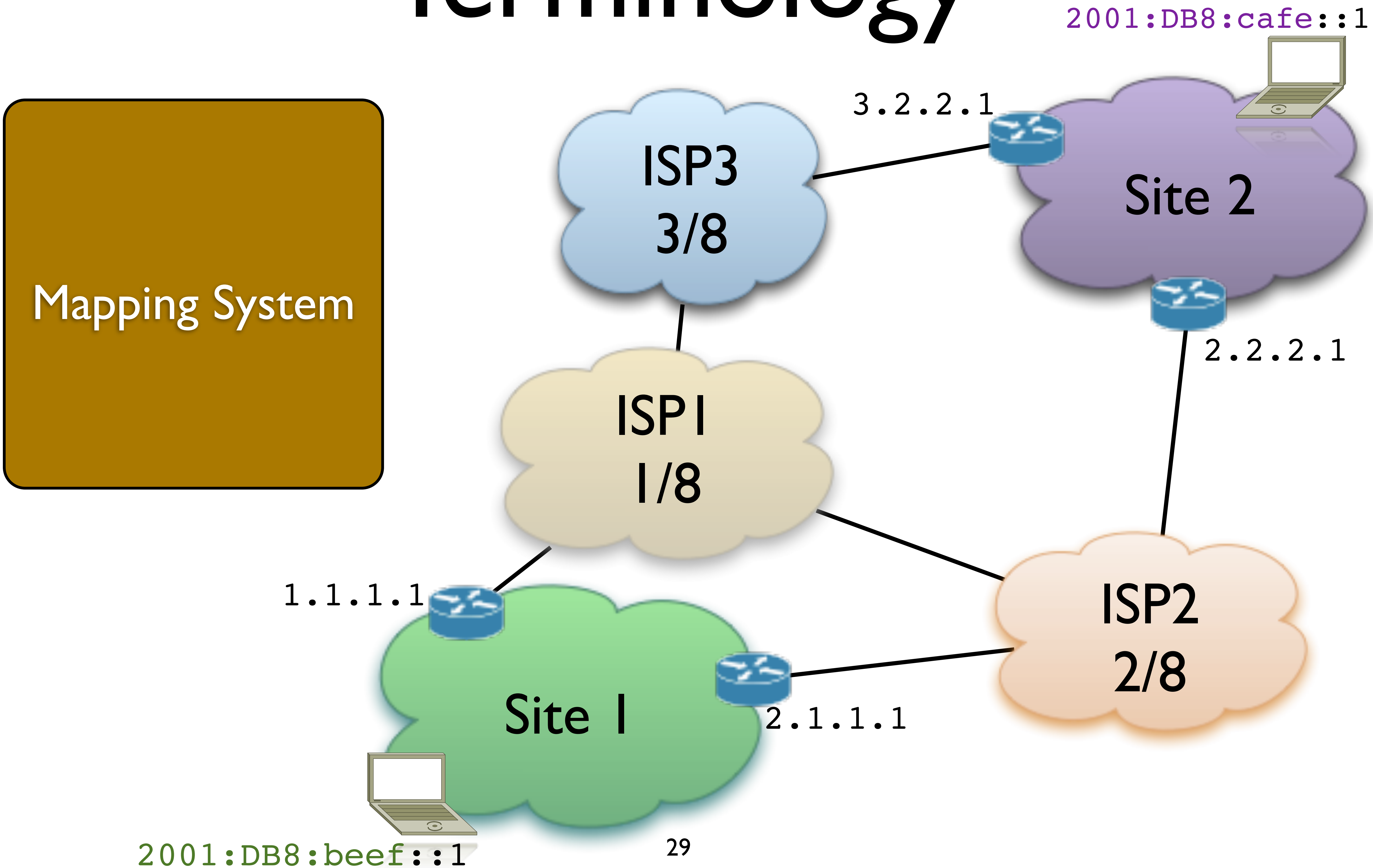
Terminology



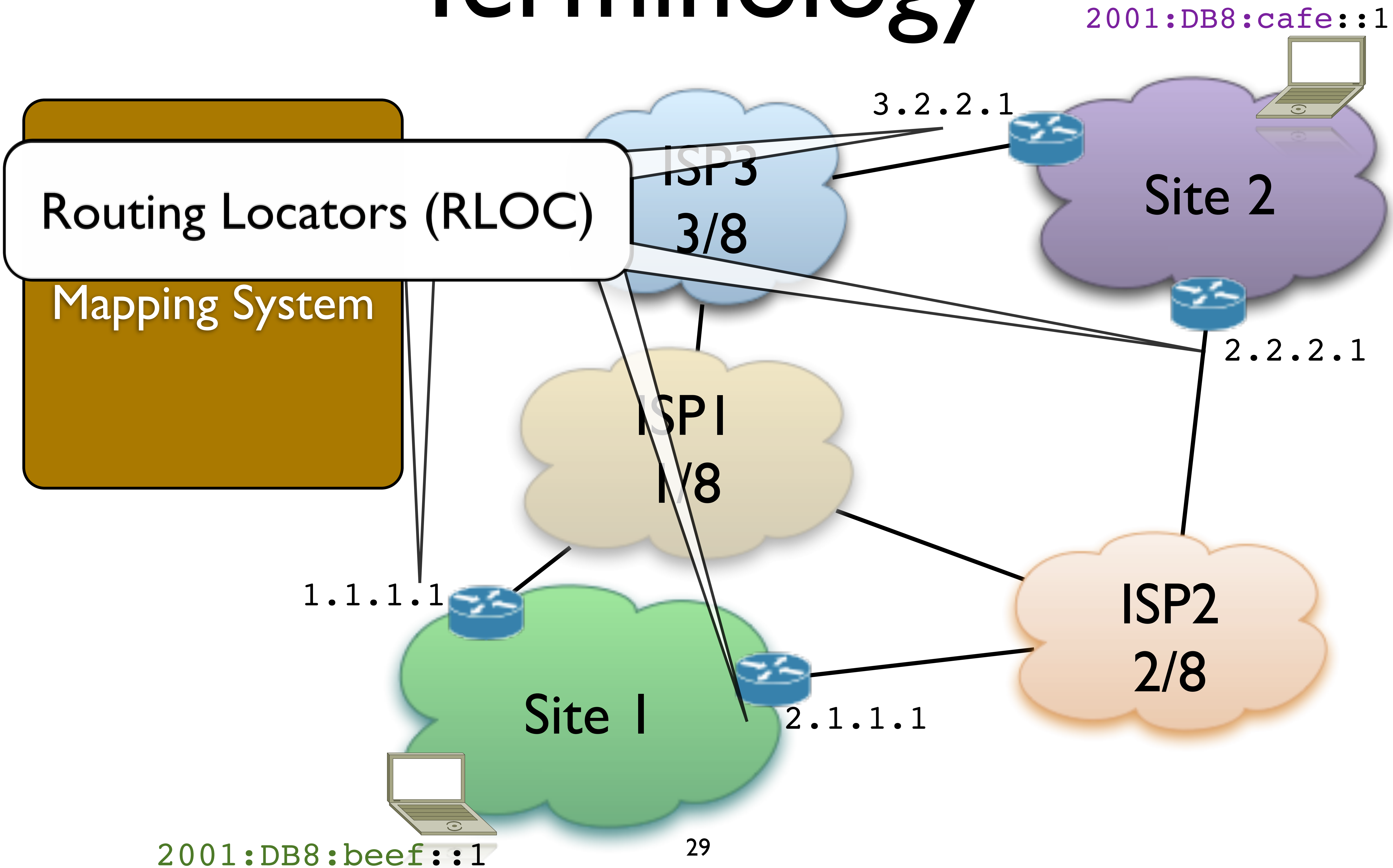
Terminology



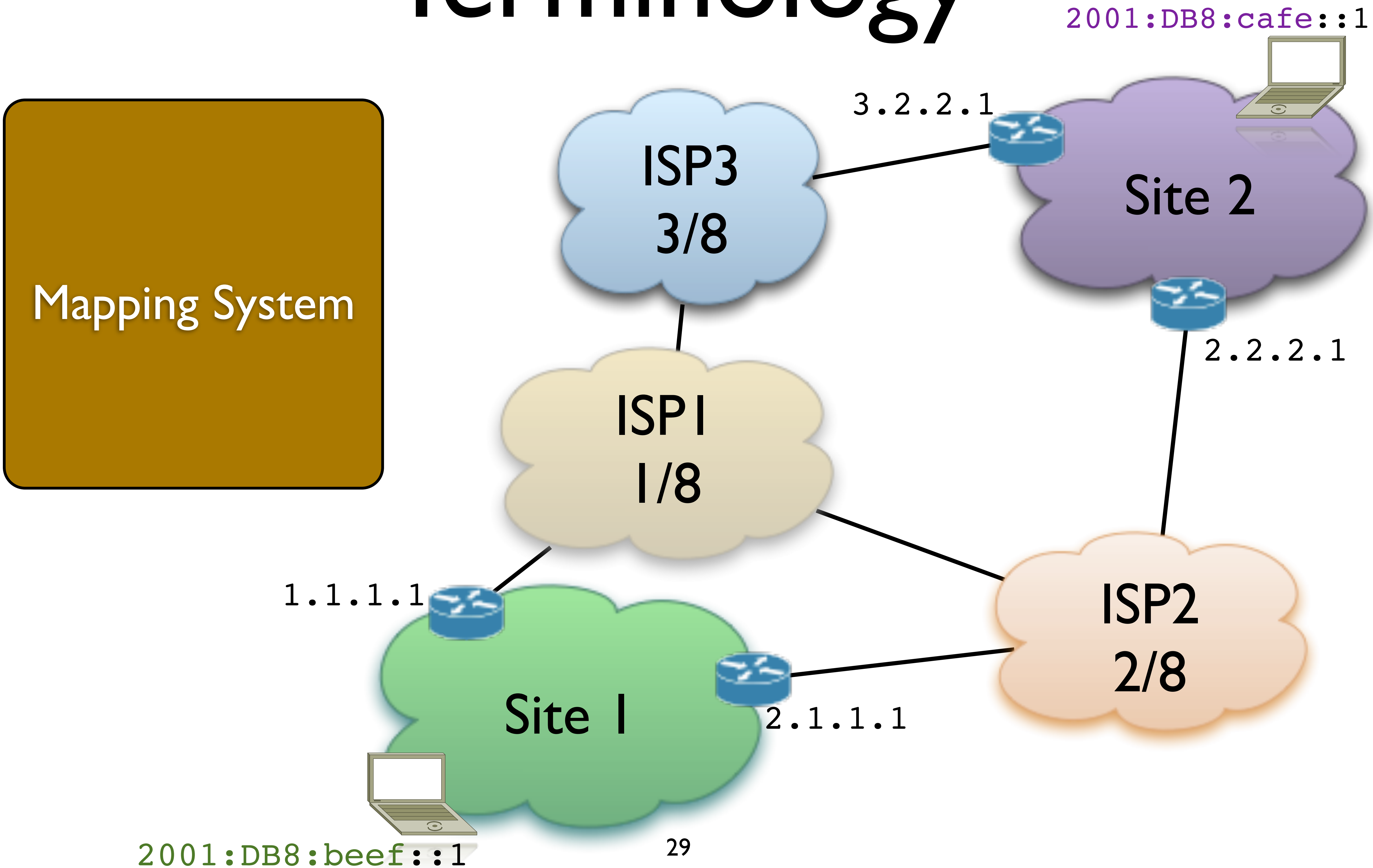
Terminology



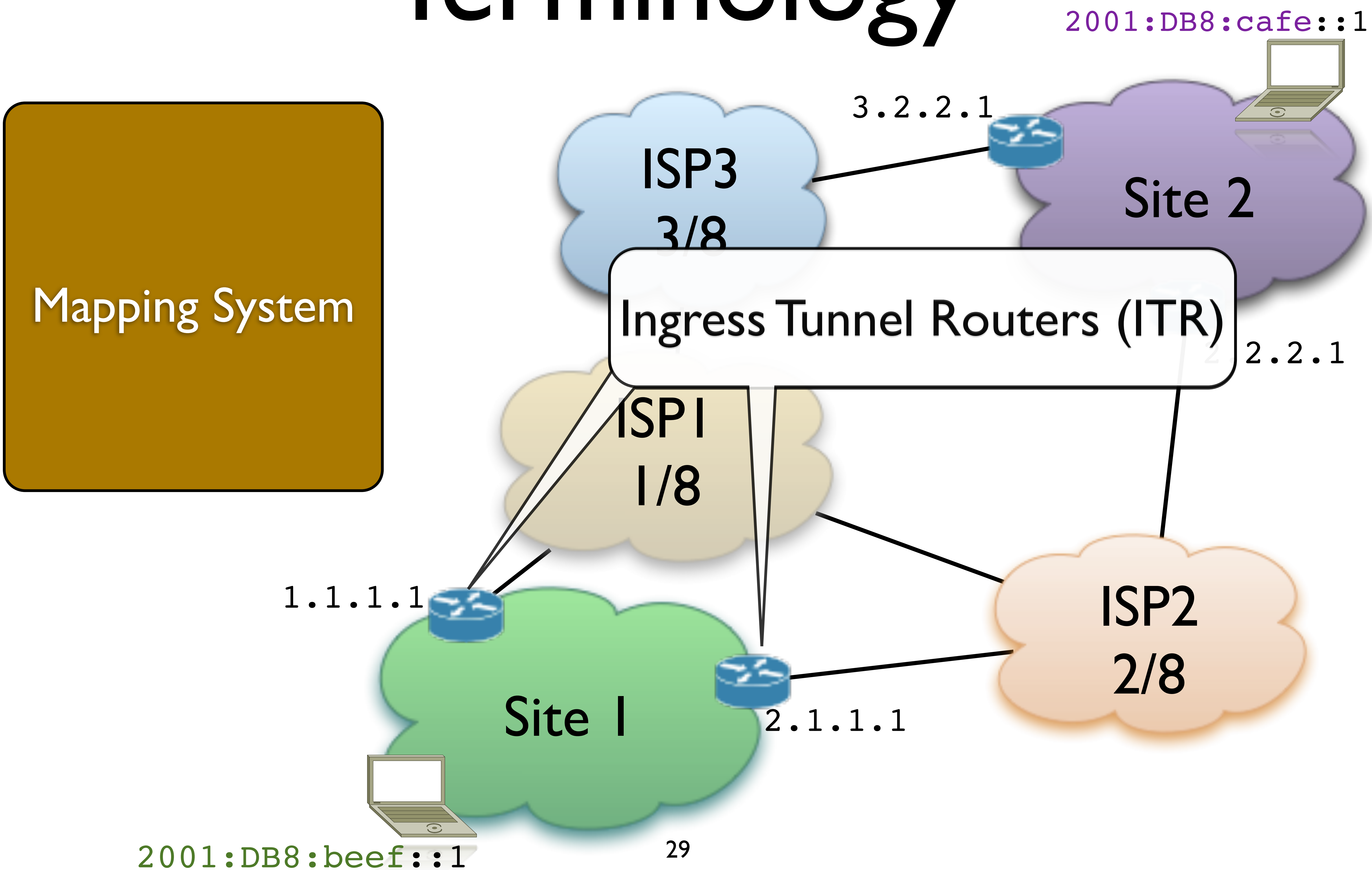
Terminology



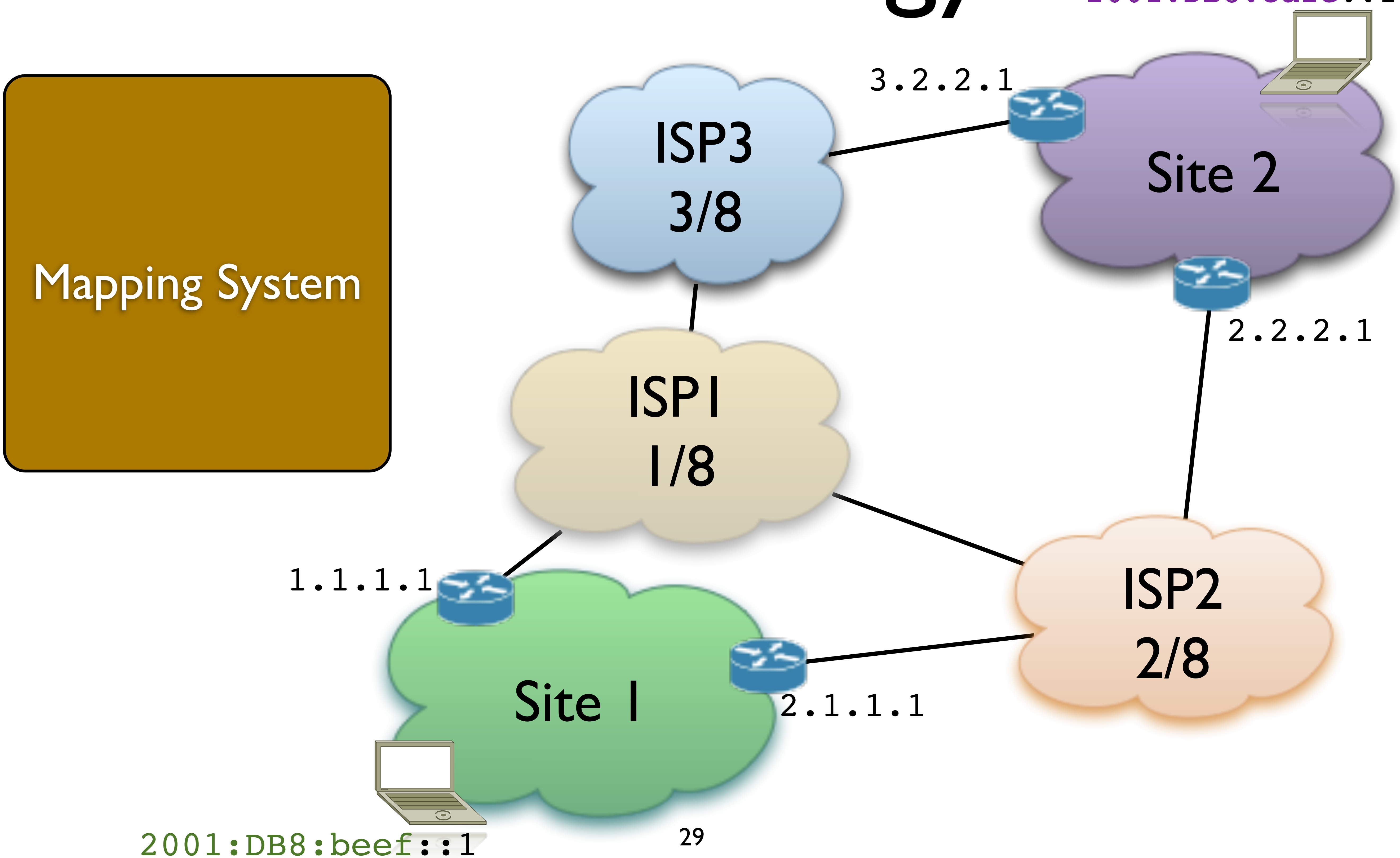
Terminology



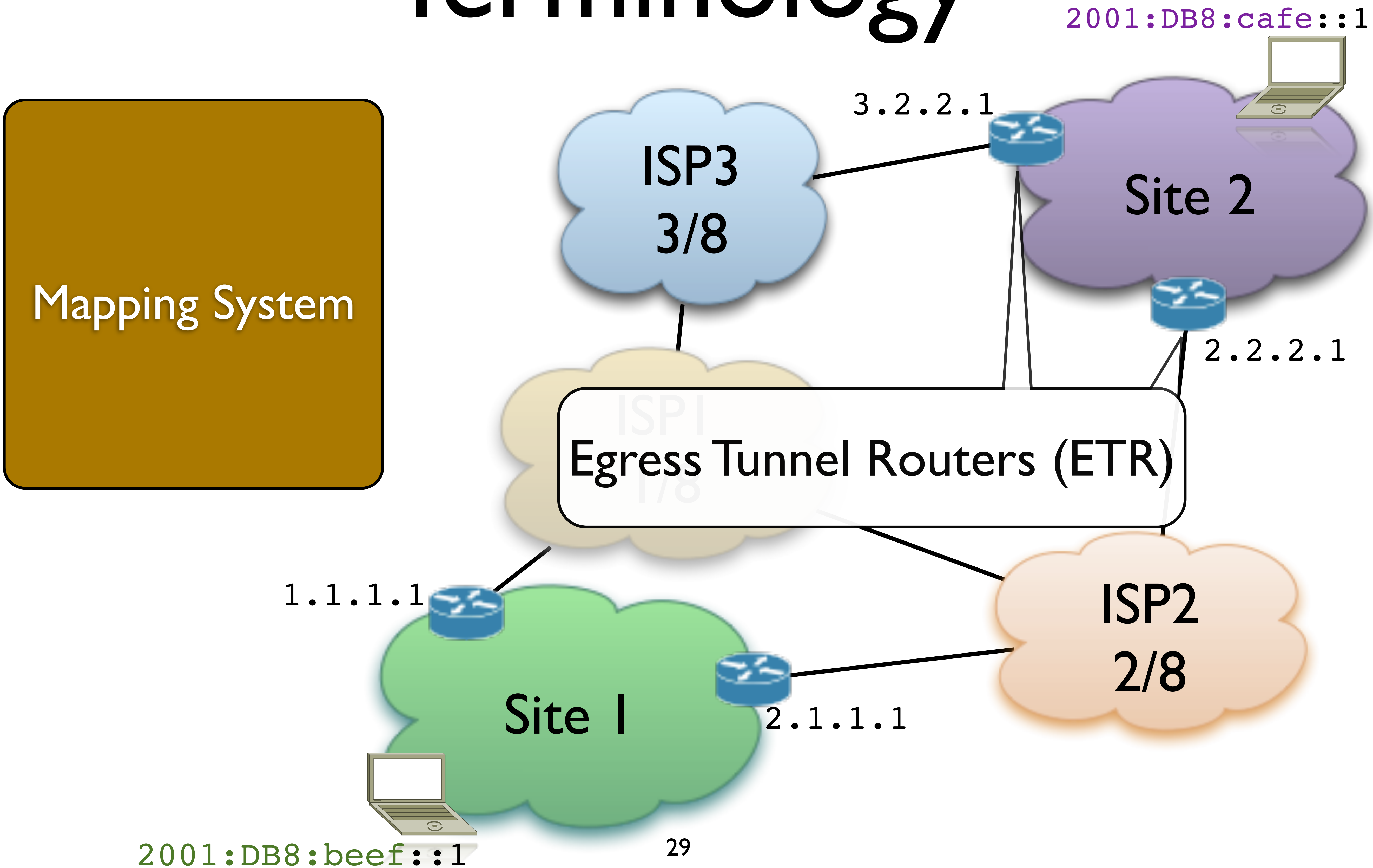
Terminology



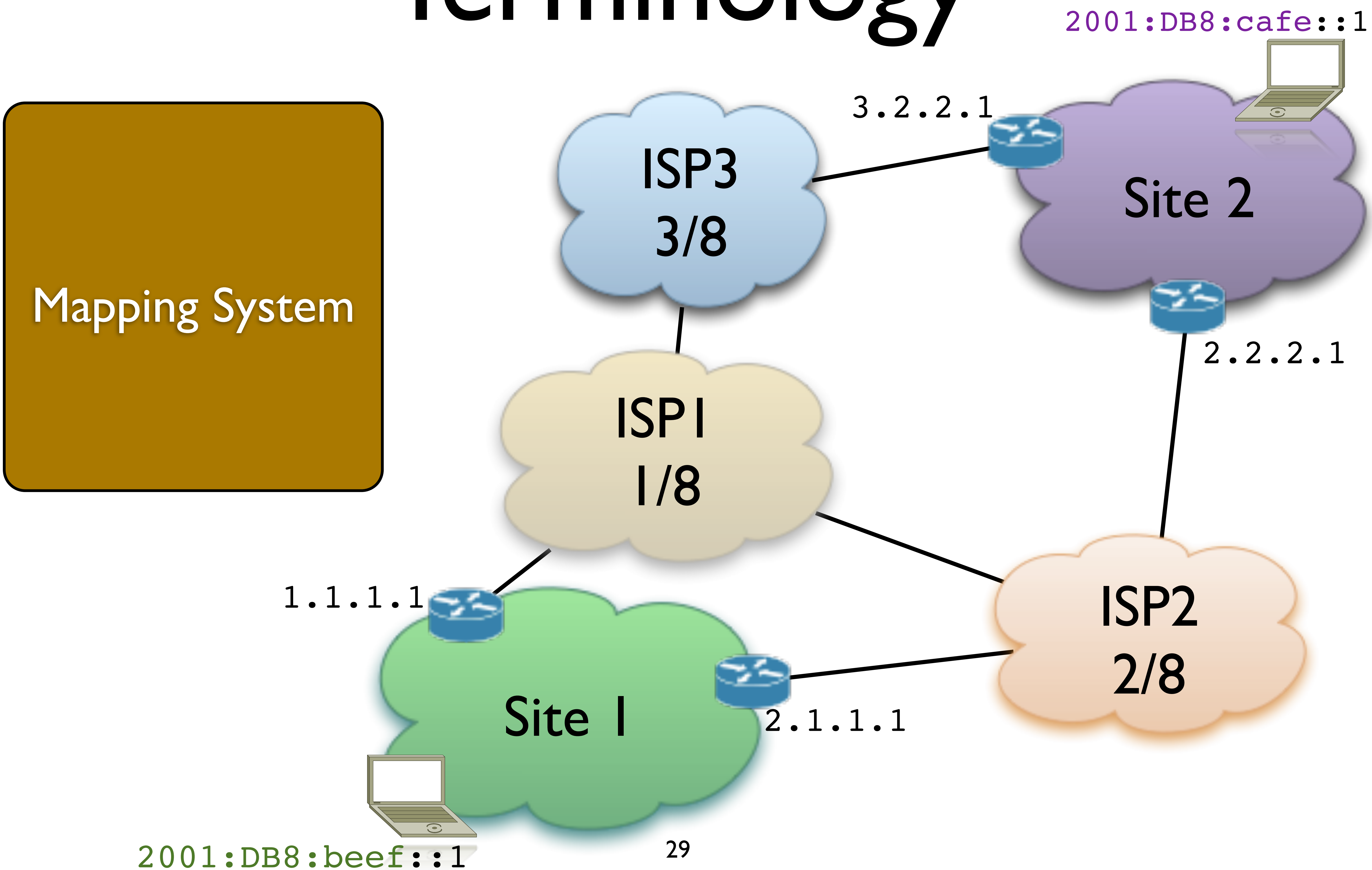
Terminology



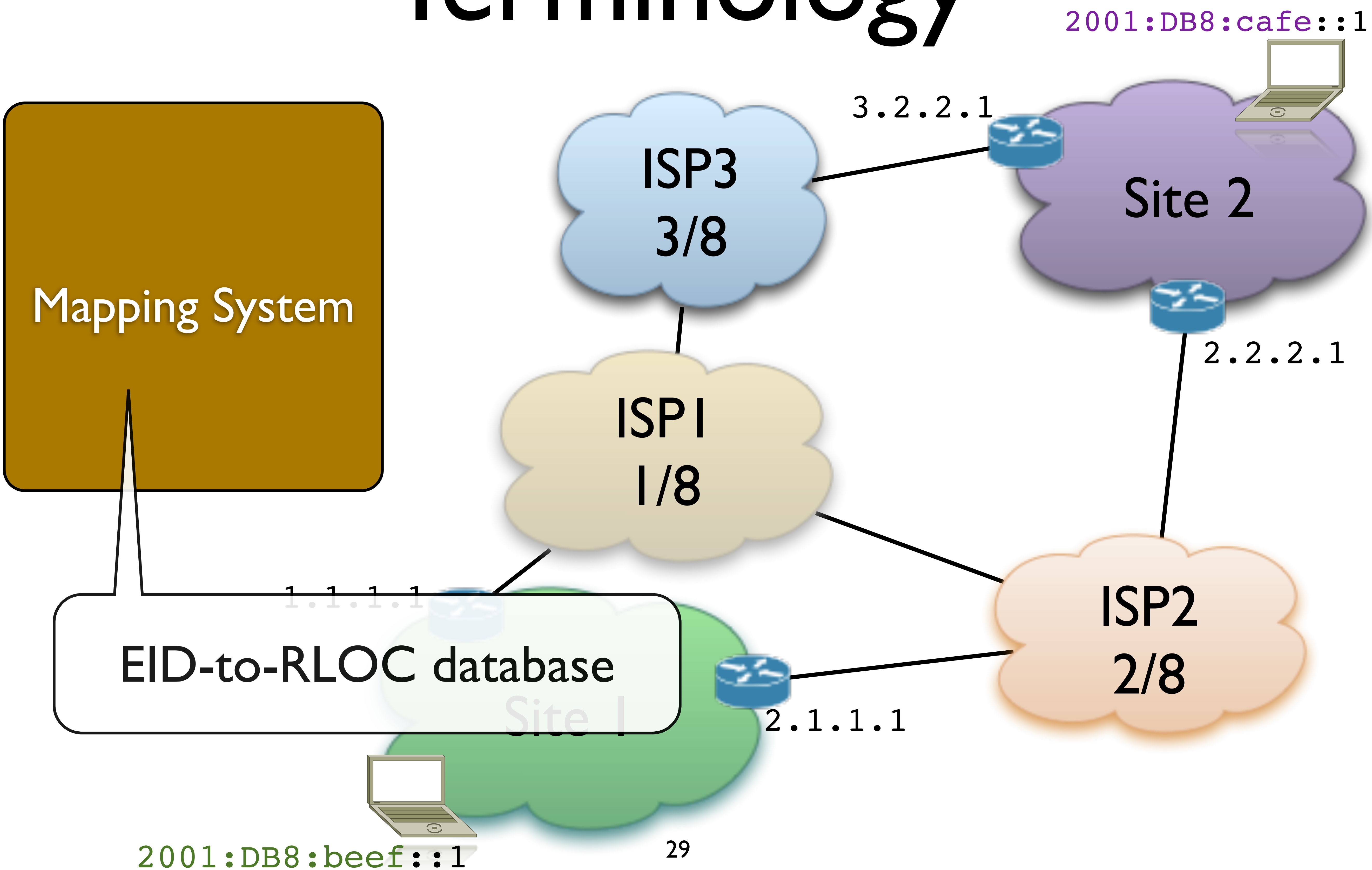
Terminology



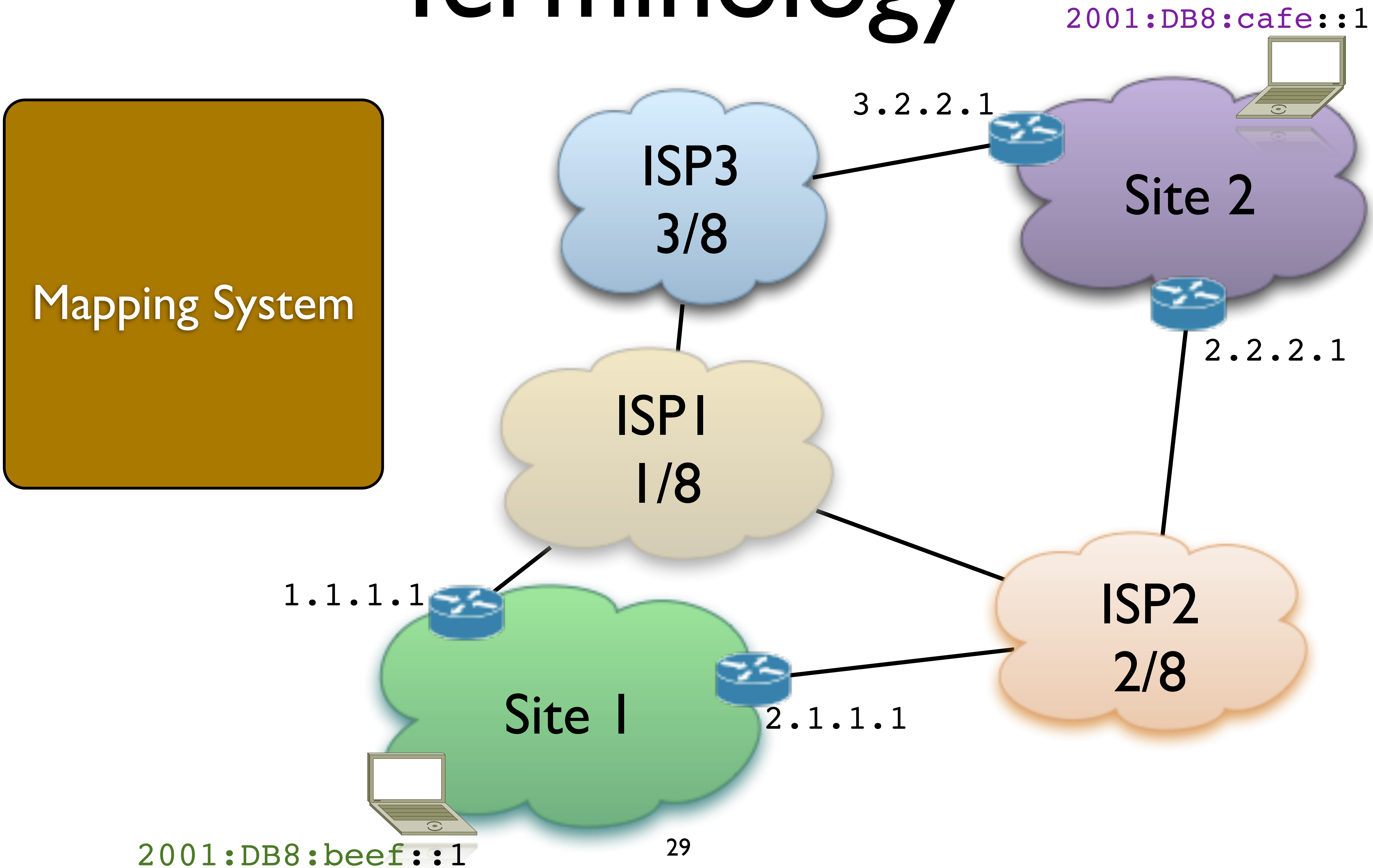
Terminology



Terminology



Terminology



Terminology

- **Ingress Tunnel Router (*ITR*)**: a router which accepts a packet containing a single IP header. The router maps the destination address of the packet to an RLOC and prepends a LISP header before forwarding the encapsulated
packet.
- **Egress Tunnel Router (*ETR*)**: a router which accepts a LISP encapsulated packet. The router strips the LISP header and forwards the packet based on the next header

Terminology

- **EID-to-RLOC Database**: a globally distributed database that contains all known EID-prefix to RLOC mappings
- **LISP Cache**: EID-to-RLOC Database stored at the ITR
- **LISP Database**: EID-to-RLOC Database stored at the ETR

How LISP has been obtained?

LISP Main Design Goals

- No end-systems (hosts) changes (1)
- Minimize required changes to the Internet infrastructure (2) and the number of routers which have to be modified (5)
- Avoid or minimize packet loss when EID-to-RLOC mappings need to be performed (7)
- Be incrementally deployable (3)
- No router hardware changes (4) and minimize router software changes (6)

No end-systems (hosts) changes

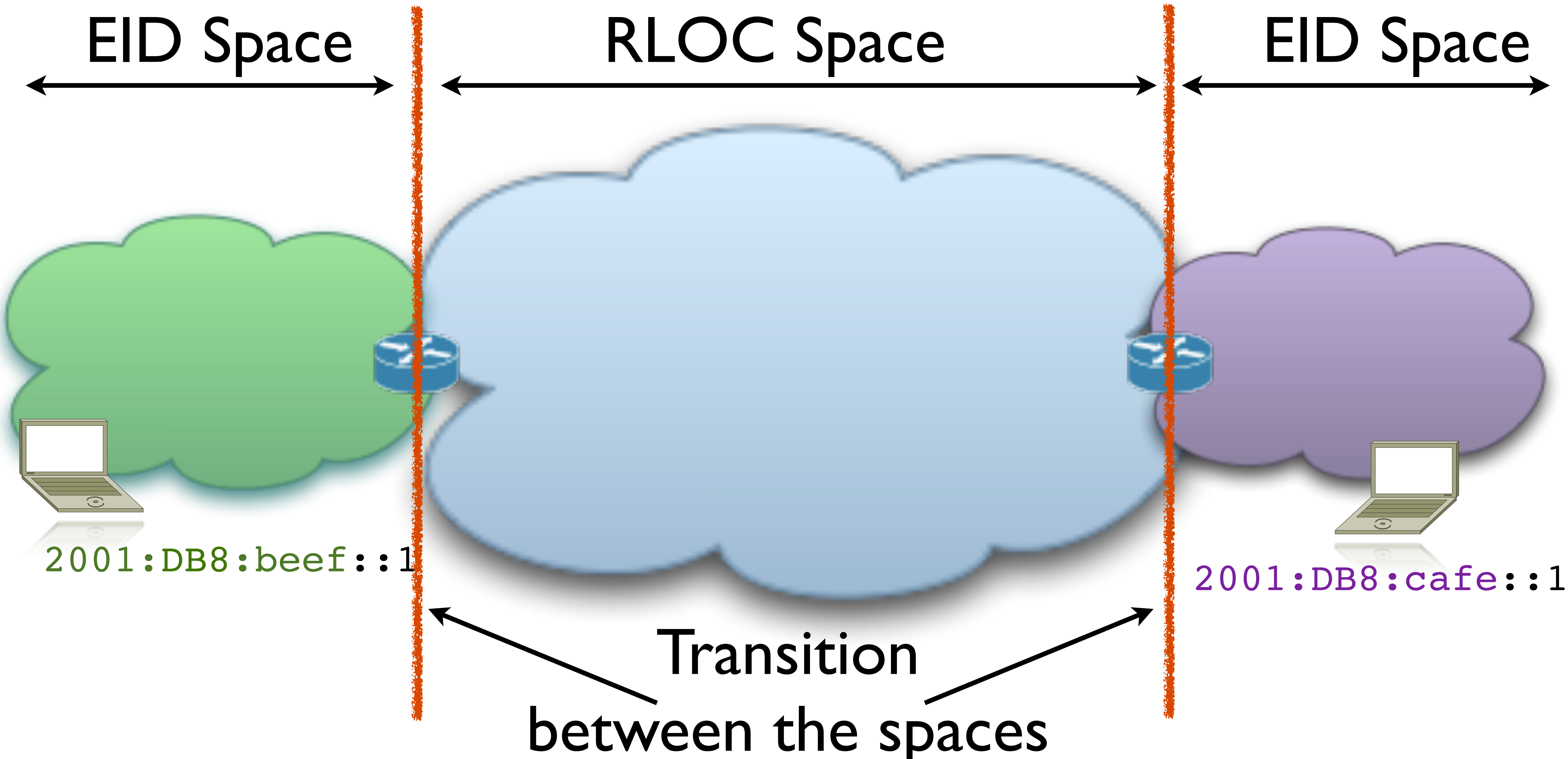
Network-based solution

- Identifiers are pure IP addresses (v4 or v6)
- Work performed by routers
- Encapsulation based protocol (vs rewriting)
  - Packets received at the destination are the same as those sent by the source (no address/port/... modification)

➡Transparent for end-hosts

Minimize the number of routers which have to be modified and required changes to the Internet infrastructure

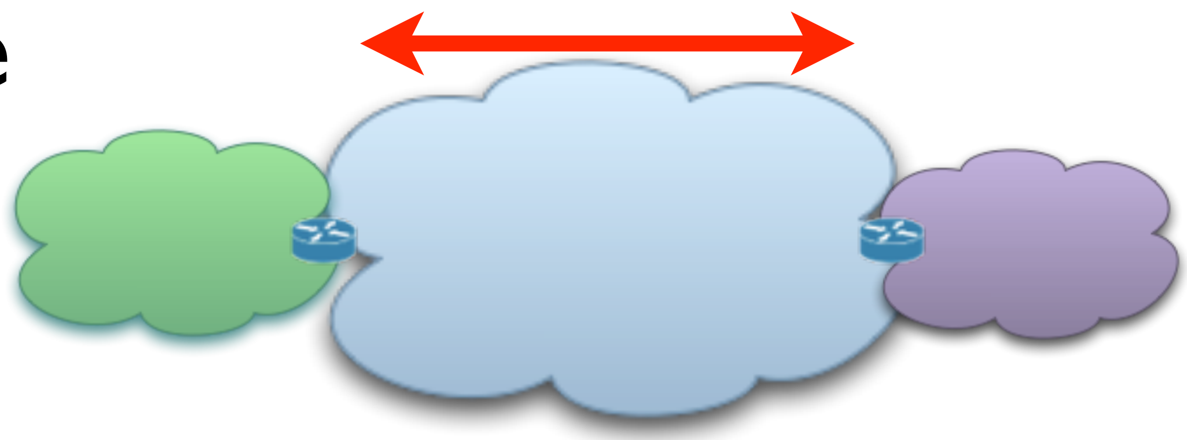
Split the Internet in two spaces



RLOC space

- Composed of the current transit networks
  - Keep IP and BGP as-is
  - RLOCs globally routable
  - EIDs are invisible here

➡No change in the core



EID space

- Composed of the current stub networks
  - EIDs are routable (IP) within their stub
  - RLOCs and EIDs of other stubs are unknown in the stub
    - IGP with default route(s) to the border routers
    - Packets to distant EIDs simply follow the default route(s)

➡No change in the stubs

Transition between the two spaces

- LISP: the glue between the EID and RLOC spaces
- Modify border routers to support LISP functionality (xTR)
  - No change before/after the border
- Border routers do not advertise stub prefixes (EID) anymore to the Internet

Internet is more than routers

- NATs
- Firewalls
- Strange stuff
- How to be confident the packets will not be lost somewhere?

Internet is more than routers

- NATs
- Firewalls
- Strange stuff
- How to be confident the packets will not be lost somewhere?

=> Transport the new protocol over UDP

UDP based encapsulation

- Data-plane: UDP/4341 (IP(UDP(LISP(IP))))

Traversal and LISP

Endpoint packet

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                    Source Routing Locator                     |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                 Destination Routing Locator                   |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
   UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   L   |N|L|E|  rflags |                 Nonce                         |
   I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   S / |                    Locator Status Bits                        |
   P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                           Source EID                          |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                         Destination EID                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Src/Dst RLOCs

UDP header

Control Flags

Identifier Part

Payload

UDP based control messages

- Control-plane: UDP/4342 (IP(UDP(LISP)))

Traversal

```
             0                   1                   2                   3
             0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
            +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
          / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
         /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
        |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
        |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        |   |                    Source Routing Locator                     |
         \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
          \ |                 Destination Routing Locator                   |
            +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
          / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4342        |
        UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
          \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
            +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
            :                                                               :
            :                     LISP Control Message                      :
            +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

LISP

Src/Dst RLOCs

UDP header

Control message

Avoid or minimize packet loss when EID-to-RLOC mappings need to be performed

Or Dimitri's formulation: Effect of changes for "in-use" EID-to-RLOC mappings

What is a mapping?

- A mapping maps EID prefixes onto site routers RLOCs
- A list of RLOCs is associated to each EID prefix
- A priority, weight and reachability information is associated to each RLOC

2001:DB8:cafe::/56:

- RLOC: 192.0.2.10, priority:1, weight=75, reachability:1
- RLOC: 2001:db8:dead::1, priority:1, weight=25, reachability:0
- RLOC: 192.0.2.30, priority:2, weight=100, reachability:1

How are the mappings obtained?

- EID-to-RLOC Database: a globally distributed database that contains all the mappings
- The system formed of the EID-to-RLOC Database and the protocol to query it is called the **mapping system**
- If the ITR does not have a mapping for a destination EID, it queries the mapping system
  - The replied mapping is installed in the Map-Cache on the ITR for later use

Proposed Mapping System

- LISP-CONS
- **LISP+ALT**
- NERD
- LISP-DHT
- LISP-Tree

LISP+ALT

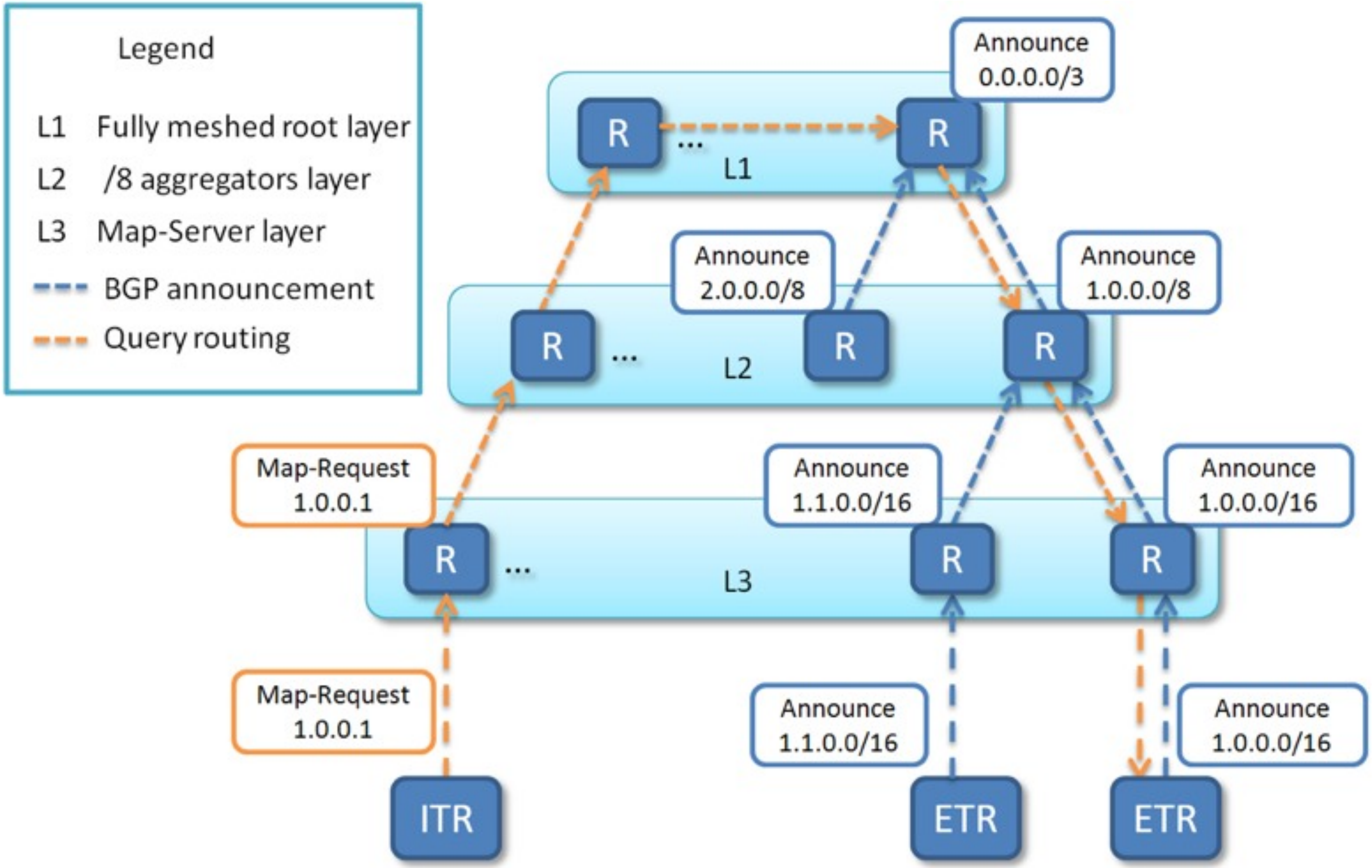
LISP+ALT

- A mapping mechanism that relies on an alternate topology to distribute mapping requests to mapping servers
  - LISP ITR routers sending mapping request messages to ALT routers
  - ALT routers forward those mapping messages between themselves on an overlay topology built by using GRE tunnels

LISP+ALT

- BGP announces **where** the mappings can be found
- Map-Requests are forwarded on the ALT
- Map-Replies are forwarded on the legacy Internet (directly sent to the ITRs' RLOC)
- ! BGP does not give the mappings !

LISP+ALT



[tree]

LISP+ALT issues

- Complex system with tunnels, BGP protocol (no discussion about policies), ...
- Still relies on lots of error-prone manual configuration
- Scalability will depend on whether aggregation will be possible
- If mapping requests are lost due to congestion, difficult to diagnose the problem or send them via another path
- Security needs to be studied

The role of priority and weight

- If an EID has several RLOCs:
  - Select the RLOC with the lowest priority value
  - If several RLOCs have the same lowest priority
    - Balance the load between them proportionally to the weight
- Example:

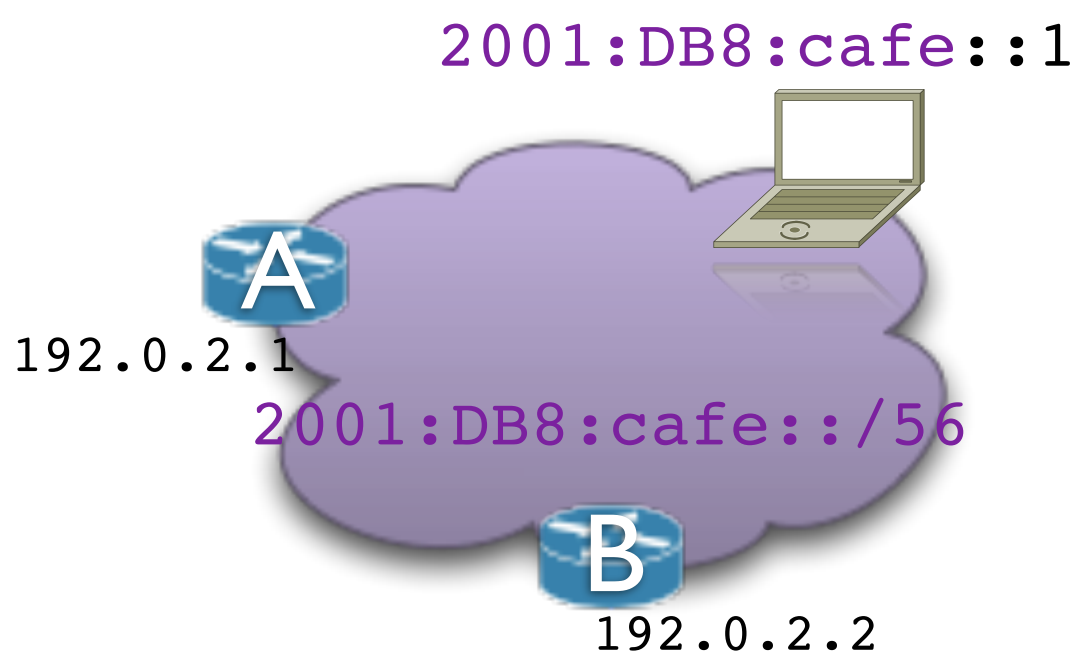
  2001:DB8:cafe::/56:

•RLOC: 192.0.2.10,	priority:1,	weight= 75
•RLOC: 2001:db8:dead::1,	priority:1,	weight= 25
•RLOC: 192.0.2.30,	priority:2,	weight=100

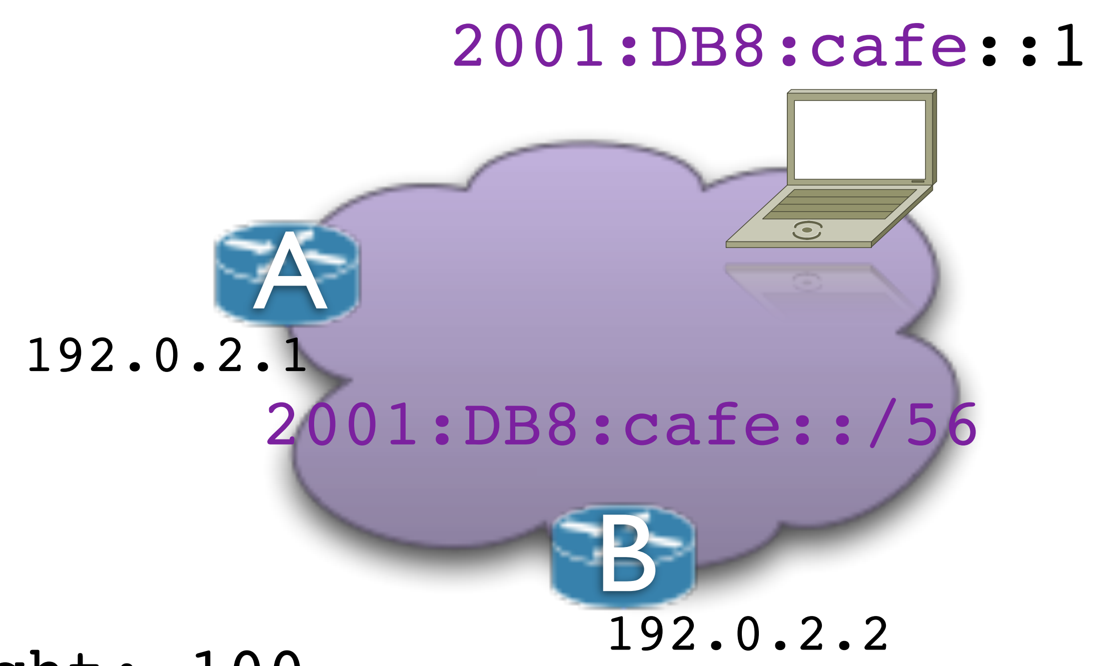
➡ 75% of the traffic to 192.0.2.10, 25% to 2001:db8:dead::1 and 0% to 192.0.2.30

Priority and weight to control incoming traffic

- LISP site can control incoming traffic with Weight and Priority



Priority and weight to control incoming traffic

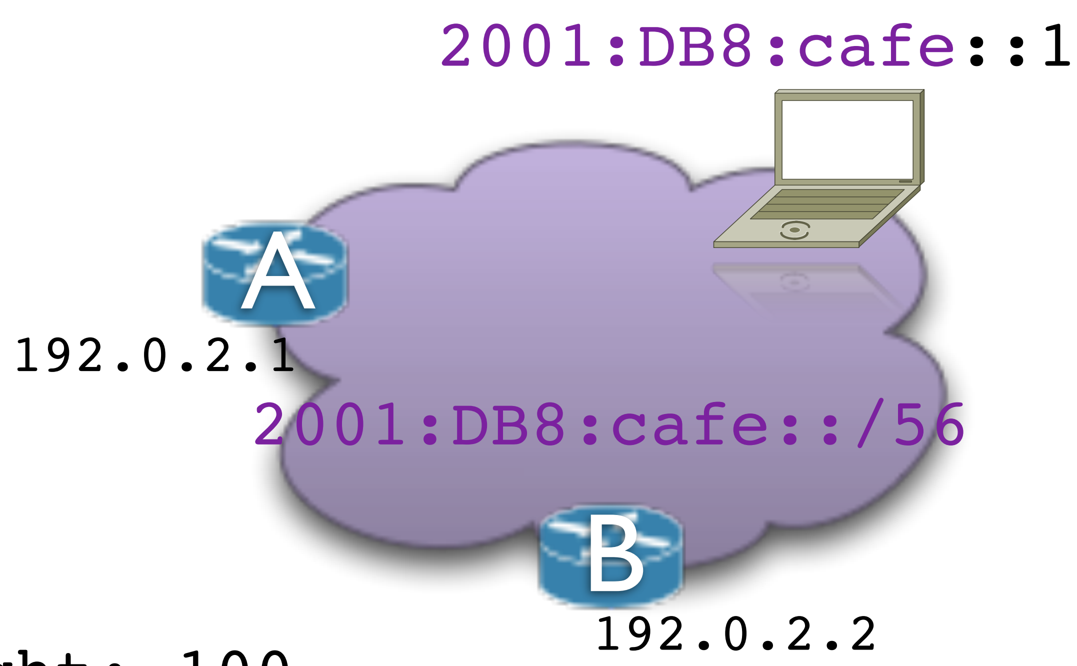


- LISP site can control incoming traffic with Weight and Priority

- A Primary, B Backup

  `2001:DB8:cafe::/56`
  - `192.0.2.1, prio:  1, weight: 100`
  - `192.0.2.2, prio: 99, weight: 100`

Priority and weight to control incoming traffic



- LISP site can control incoming traffic with Weight and Priority

- A Primary, B Backup

  ```
  2001:DB8:cafe::/56
  •192.0.2.1, prio:  1, weight: 100
  •192.0.2.2, prio: 99, weight: 100
  ```

- A 60%, B 40%

  ```
  2001:DB8:cafe::/56
  •192.0.2.1, prio:  1, weight:  60
  •192.0.2.2, prio:  1, weight:  40
  ```

LISP ITR will load balance layer 4 flows by using hash as in ECMP

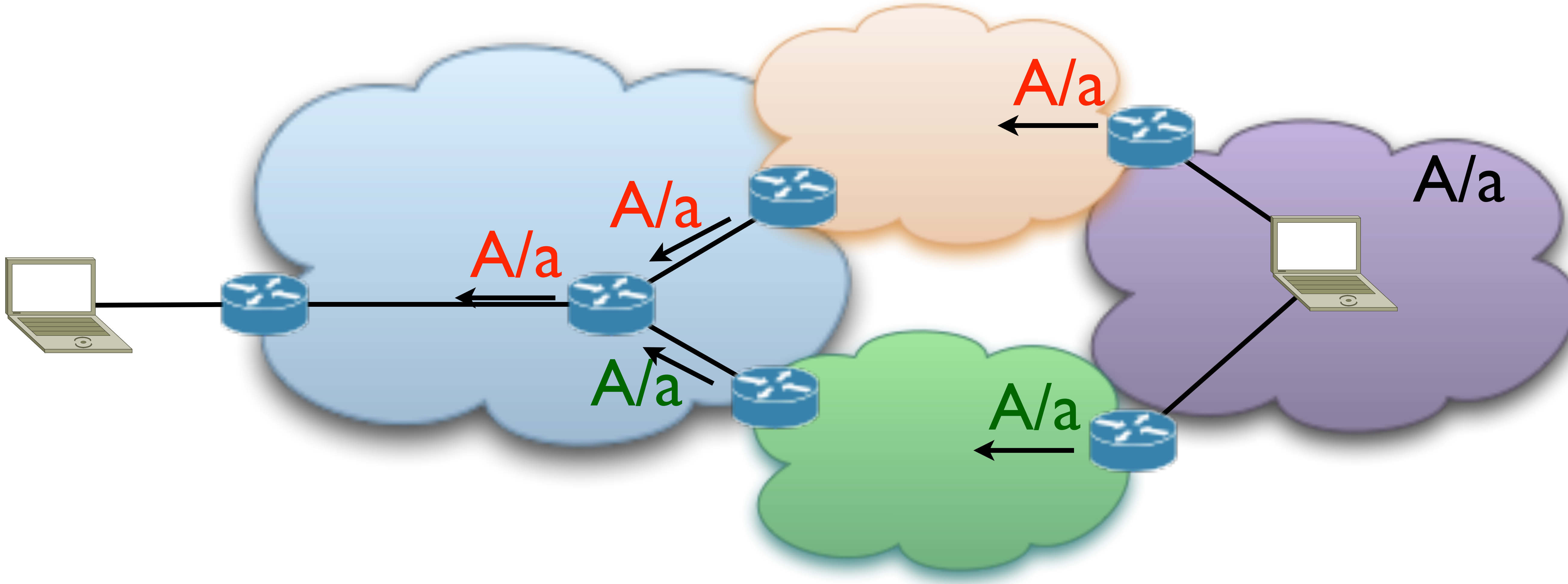
The role of the reachability

- Indicates if the RLOC is reachable from the ETR perspective
  - The reachability seen at the ETR may be different than the reachability seen at the ITR => hint
- Typically used for temporary failures that should not affect the mapping at long term

The reachability problem

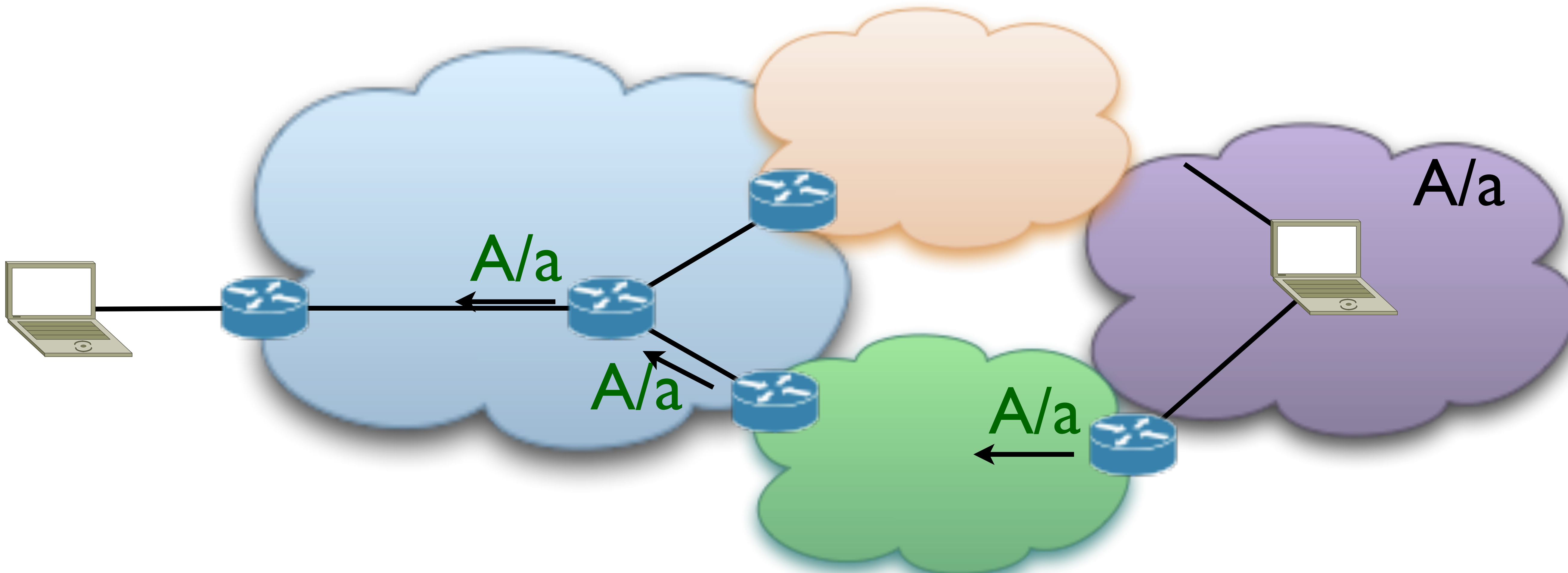
- Today, preserving the prefixes reachability is mainly performed locally
- In LISP, the legacy Internet is EID agnostic

The reachability problem in today's Internet



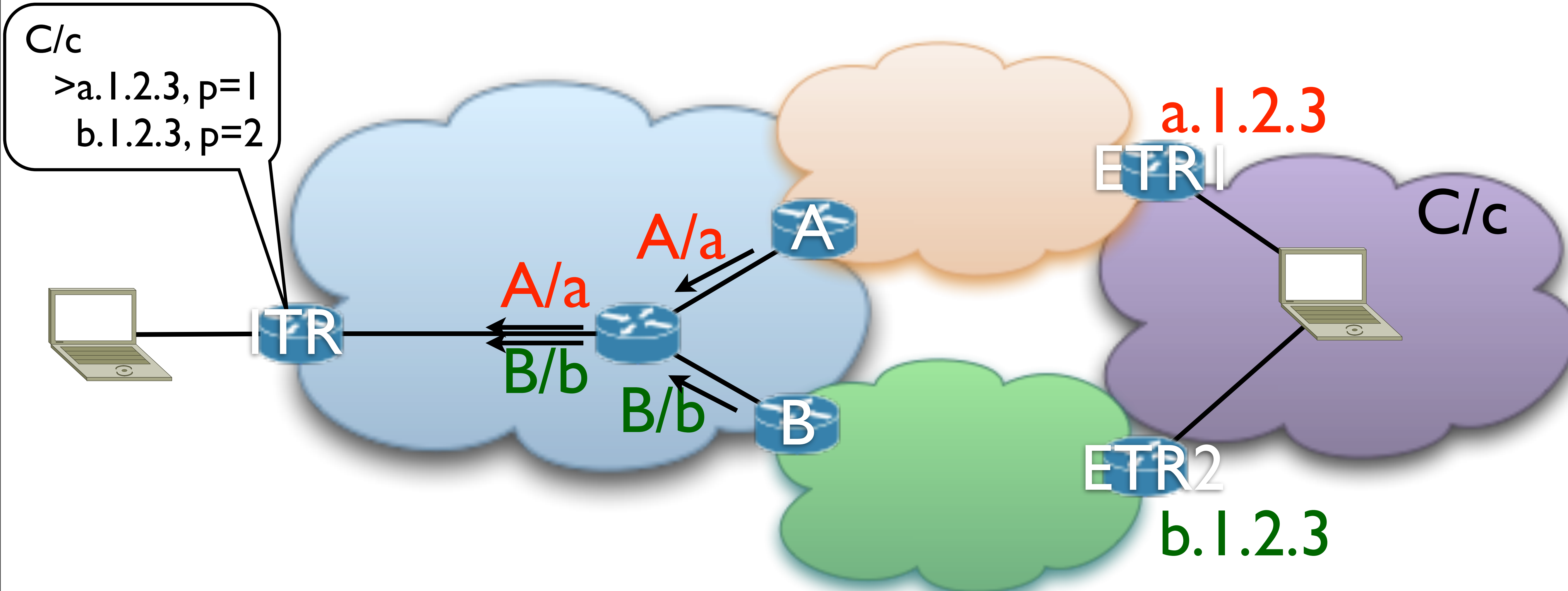
- In today's Internet, routing protocols converge after a link failure to ensure that multihomed prefixes such as *A/a* remain reachable

The reachability problem in today's Internet



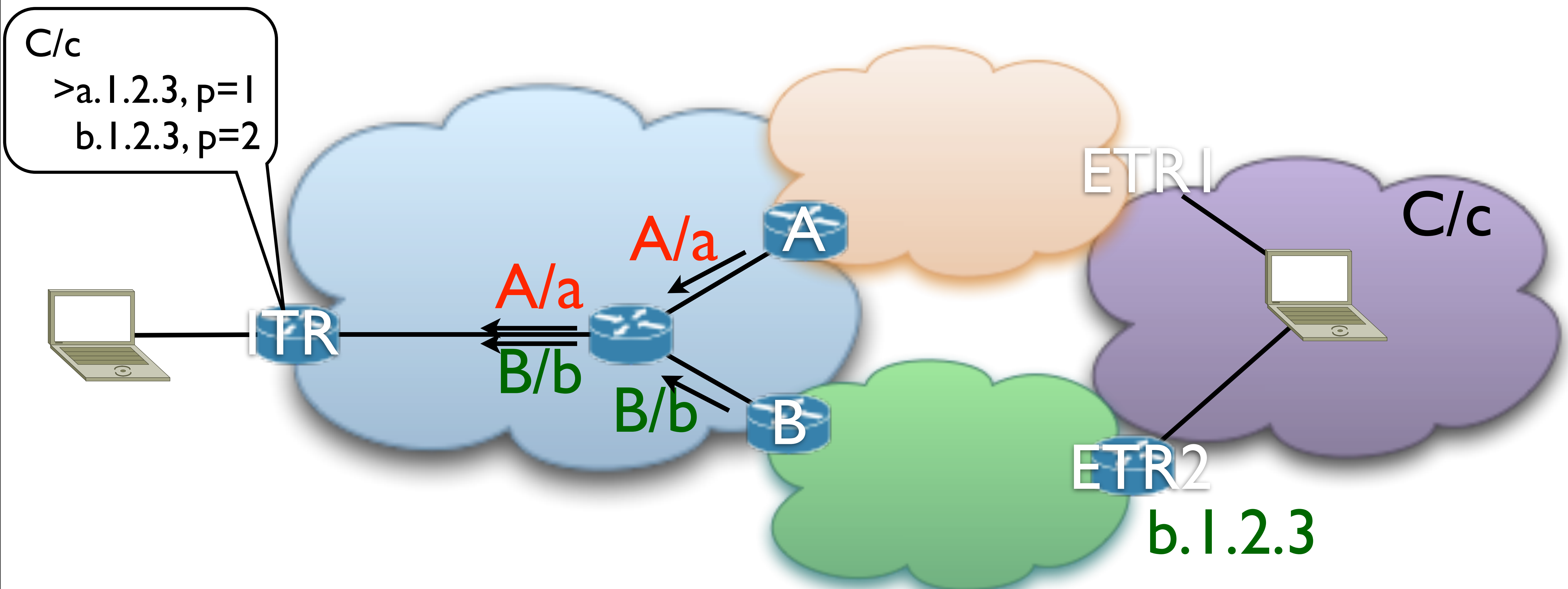
- In today's Internet, routing protocols converge after a link failure to ensure that multihomed prefixes such as *A/a* remain reachable

The reachability problem in a LISP-based Internet



- Upon failure of ETR1, A continues to advertise A/a via BGP
- How can ITR notice that ETR1 failed and that ETR2 should be used instead?

The reachability problem in a LISP-based Internet



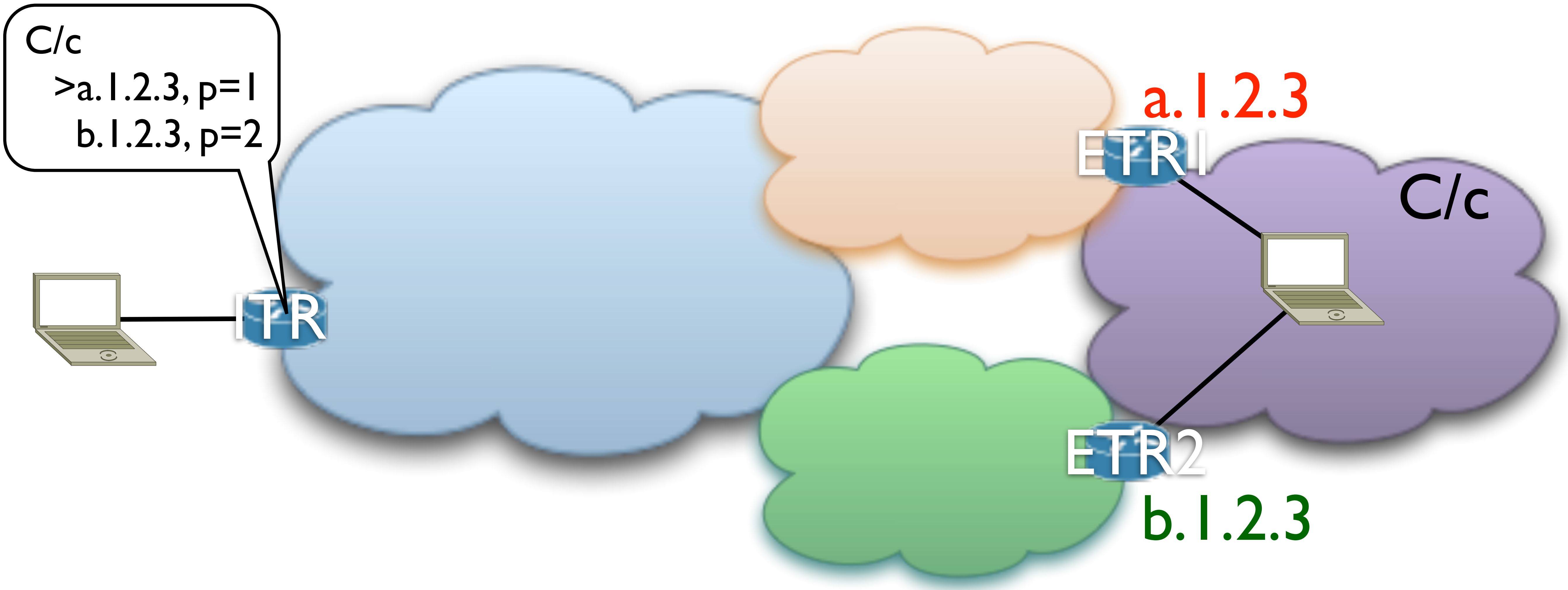
- Upon failure of ETR1, A continues to advertise A/a via BGP
- How can ITR notice that ETR1 failed and that ETR2 should be used instead?

Solving the reachability problem with the locator status bits

- Add an optional 32 bits vector in the data packets
- Each source locator is mapped to one position in the vector

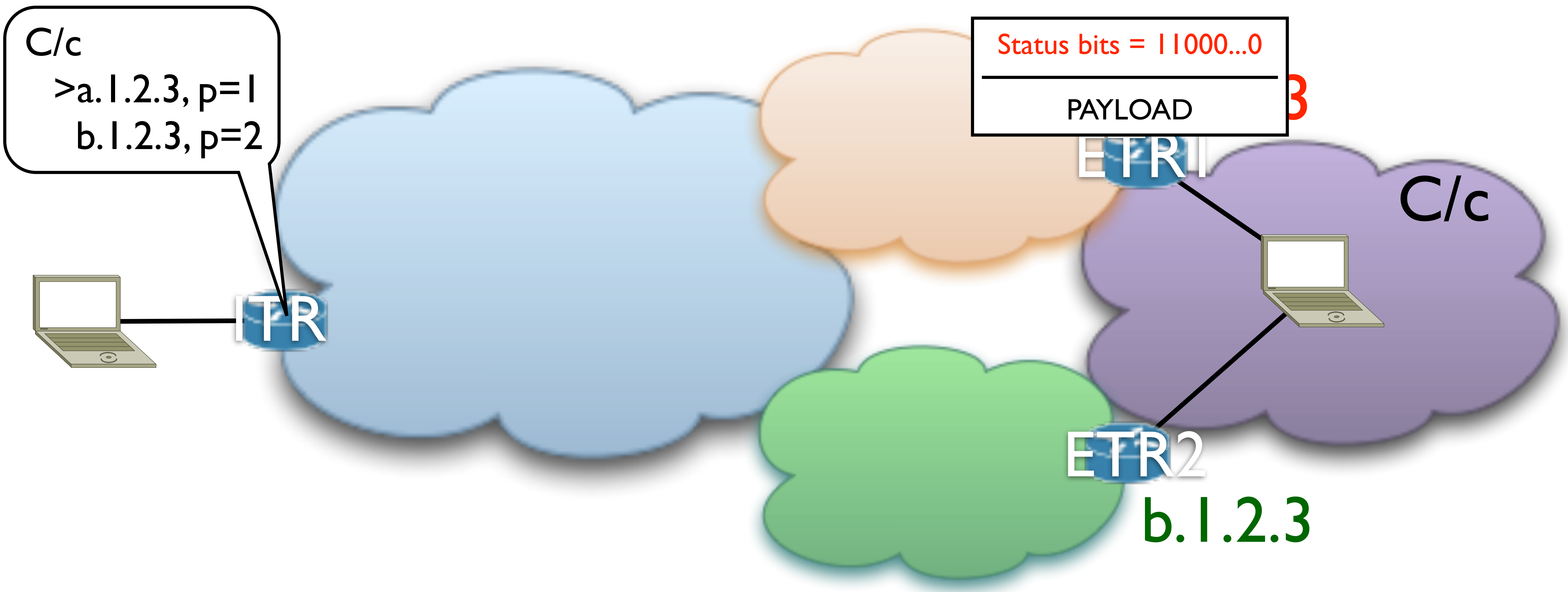
```
if locator_status_bit(i) = 1
  RLOC i is reachable
else
  RLOC i is not reachable
```

Solving the reachability problem with the locator status bits



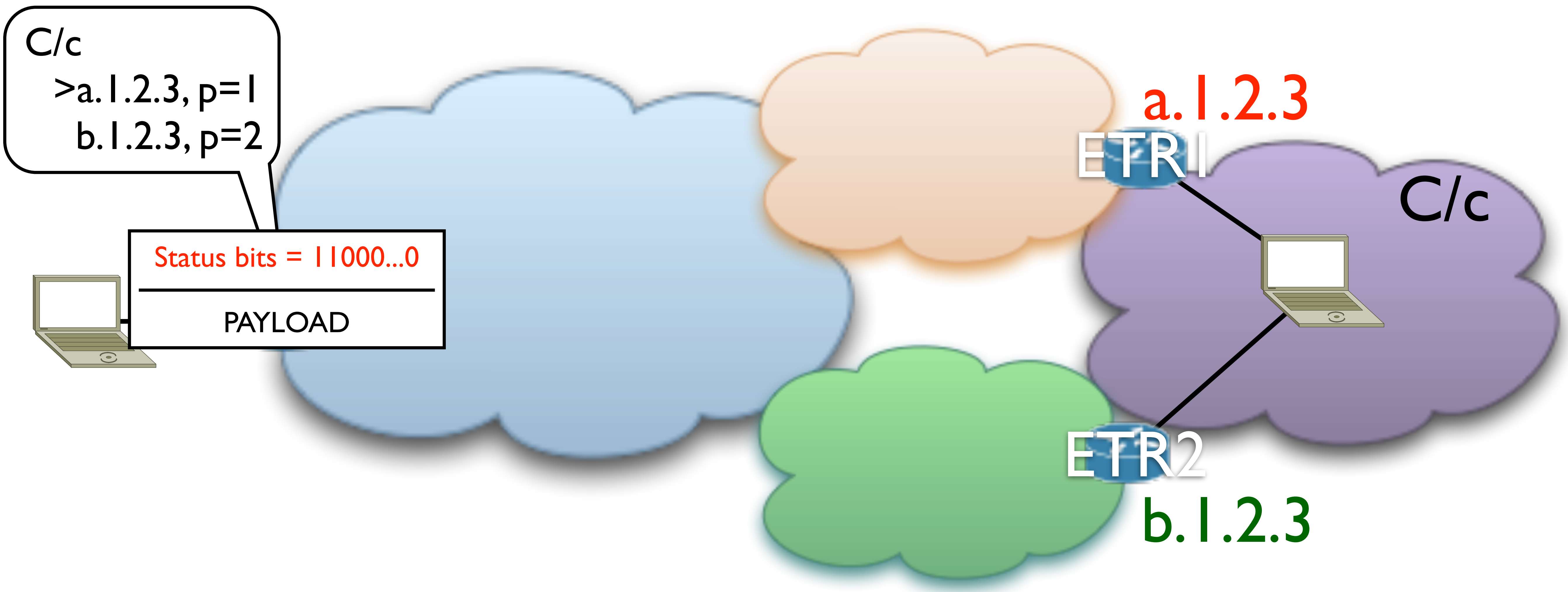
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



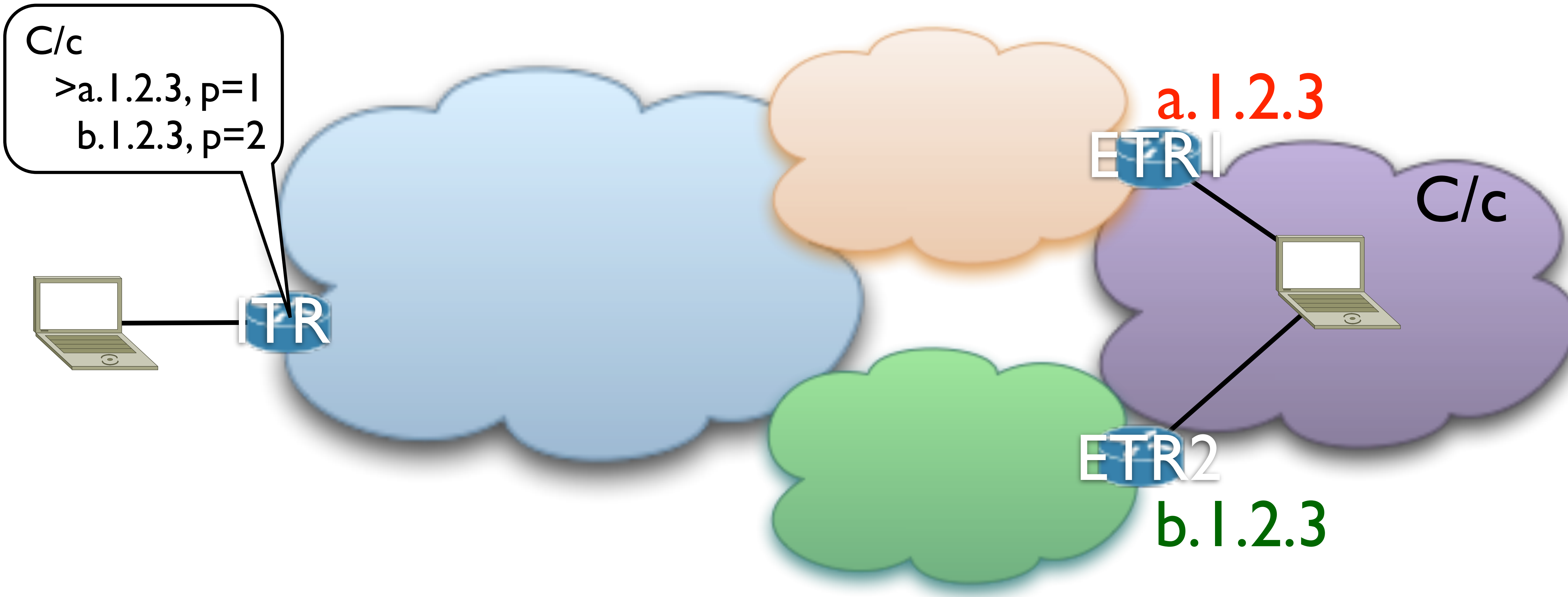
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



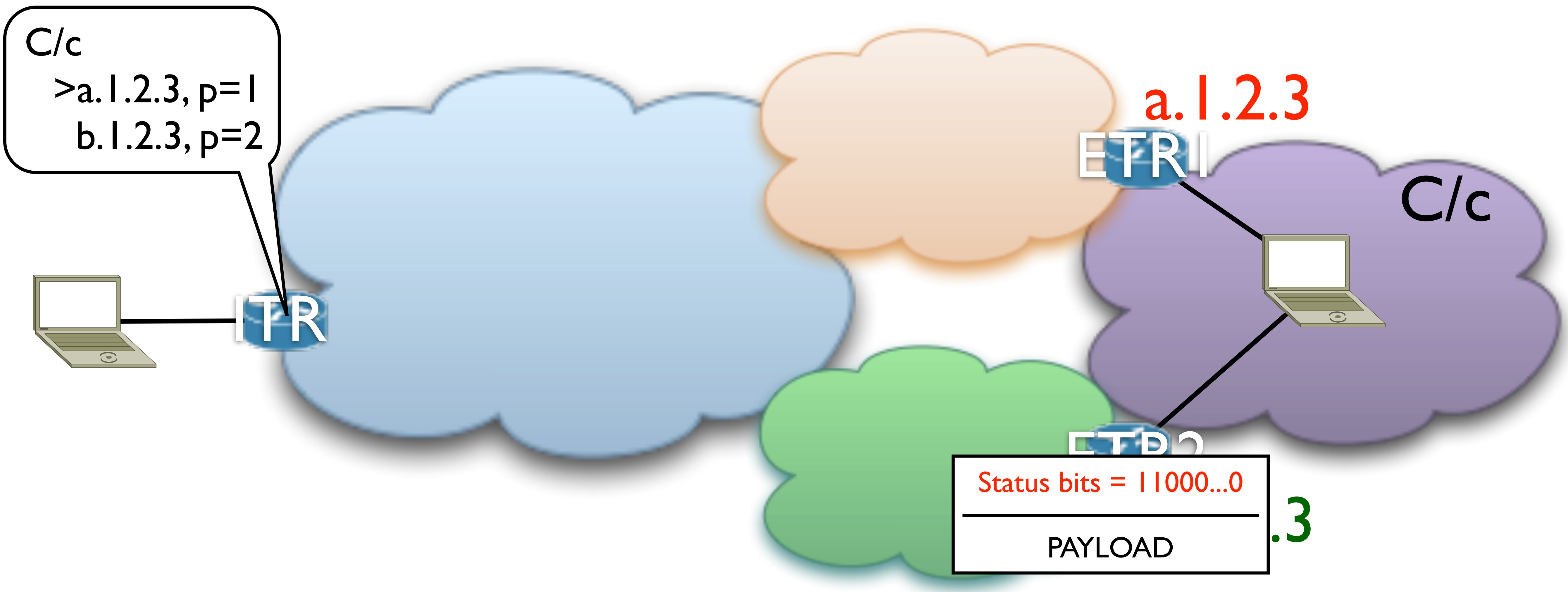
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



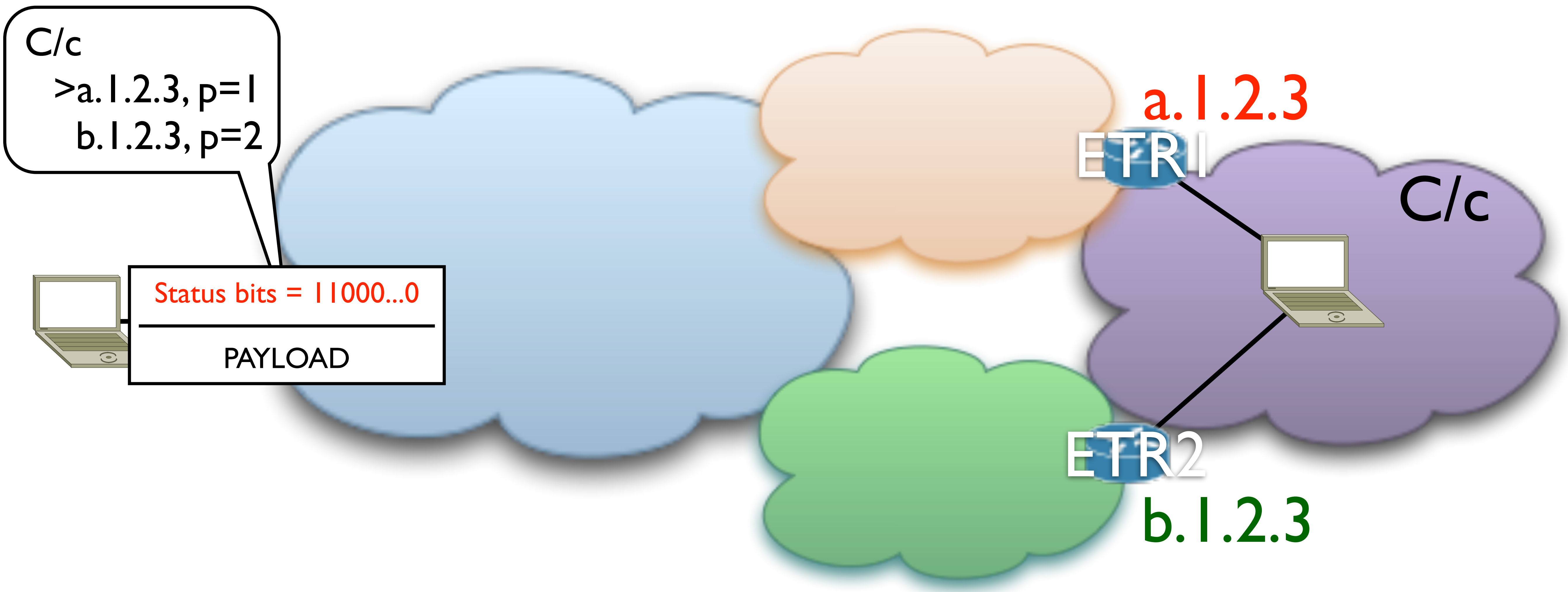
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



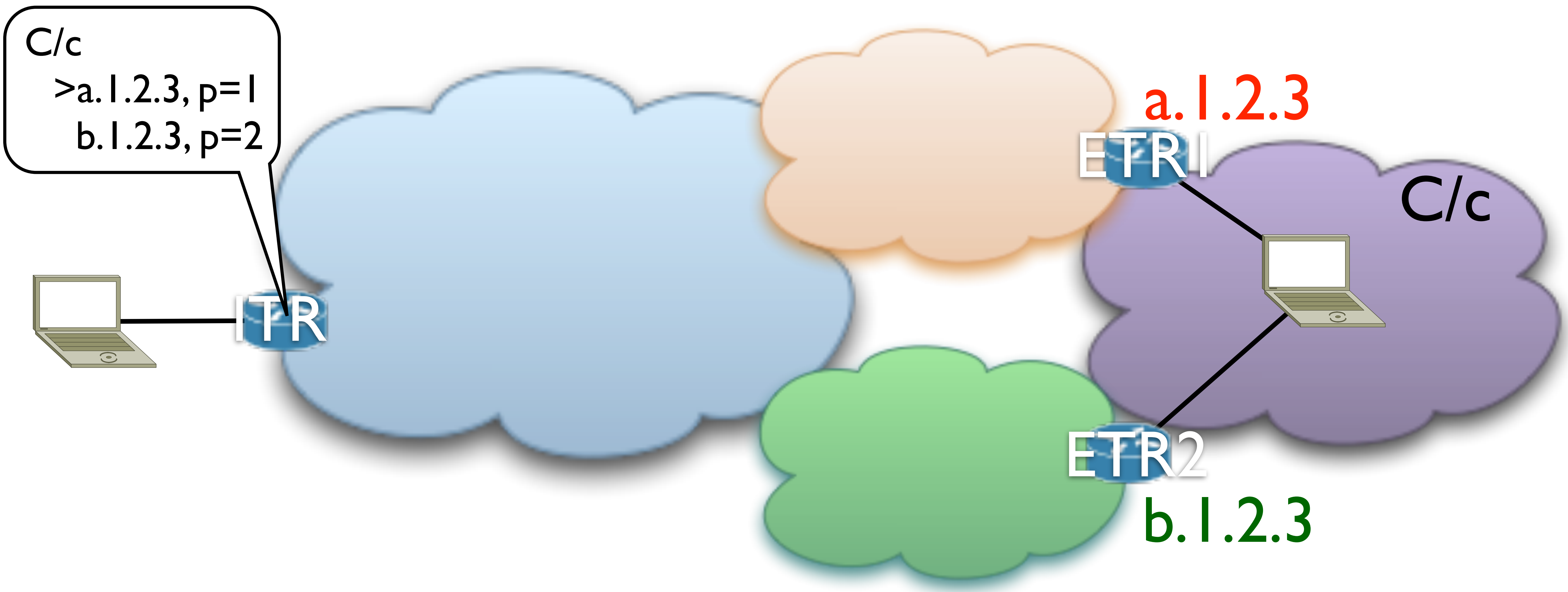
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



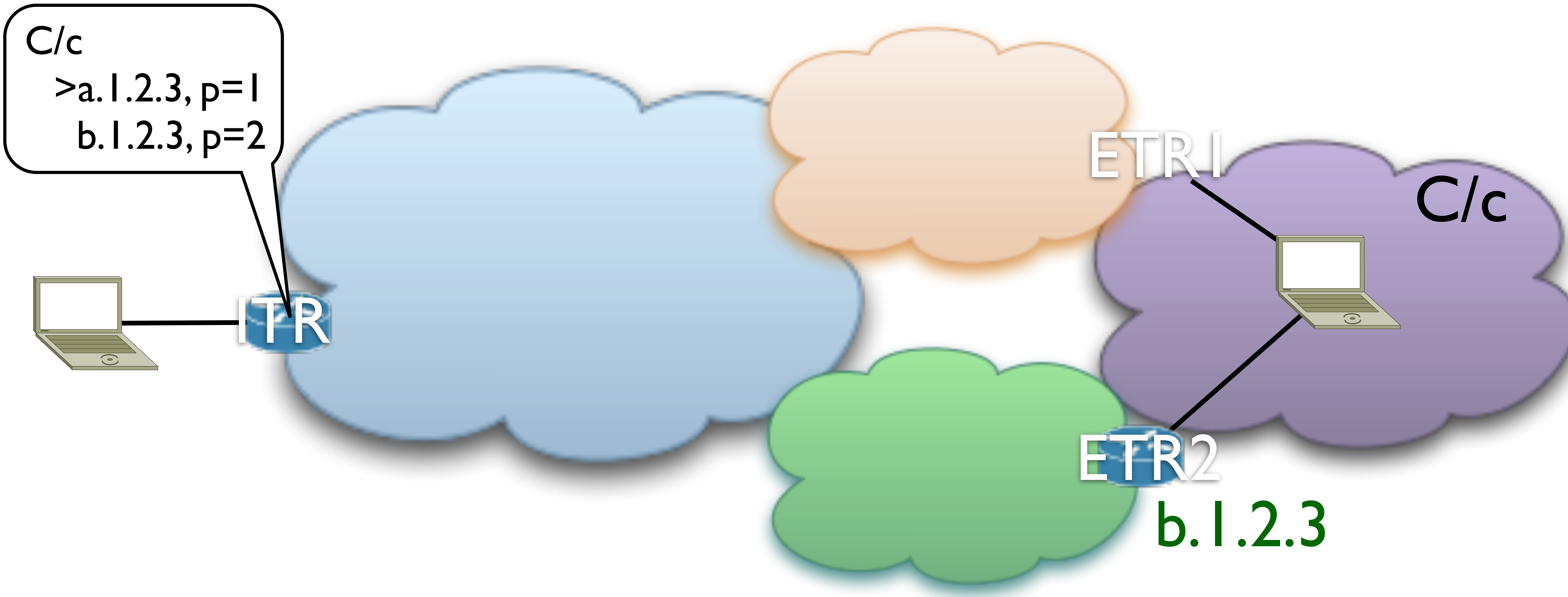
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



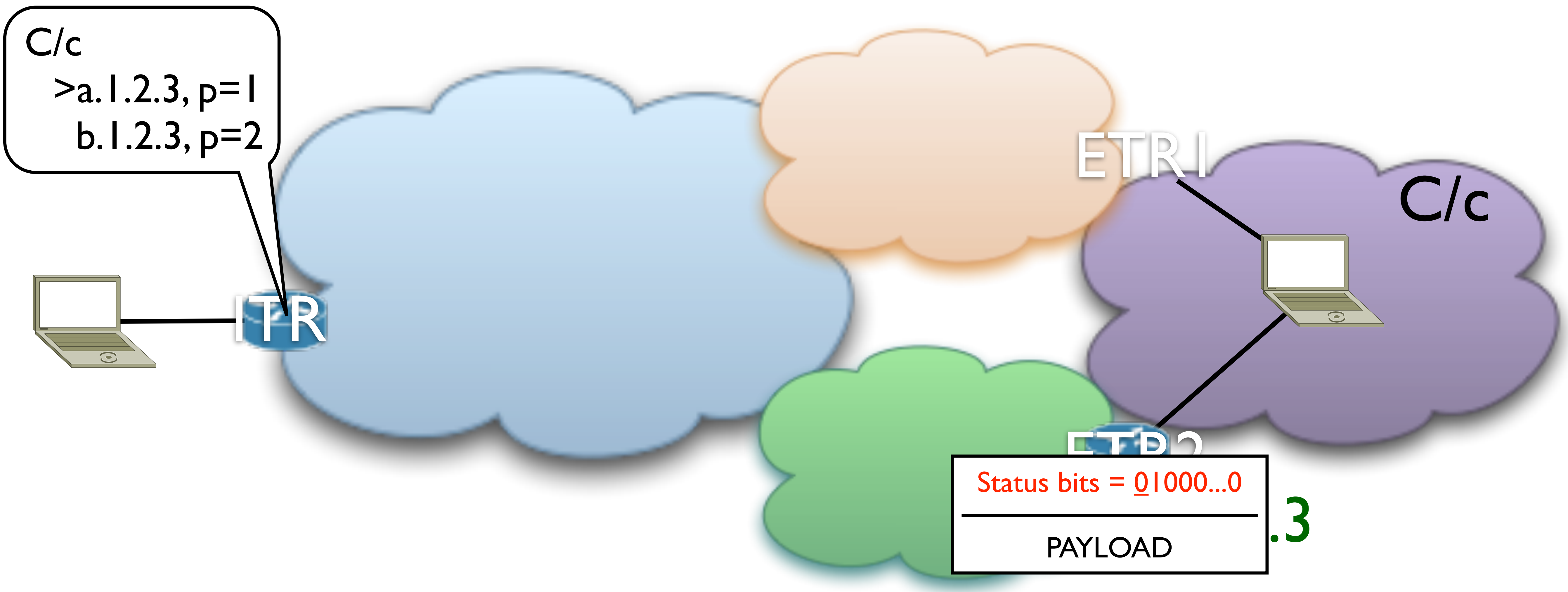
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



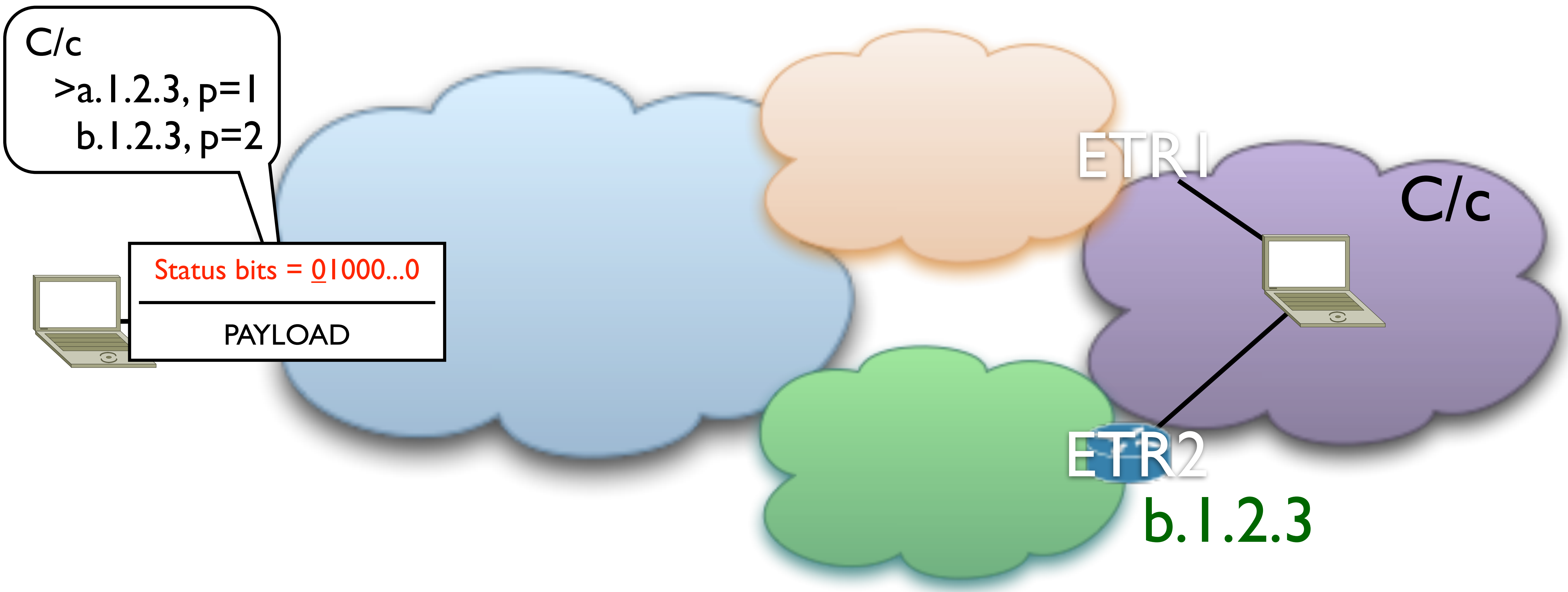
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



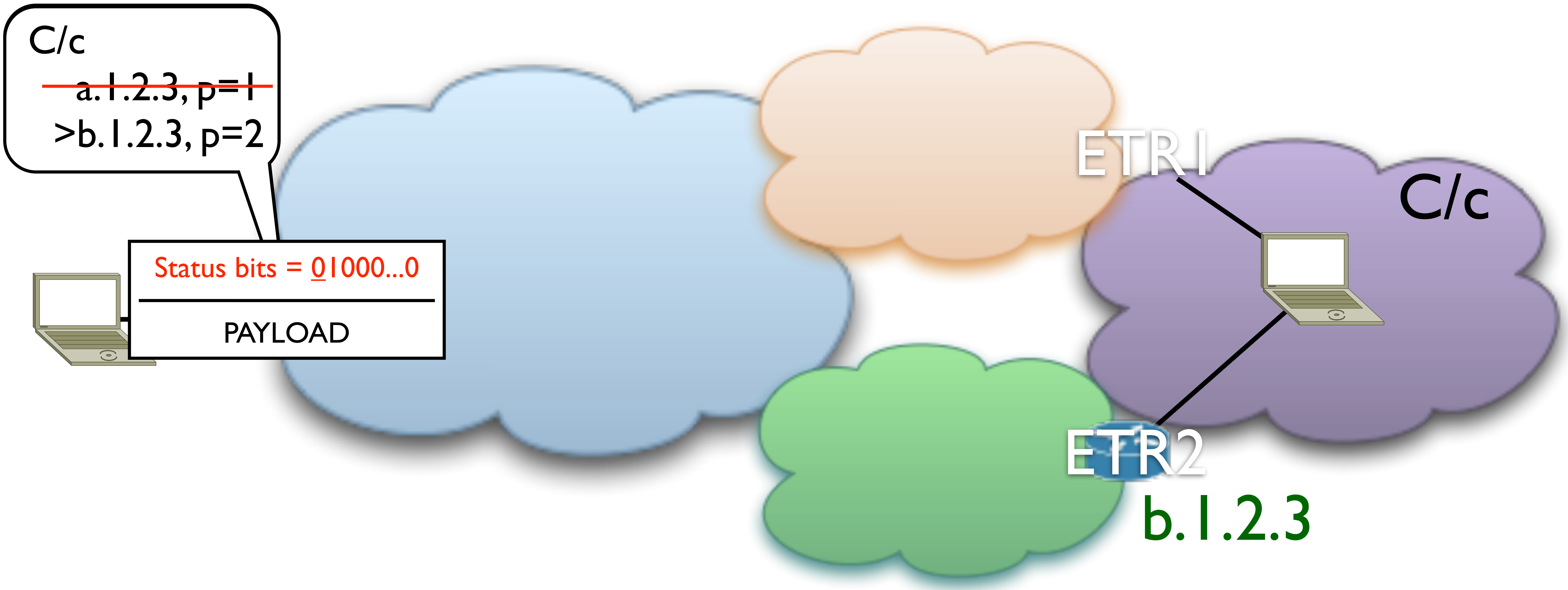
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



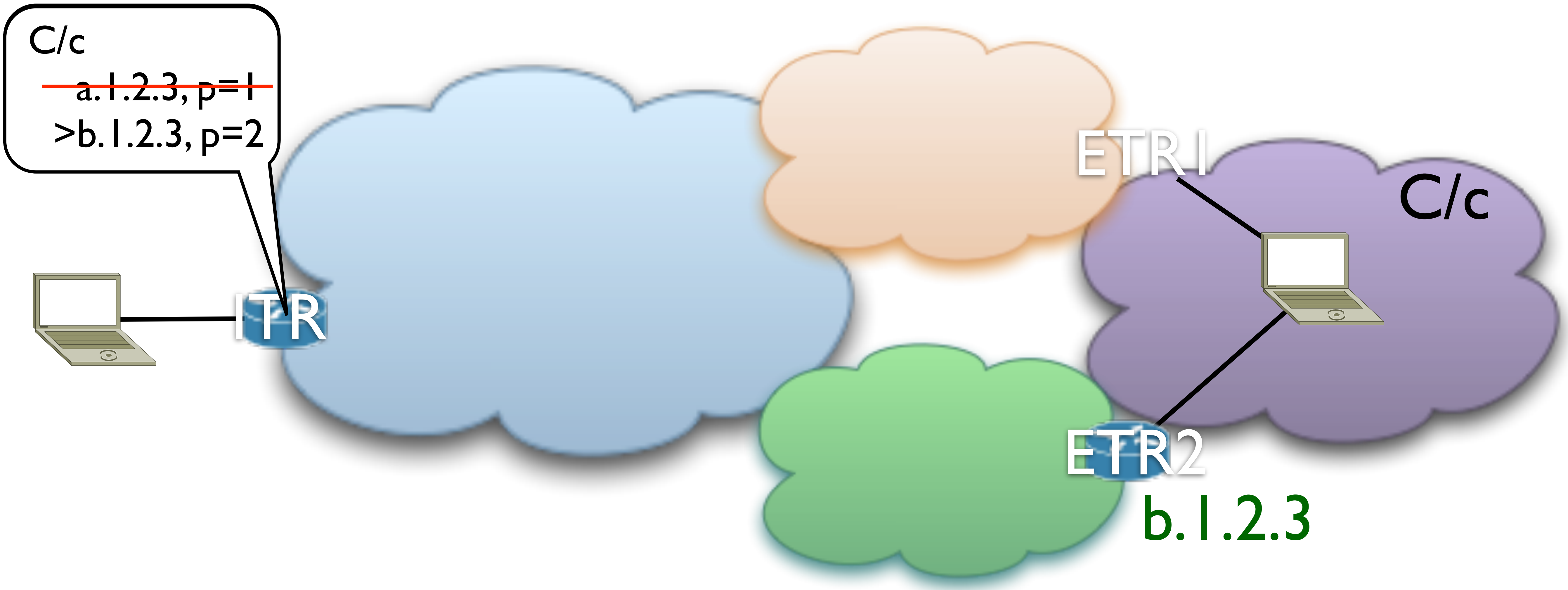
- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

Solving the reachability problem with the locator status bits



- ETR2 notices the failure and informs all ITRs to which it is sending LISP encapsulated packets by setting the reachability bit of ETR1 to 0

What if the failure is not notified locally to xTRs?

- ITR needs to periodically probe the ETRs they send traffic to
- Unidirectional or triangular routing: periodically send reachability probes
- Bidirectional traffic: echo-nonce algorithm

Echo-Nonce Algorithm

- Uniquely identify a packet by setting a nonce while encapsulating (at the ITR)
  - Nonce is optional
- Set the E-bit to 1 to ask the ETR to start the Echo-Nonce algorithm

Echo-Nonce Algorithm

- xTR *I* wants to know if the RLOC it uses to reach ETR *E* is reachable:
  - Generate a nonce *n* when encap to *E*
  - Set echo-nonce bit to1
- Next time *E* sends a packet to I, the packet has the nonce set to *n*
- If *I* receives the nonce within a given time, it considers the RLOC reachable, otherwise *E* is considered unreachable

Be incrementally deployable

3 challenges

- non-LISP to non-LISP
- non-LISP to LISP
- LISP to non-LISP

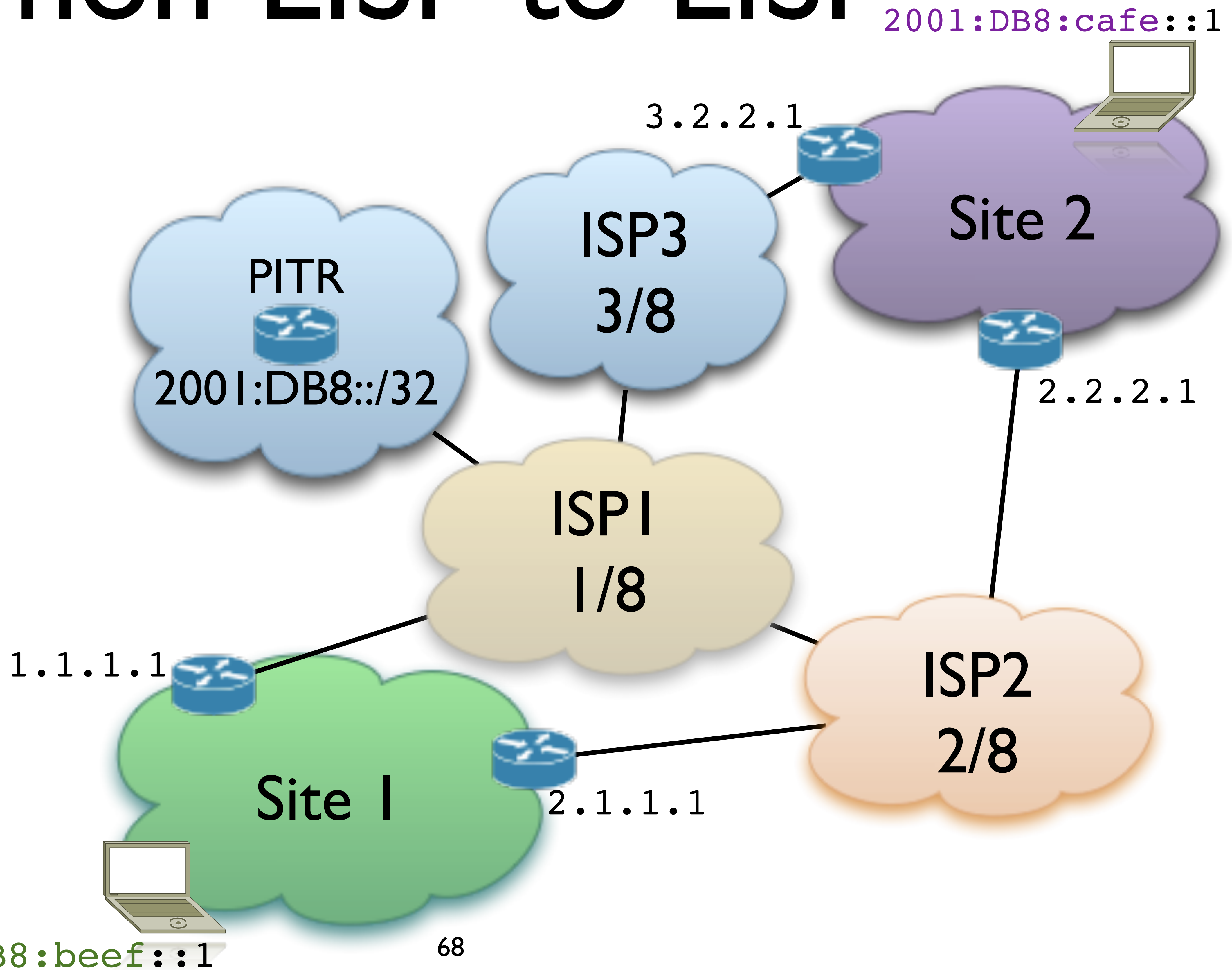
non-LISP to non-LISP

- LISP is not involved
  - Current Internet

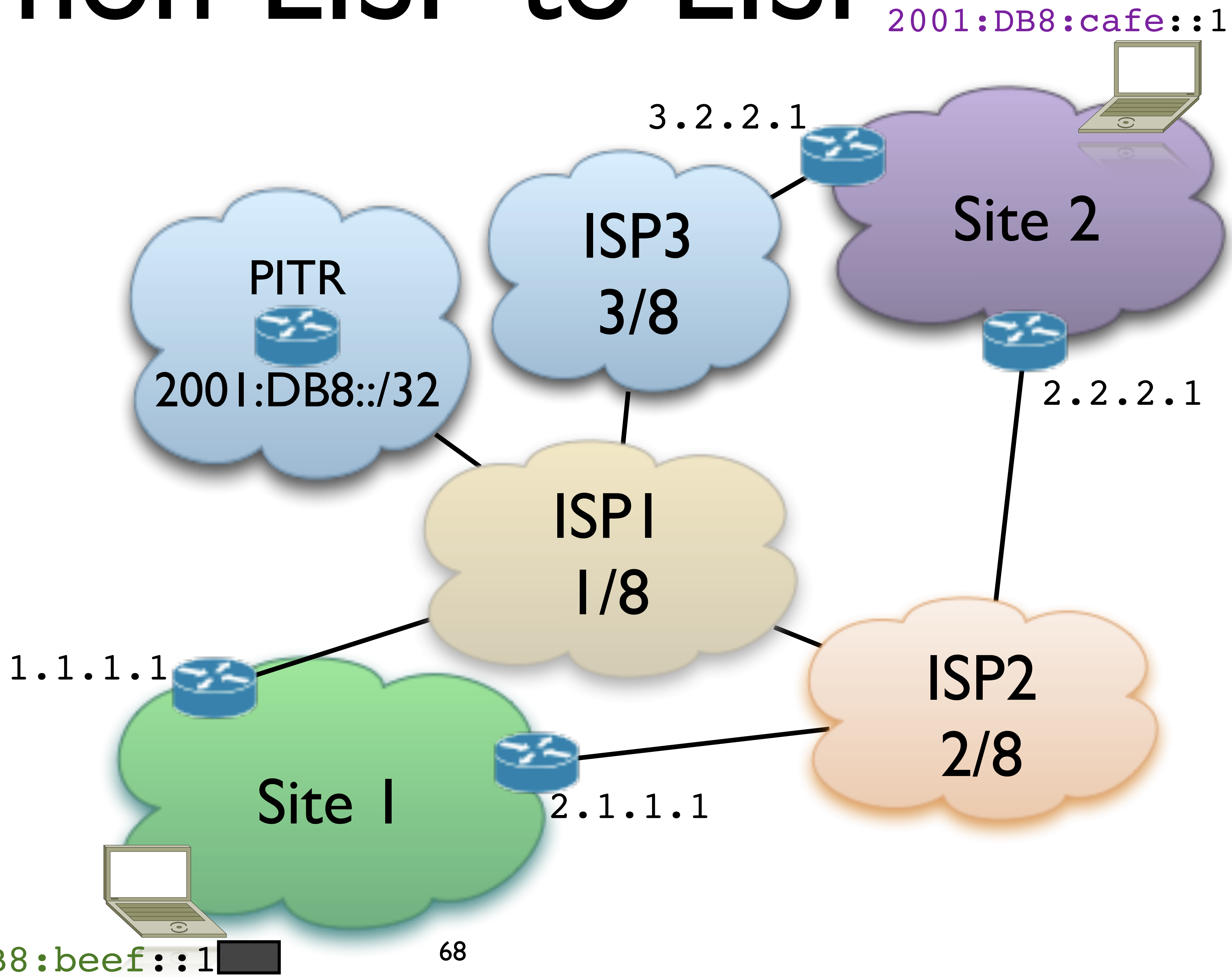
non-LISP to LISP

- Add a Proxy ITR (PITR) middle-box somewhere on the Internet
- PITR originates EID advertisement
  - The EID prefix becomes globally routable (!)
  - The PITR attracts traffic for the EID prefix
- Traffic with destination IP in the EID prefix are natively forwarded to the PITR
- The PITR acts as the ITR on behalf of non-LISP sites

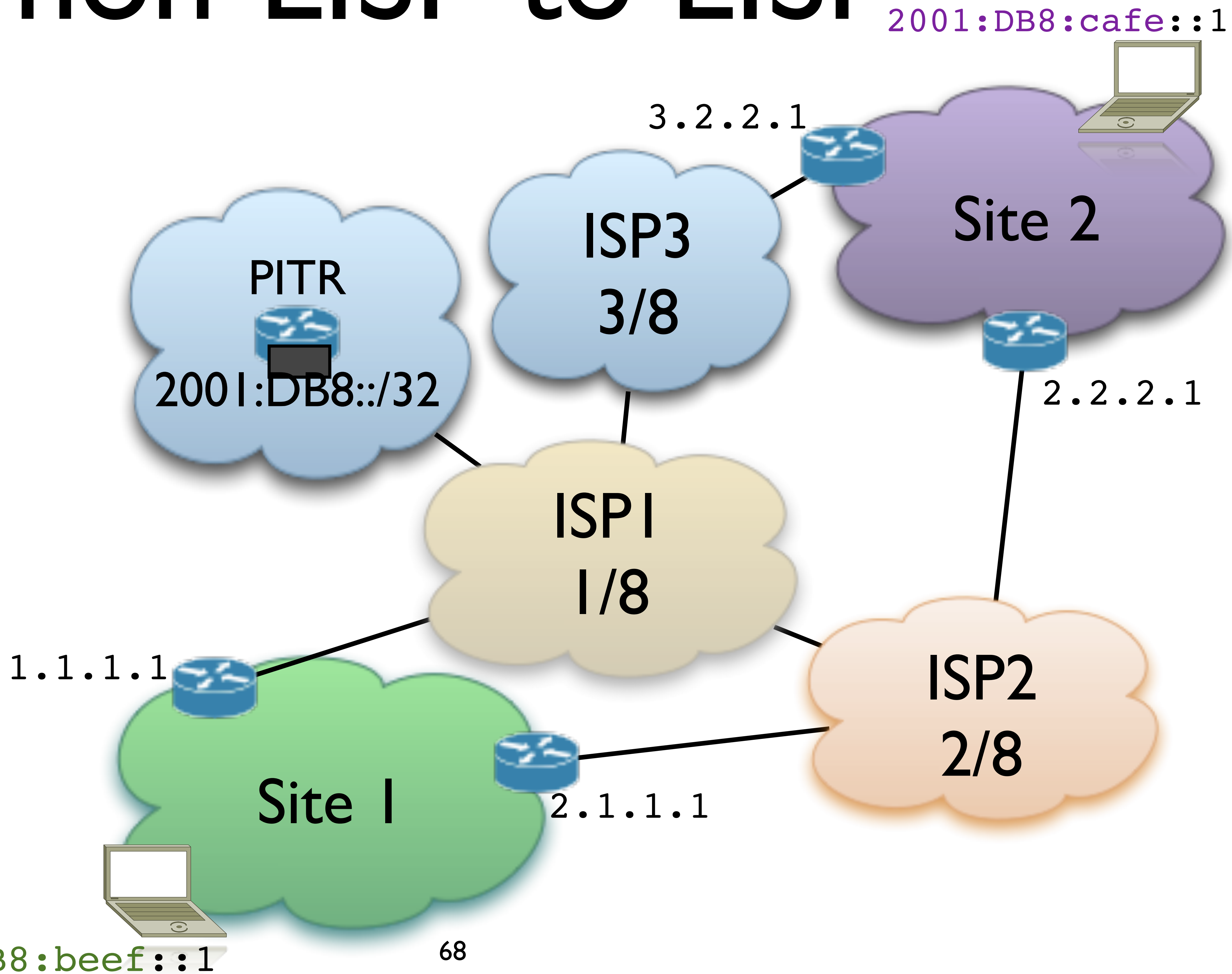
non-LISP to LISP



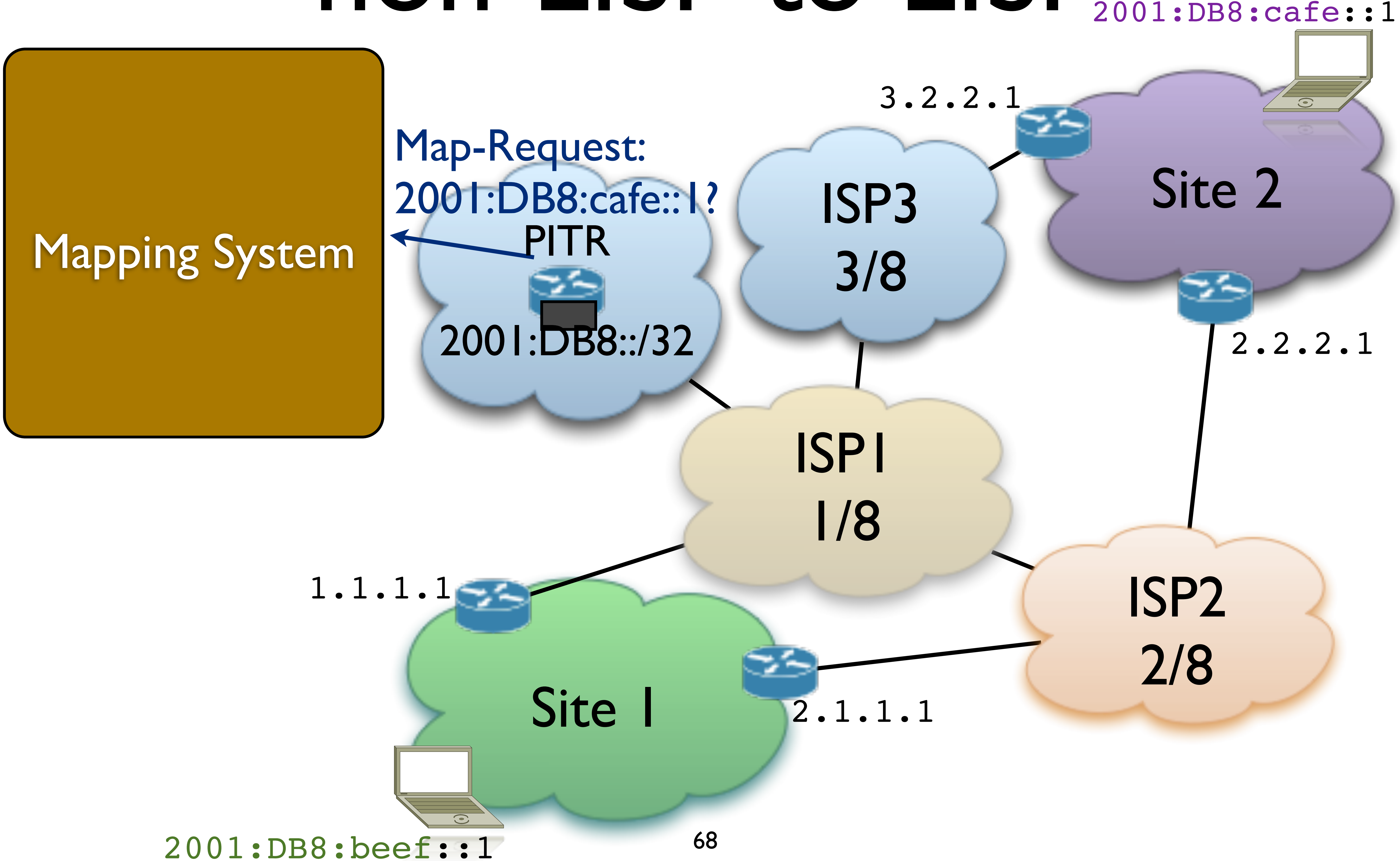
non-LISP to LISP



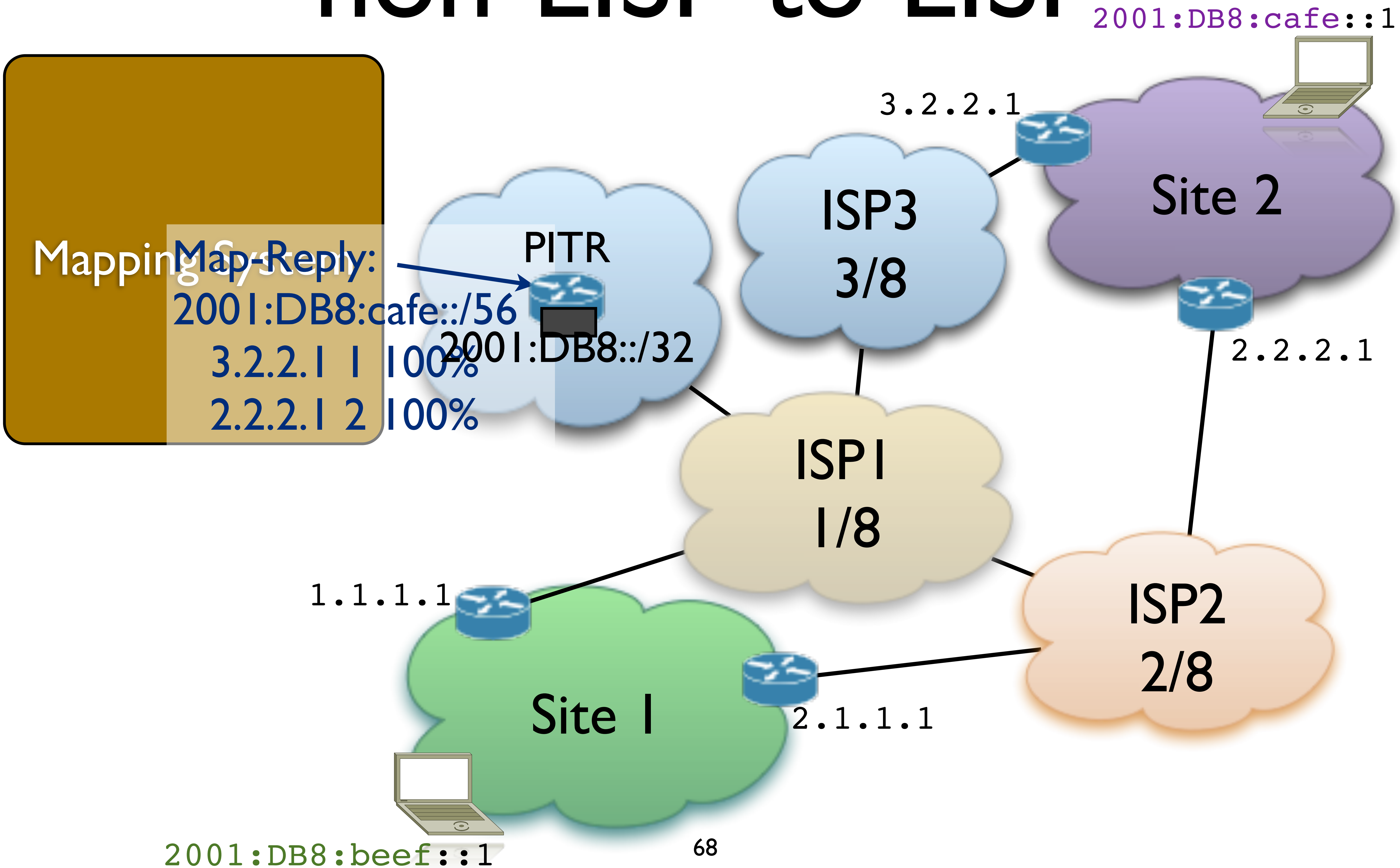
non-LISP to LISP



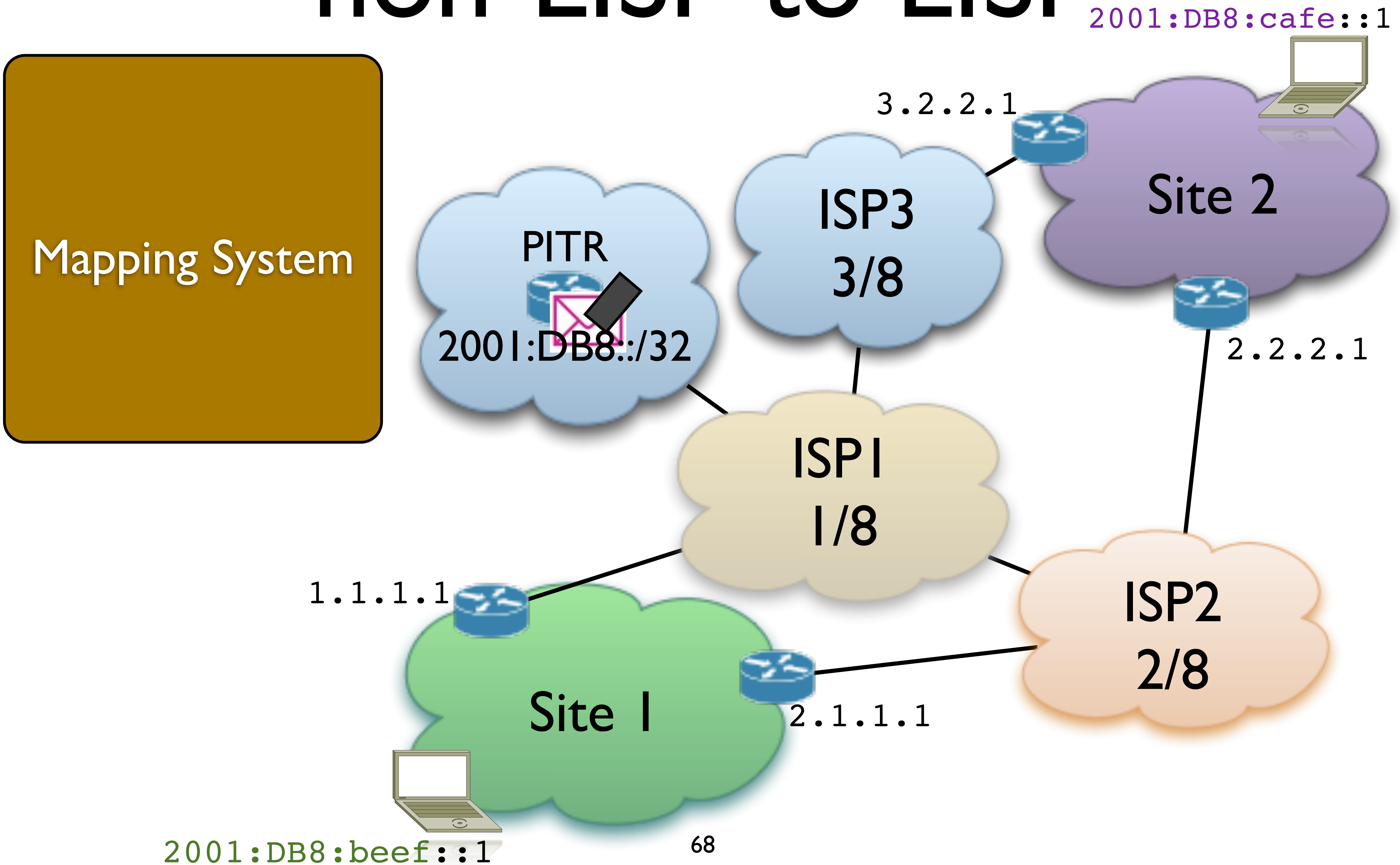
non-LISP to LISP



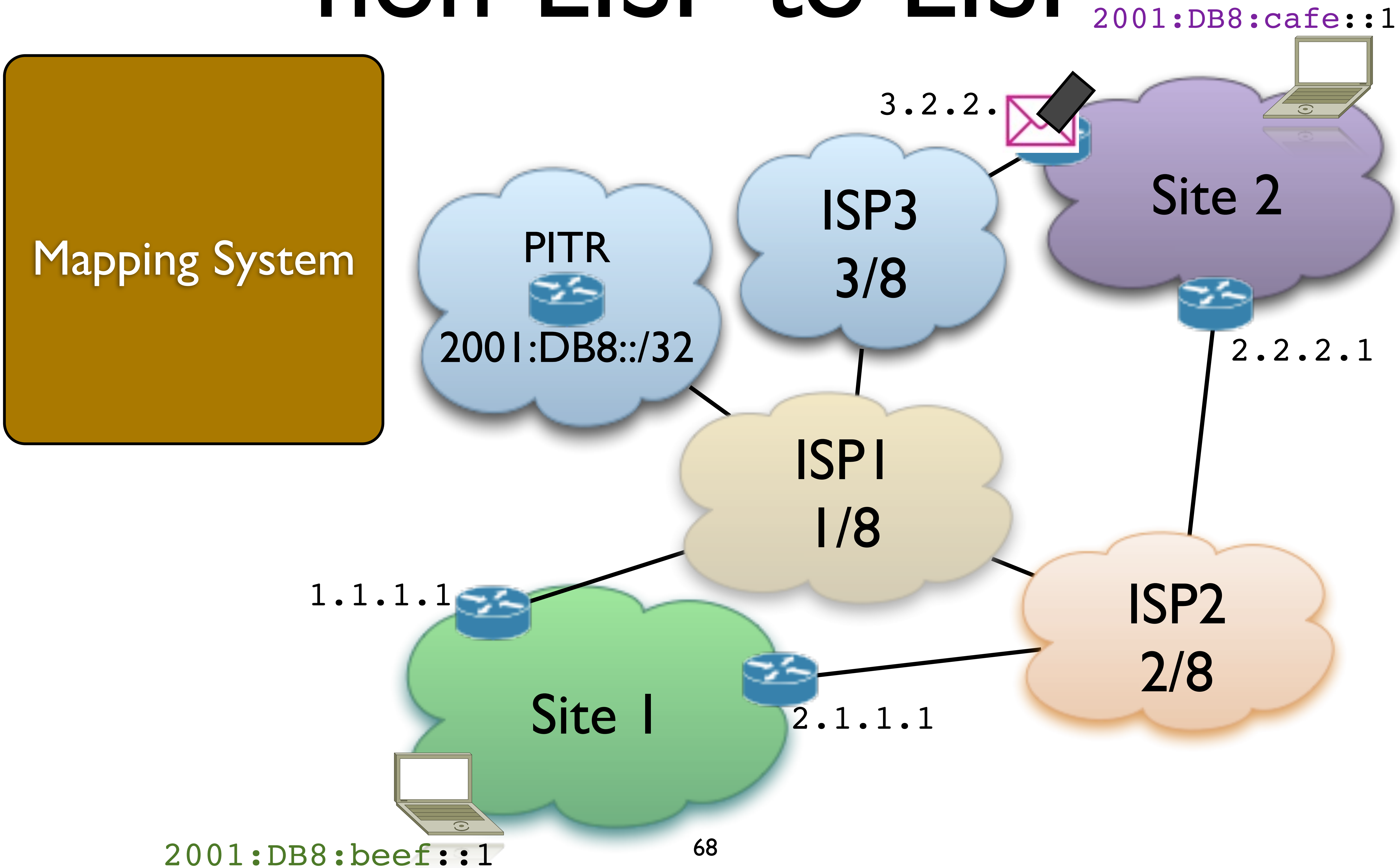
non-LISP to LISP



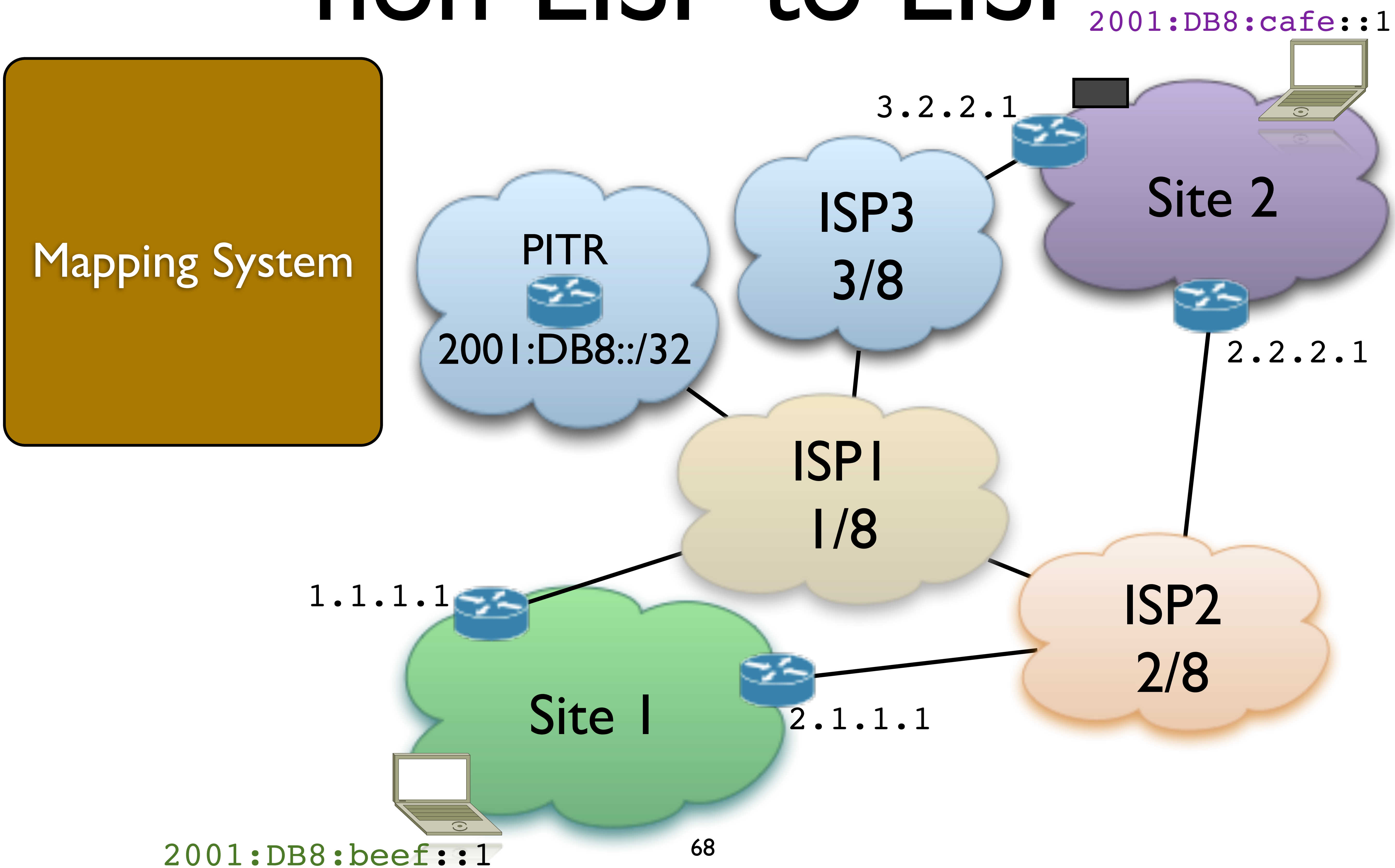
non-LISP to LISP



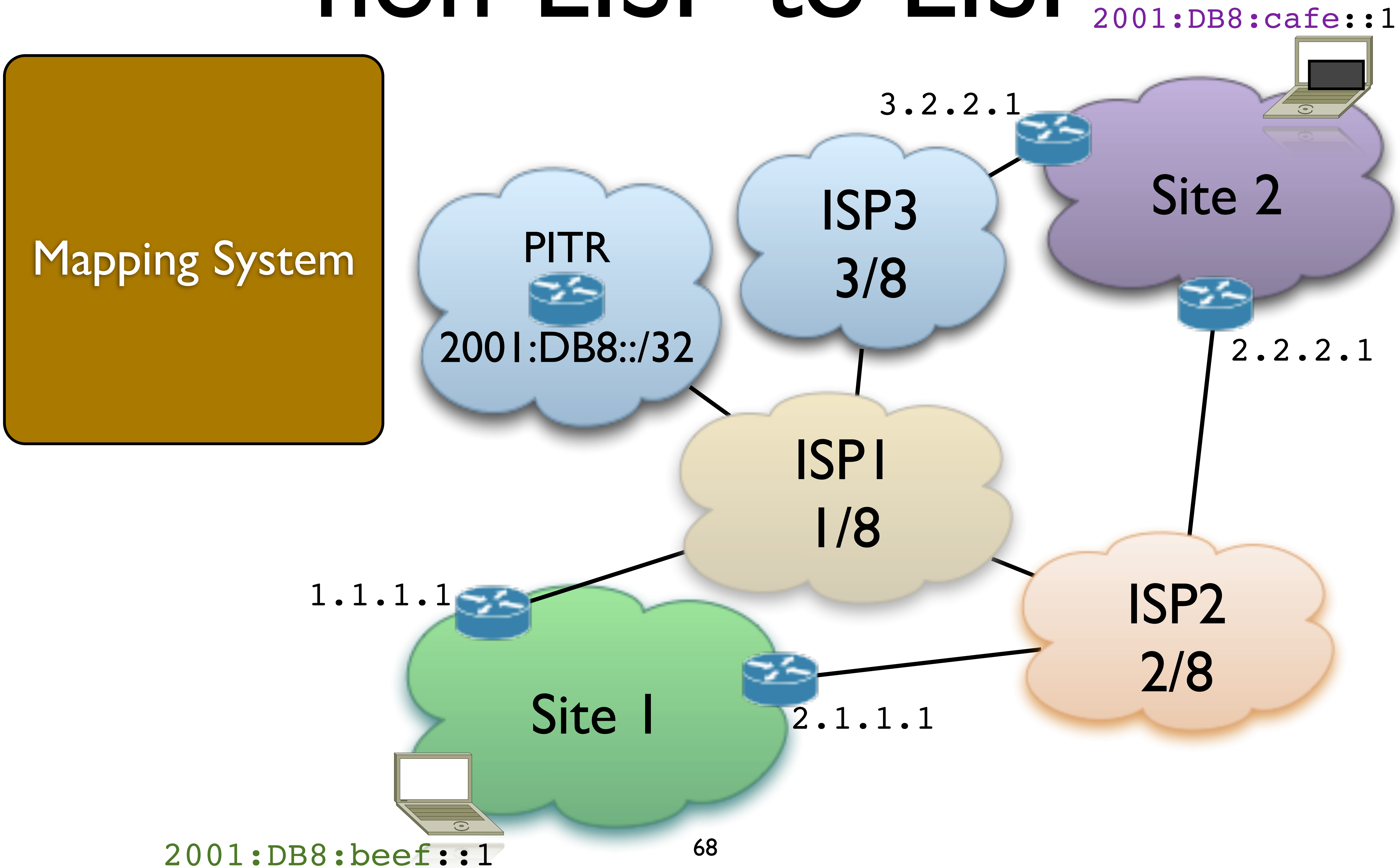
non-LISP to LISP



non-LISP to LISP



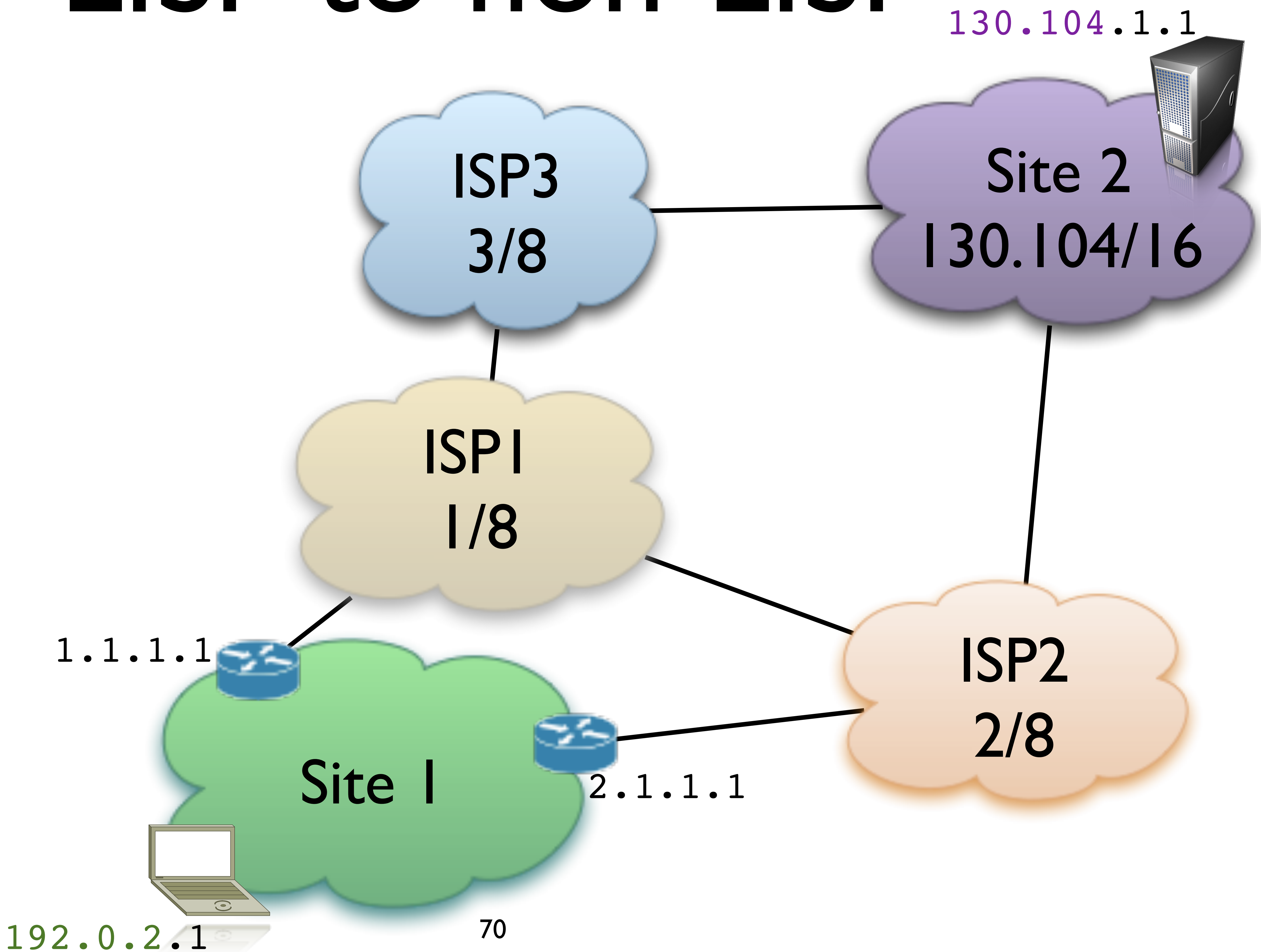
non-LISP to LISP



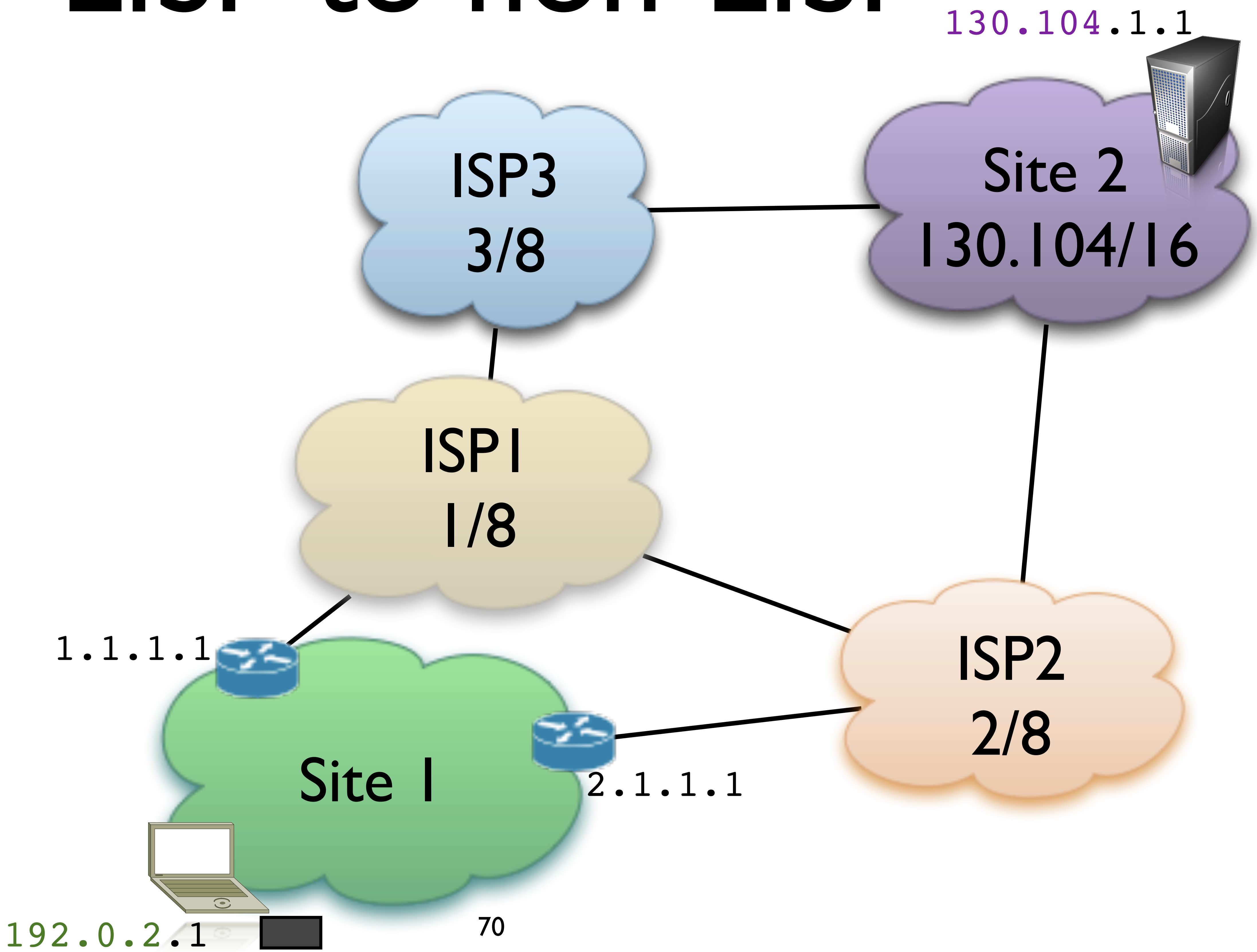
LISP to non-LISP

- EID and RLOC space are separated
  - The ITR does not encapsulate if the destination IP is not an EID
- If no PITR for the source, use LISP-NAT
  - LISP-NAT rewrites the non-routable EID source to a routable source and keeps the state for the reverse direction

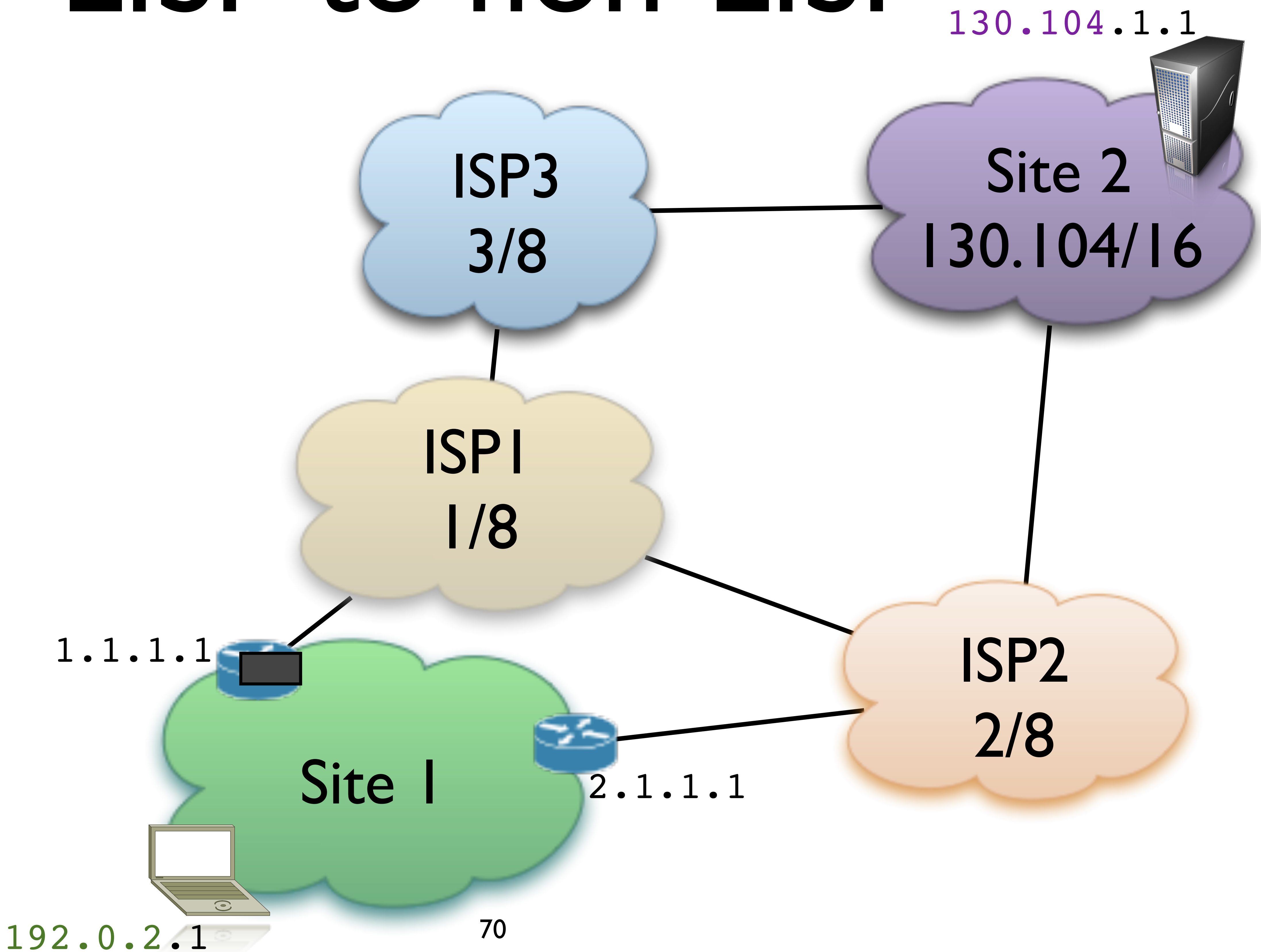
LISP to non-LISP



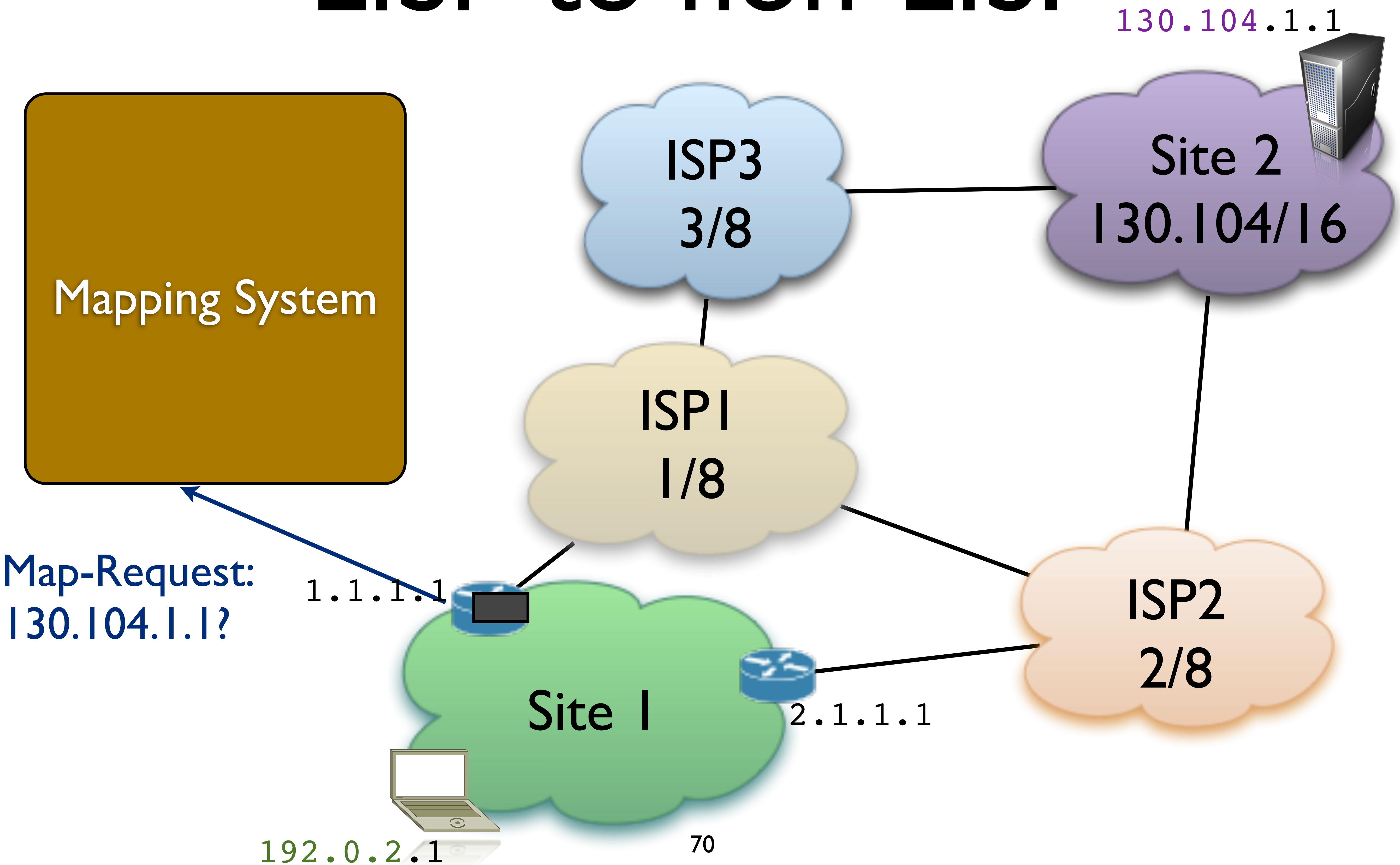
LISP to non-LISP



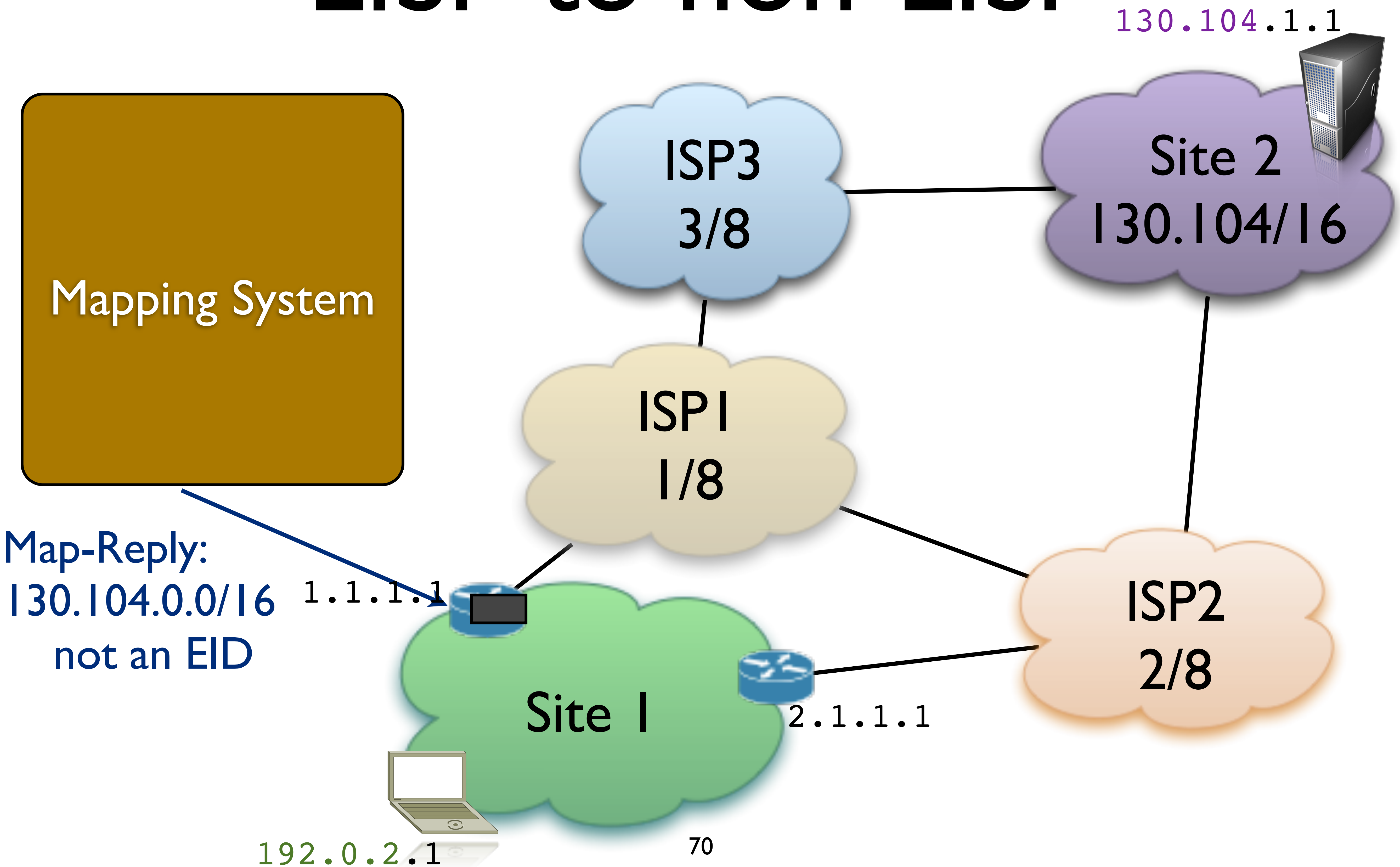
LISP to non-LISP



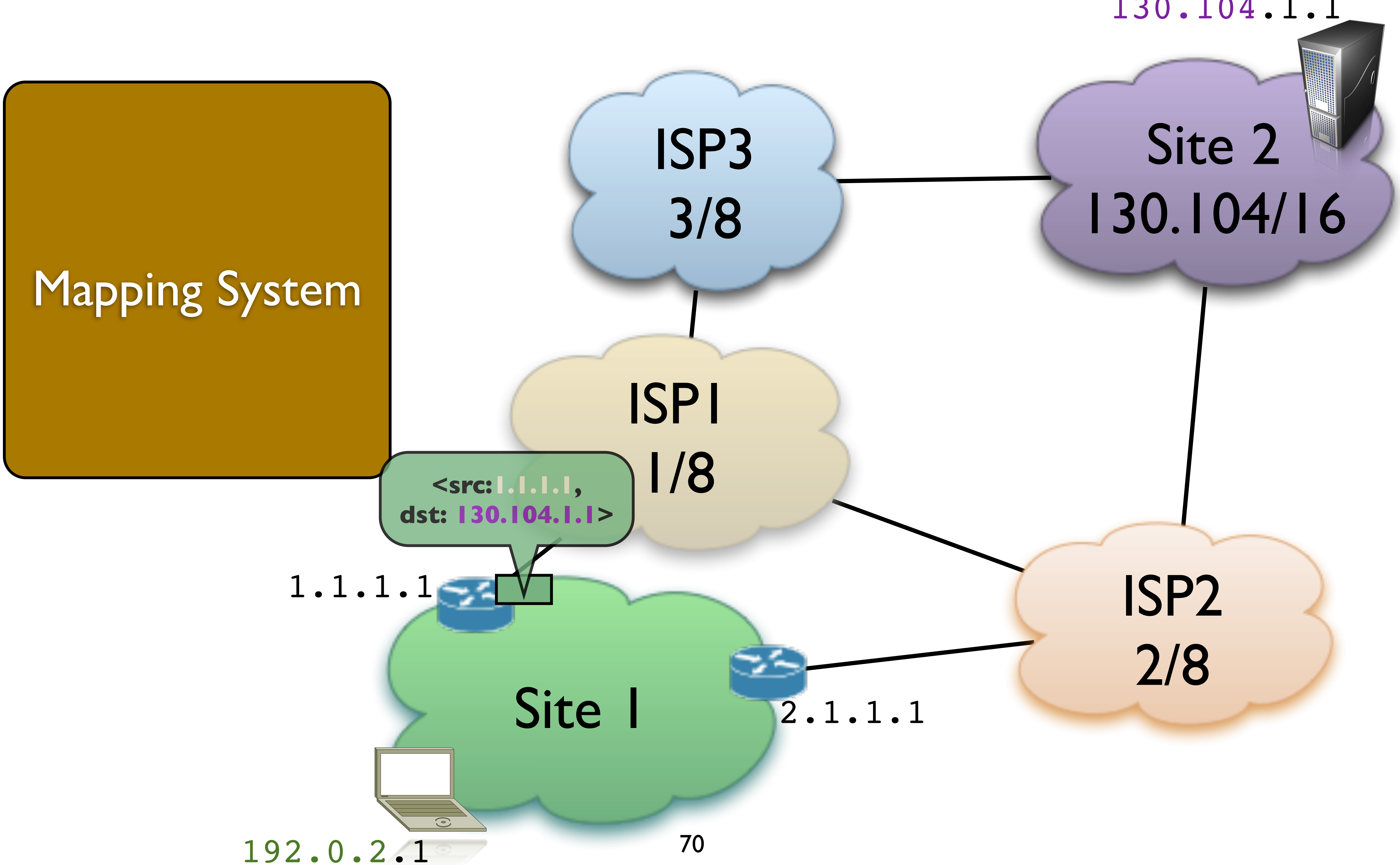
LISP to non-LISP



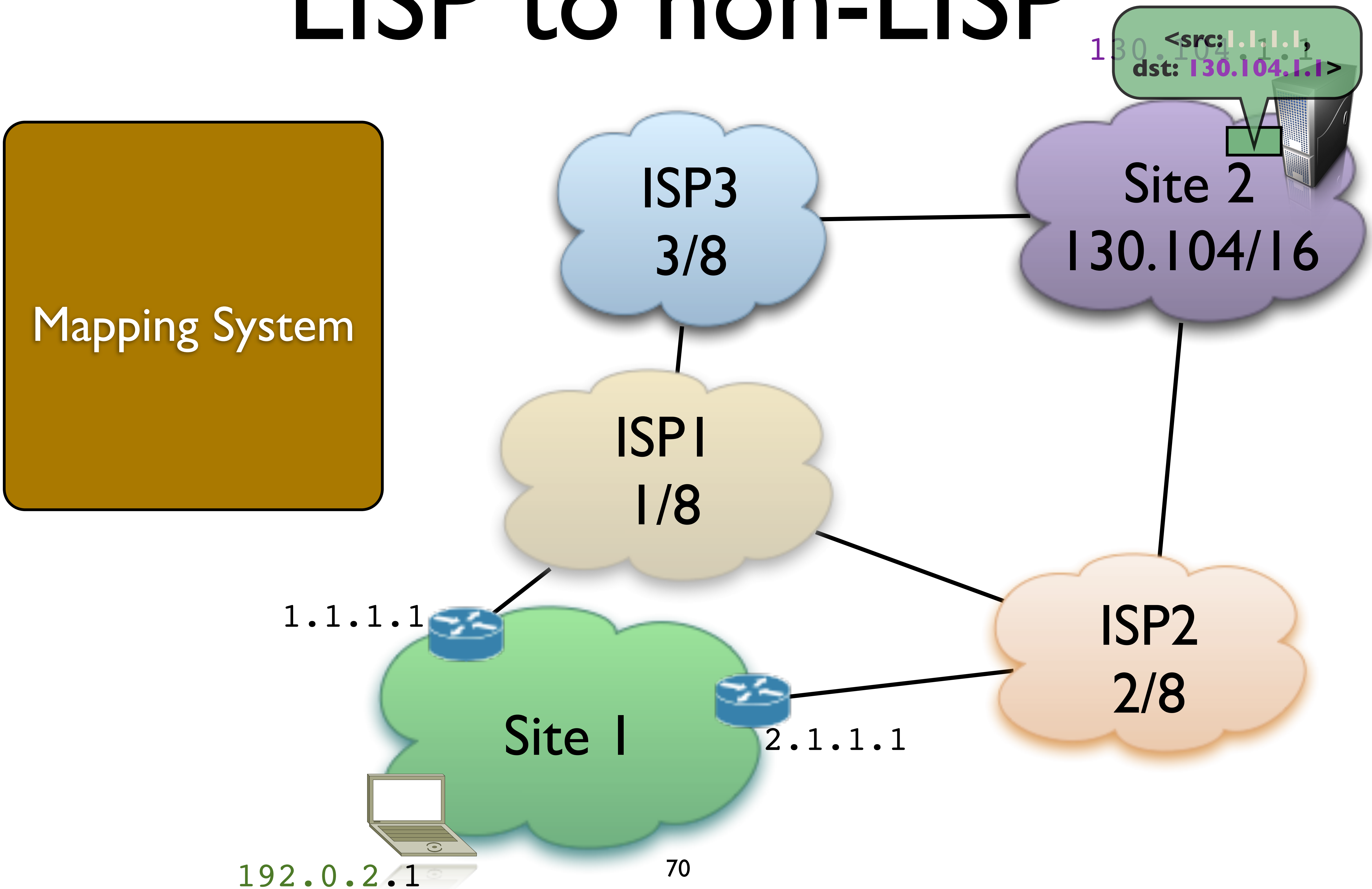
LISP to non-LISP



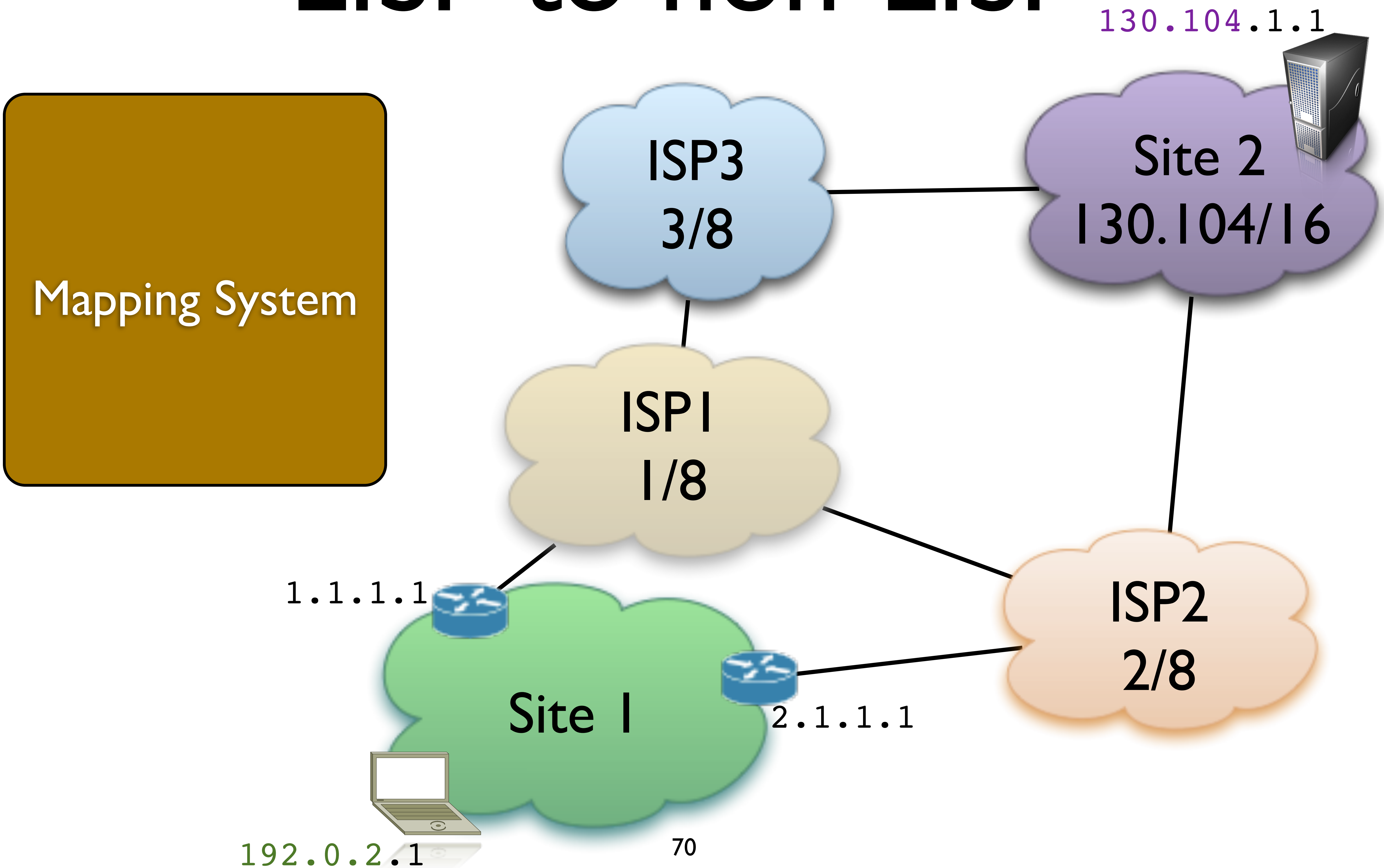
LISP to non-LISP



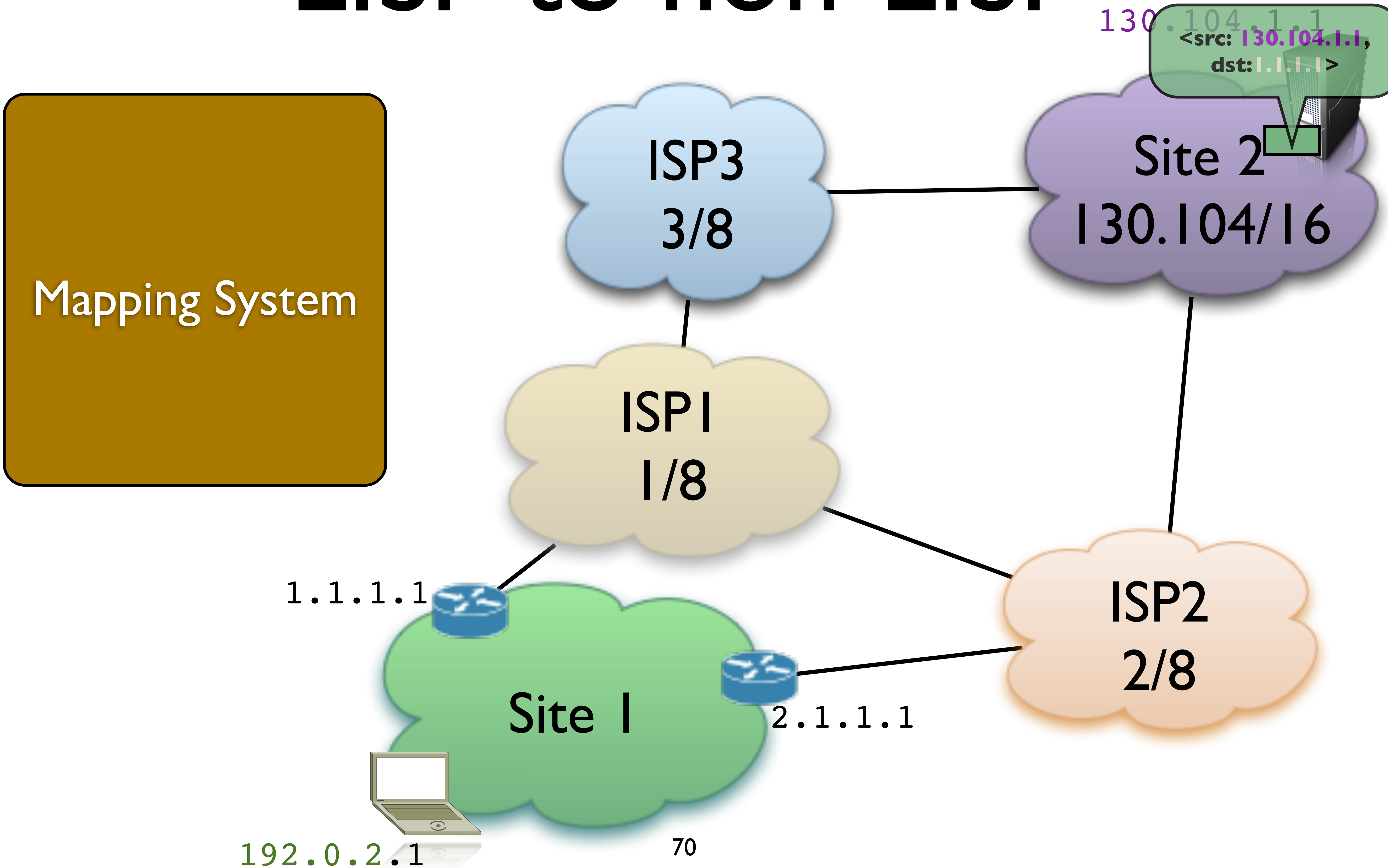
LISP to non-LISP



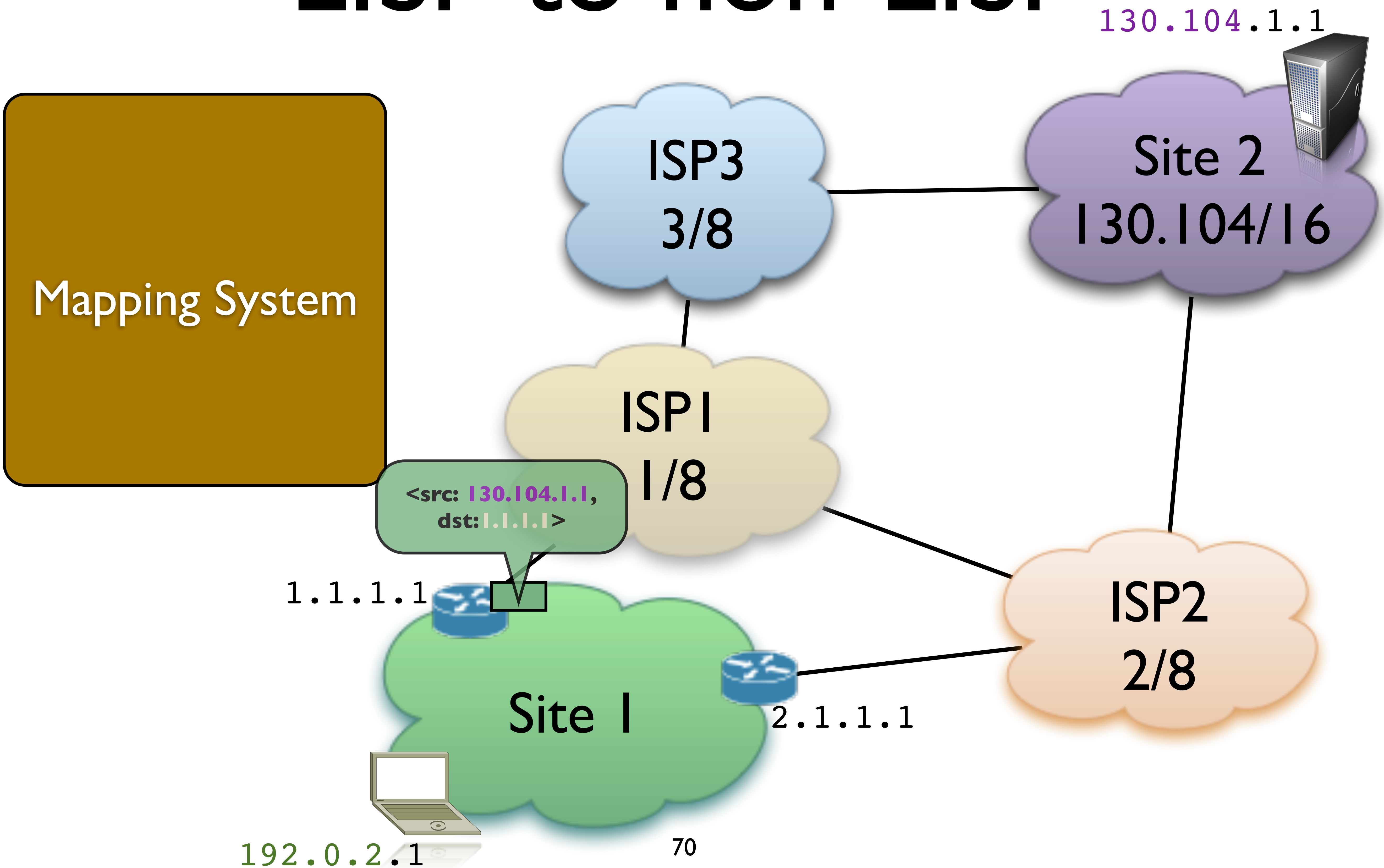
LISP to non-LISP



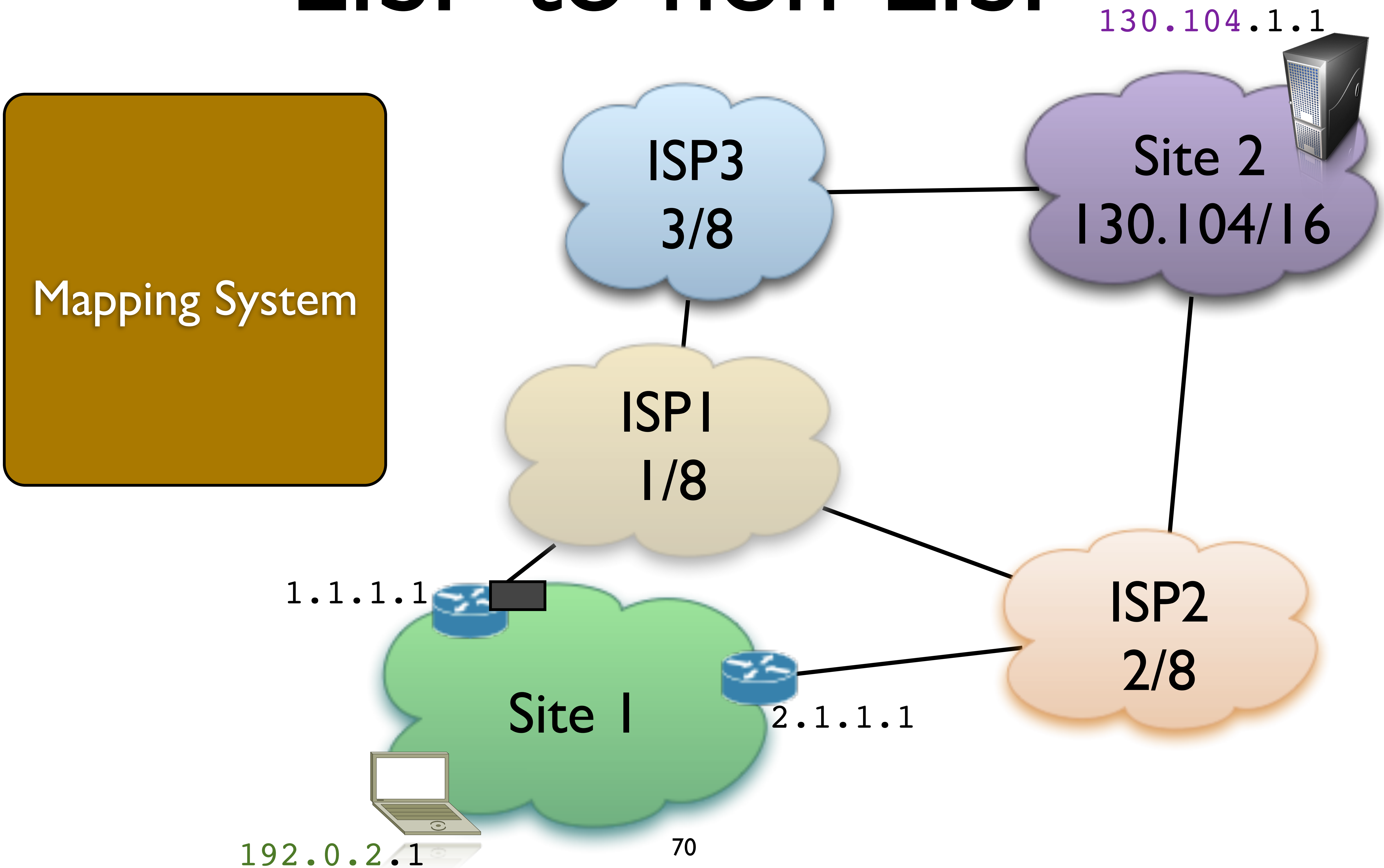
LISP to non-LISP



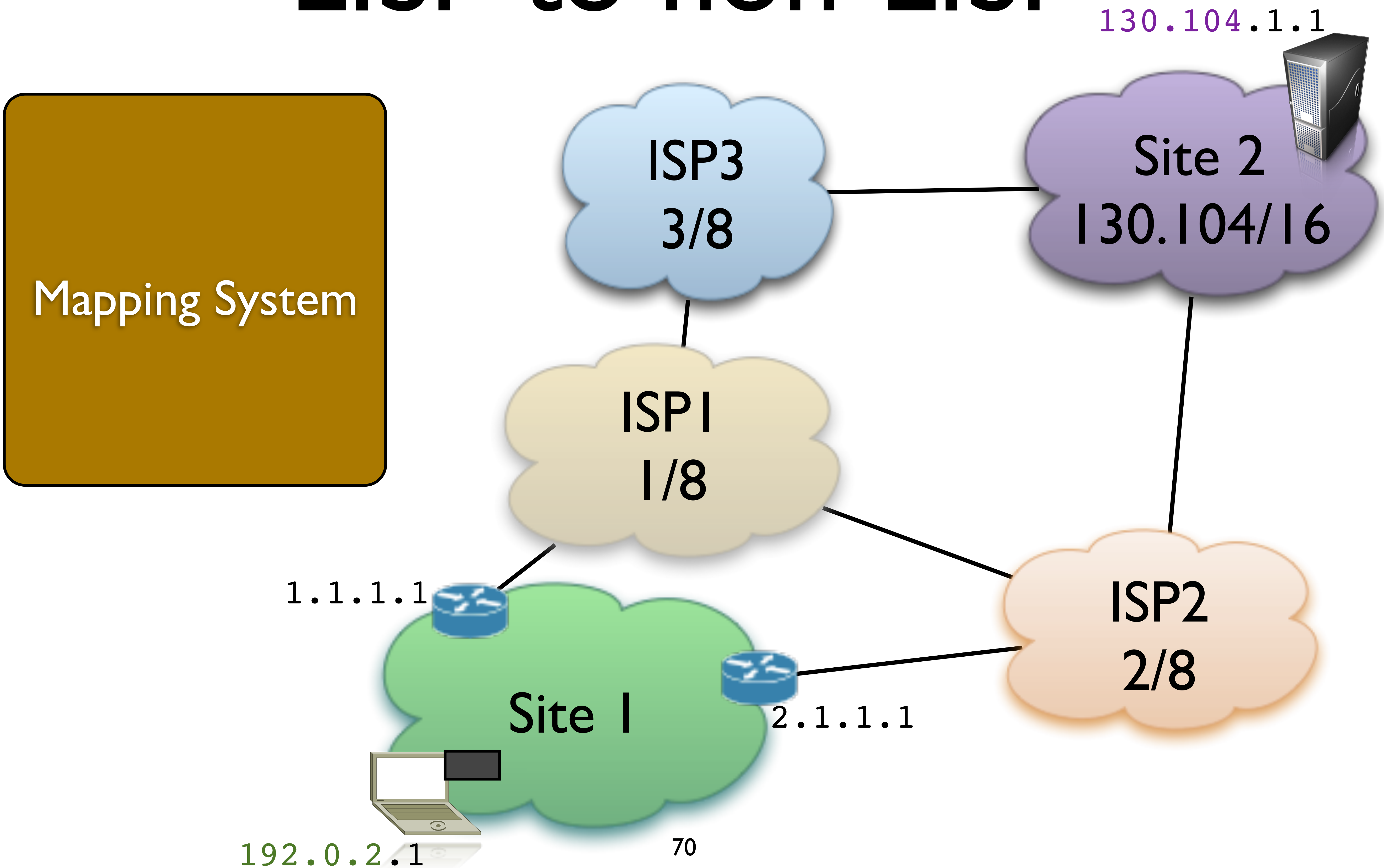
LISP to non-LISP



LISP to non-LISP



LISP to non-LISP



No router hardware changes and minimize router software changes

Use IP and UDP

- RLOCs and EIDs are pure IP packets
  - Any router implements IP
- EID prefixes follow CIDR
  - Any router implements longest prefix matching
- Transport LISP over UDP
  - Any router implements UDP

Conclusion

Are the goals reached?

Are the goals reached?

1. Reduction of routing table size in the "default-free zone" (DFZ)?

Are the goals reached?

1. Reduction of routing table size in the "default-free zone" (DFZ)?
2. More cost-effective multihoming?

Are the goals reached?

1. Reduction of routing table size in the "default-free zone" (DFZ)?
2. More cost-effective multihoming?
3. Easing of renumbering burden when clients change providers?

Are the goals reached?

1. Reduction of routing table size in the "default-free zone" (DFZ)?
2. More cost-effective multihoming?
3. Easing of renumbering burden when clients change providers?
4. Traffic engineering capabilities?

Are the goals reached?

1. Reduction of routing table size in the "default-free zone" (DFZ)?
2. More cost-effective multihoming?
3. Easing of renumbering burden when clients change providers?
4. Traffic engineering capabilities?
5. Mobility without address changing?

Research perspectives

- Mapping Systems
- Security
- Reachability/Resiliency
- IPv4 to IPv6 transition with LISP
- Mobility
- LISP for enterprise/CDN/DC
- ...

References

- Host-based Loc/ID split

[hip]R. Moskowitz and P. Nikander, Host Identity Protocol, RFC5201

[shim6] E. Nordmark and M. Bagnulo, Shim6: Level 3 Multihoming Shim Protocol for IPv6, RFC5533

[ilnp] R. Atkinson, ILNP Concept of Operations, draft-rja-ilnp-intro-05.txt

[six/one] C. Vogt, Six/One: A Solution for Routing and Addressing in IPv6, draft-vogt-rrg-six-one-02.txt

References

- LISP

[lisp]D. Farinacci et al., Locator/ID Separation Protocol (LISP), draft-ietf-lisp-07.txt

[mn]D. Farinacci et al., LISP Mobile Node, draft-meyer-lisp-mn-01.txt

[inter] D. Lewis et al., Interworking LISP with IPv4 and IPv6, draft-ietf-lisp-interworking-00.txt

References

- LISP Mapping systems

[cons] S. Brim et al., LISP-CONS: A Content distribution Overlay Network Service for LISP, draft-meyer-lisp-cons-04.txt

[alt] V. Fuller et al., LISP Alternative Topology (LISP+ALT), draft-ietf-lisp-alt-04.txt

[nerd] E. Lear, NERD: A Not-so-novel EID to RLOC Database, draft-lear-lisp-nerd-08.txt

[dht] L. Mathy and L. Iannone, LISP-DHT: towards a DHT to map identifiers onto locators, Rearch2008

[tree] LISP-TREE: A DNS Hierarchy to Support the LISP Mapping System, L. Jakab et al., JSAC, 2010

References

- Miscellaneous LISP

[l4] http://www.lisp4.net

[l6] http://www.lisp6.net

[lface] http://www.lisp4.facebook.com

[openlisp] L. Iannone et al., OpenLISP Implementation Report, draft-iannone-openlisp-implementation-01.txt

[lispclick] D.Saucez and V. Nguyen, LISP-Click: A Click implementation of the Locator/ID Separation Protocol, SyClick09

[cache] L. Iannone et al., On the cost of caching locator/ID mappings, CoNEXT07

[security] D. Saucez et al., Notes on LISP Security Threats and Requirements, draft-saucez-lisp-security-00.txt

[preserve] O. Bonaventure et al., Preserving the reachability of LISP ETRs in case of failures, draft-bonaventure-lisp-preserve-00.txt

[lispte] D. Saucez et al., Interdomain Traffic Engineering in a Locator/Identifier Separation Context, INM08

References

- General

IETF Internet Engineering Task Force:
http://www.ietf.org

LISP Working-group:
http://tools.ietf.org/wg/lisp

IRTF Internet Research Task Force:
http://www.irtf.org

[benefits] B. Quotin et al., Evaluating the benefits of the locator/identifier separation, Mobiarch07

[cidr] V. Fuller et al.. Classless Inter-Domain Routing (CIDR): an Address Assignment and Aggregation Strategy, RFC1519

Thank you

?? || /**/

Backup

Inter-domain routing

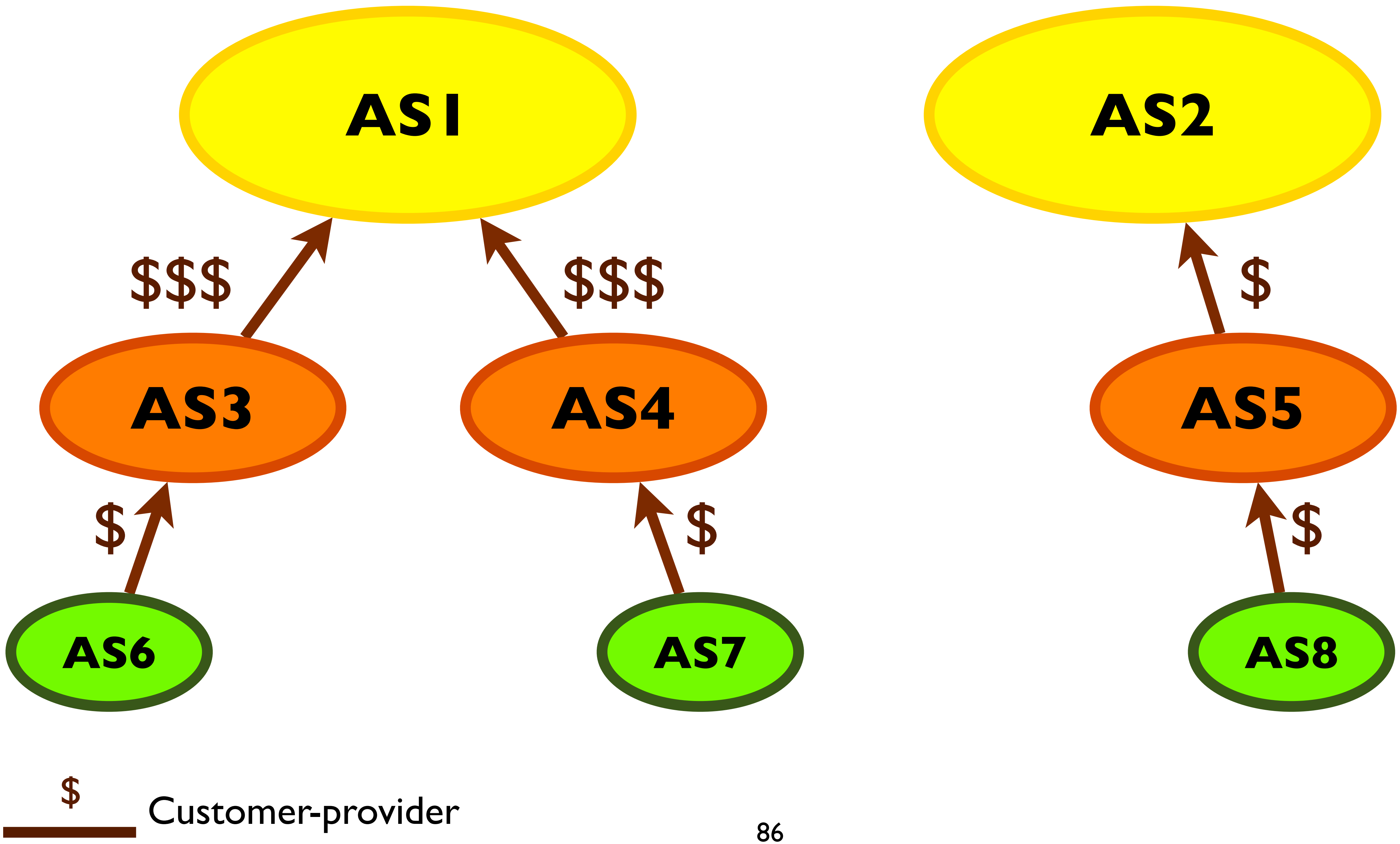
Inter-domain Routing

- Goal
  - Allow to transmit data along the best path towards the destination through several transit domains while taking into account the *routing policies* of each domain without knowing the detailed topology of those domains
- The *Border Gateway Protocol* (BGP) is the common protocol between the domains

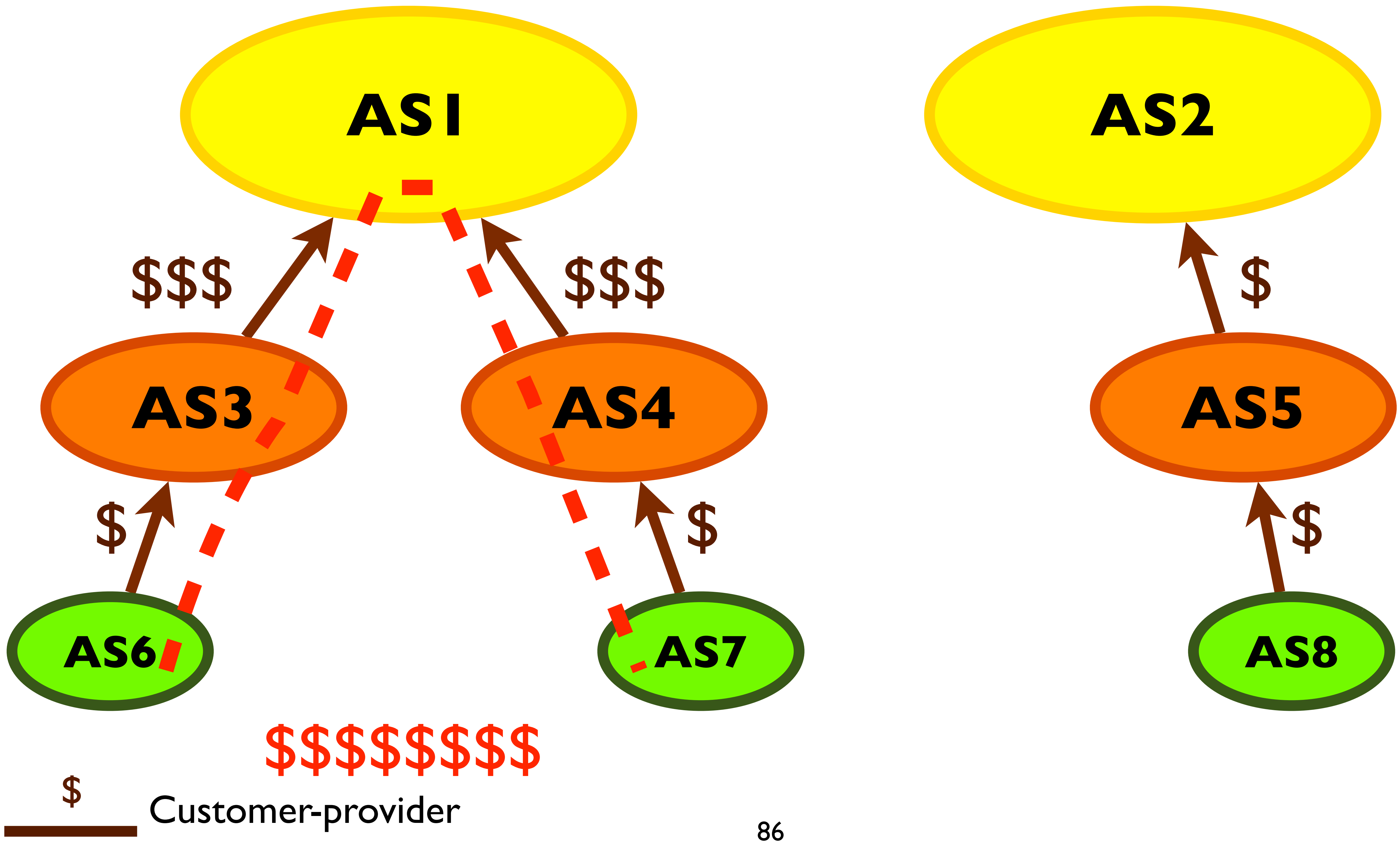
Routing Policies

- In theory, BGP allows each domain to defines its own routing policy...
- In practice, there are two common policies:
  - **Customer-provider peering:** customer c buy Internet connectivity to provider p.
  - **Shared-cost peering:** domains x and y agree to exchange data by using a direct link through an interconnection point.

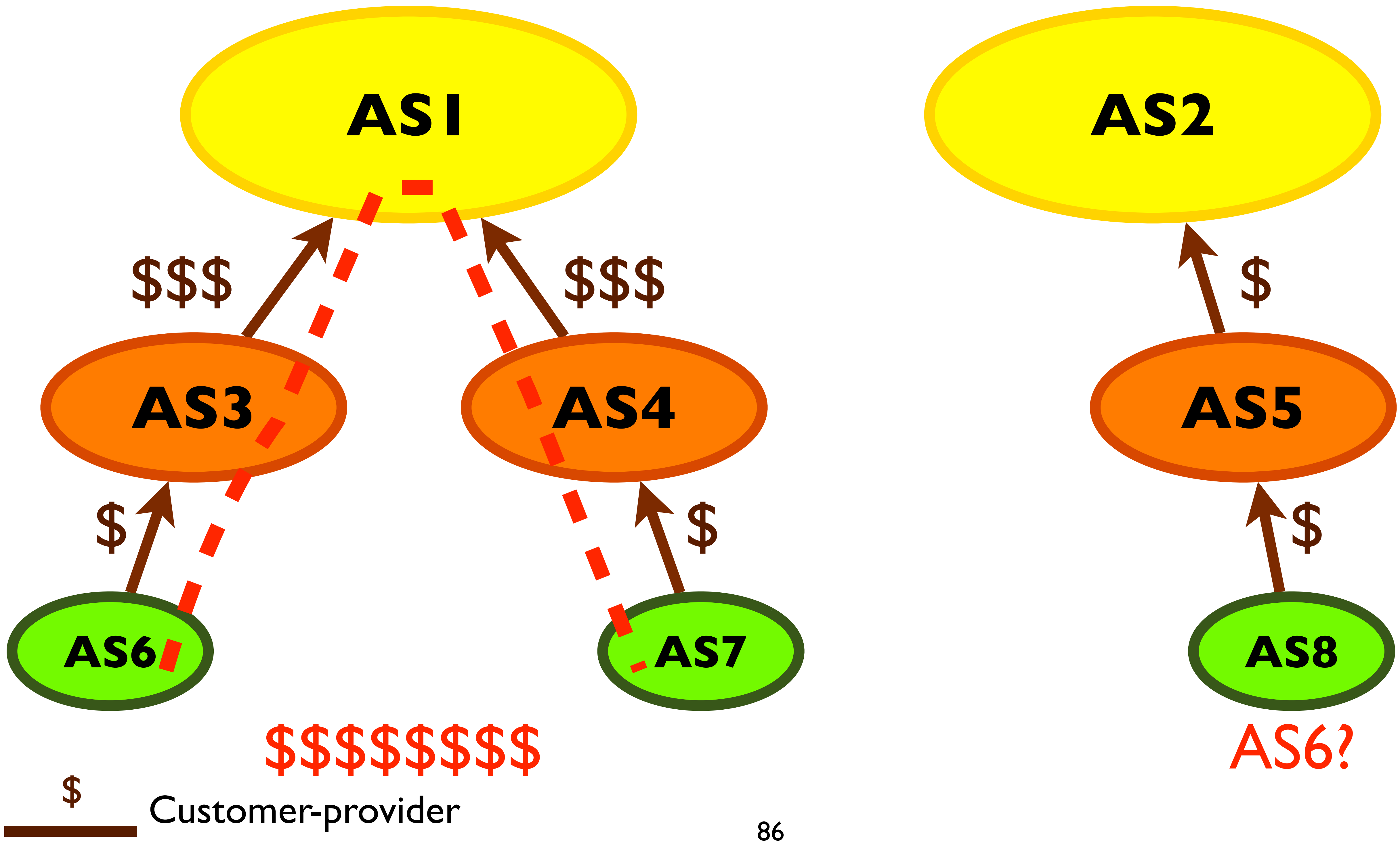
Customer-provider peering



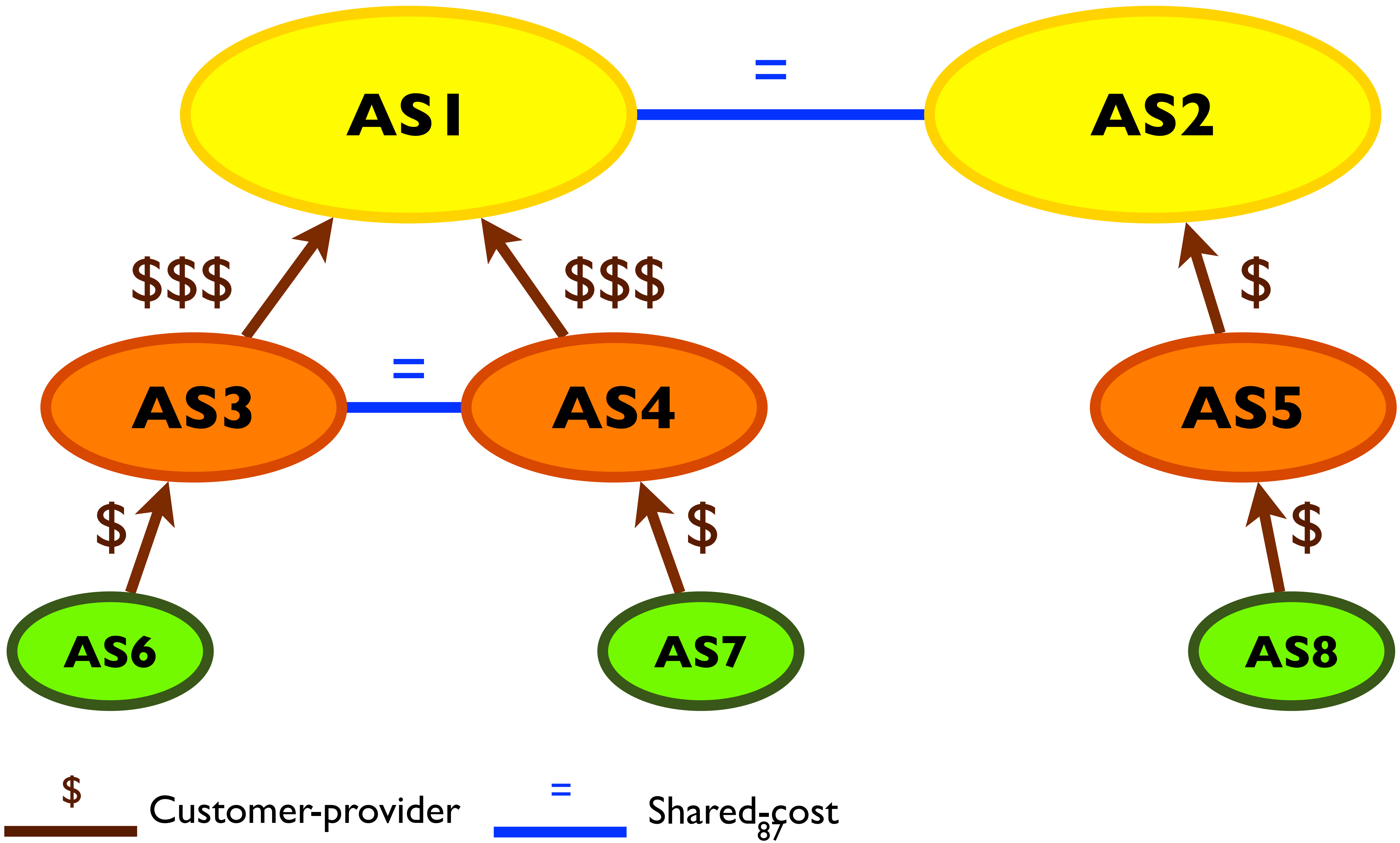
Customer-provider peering



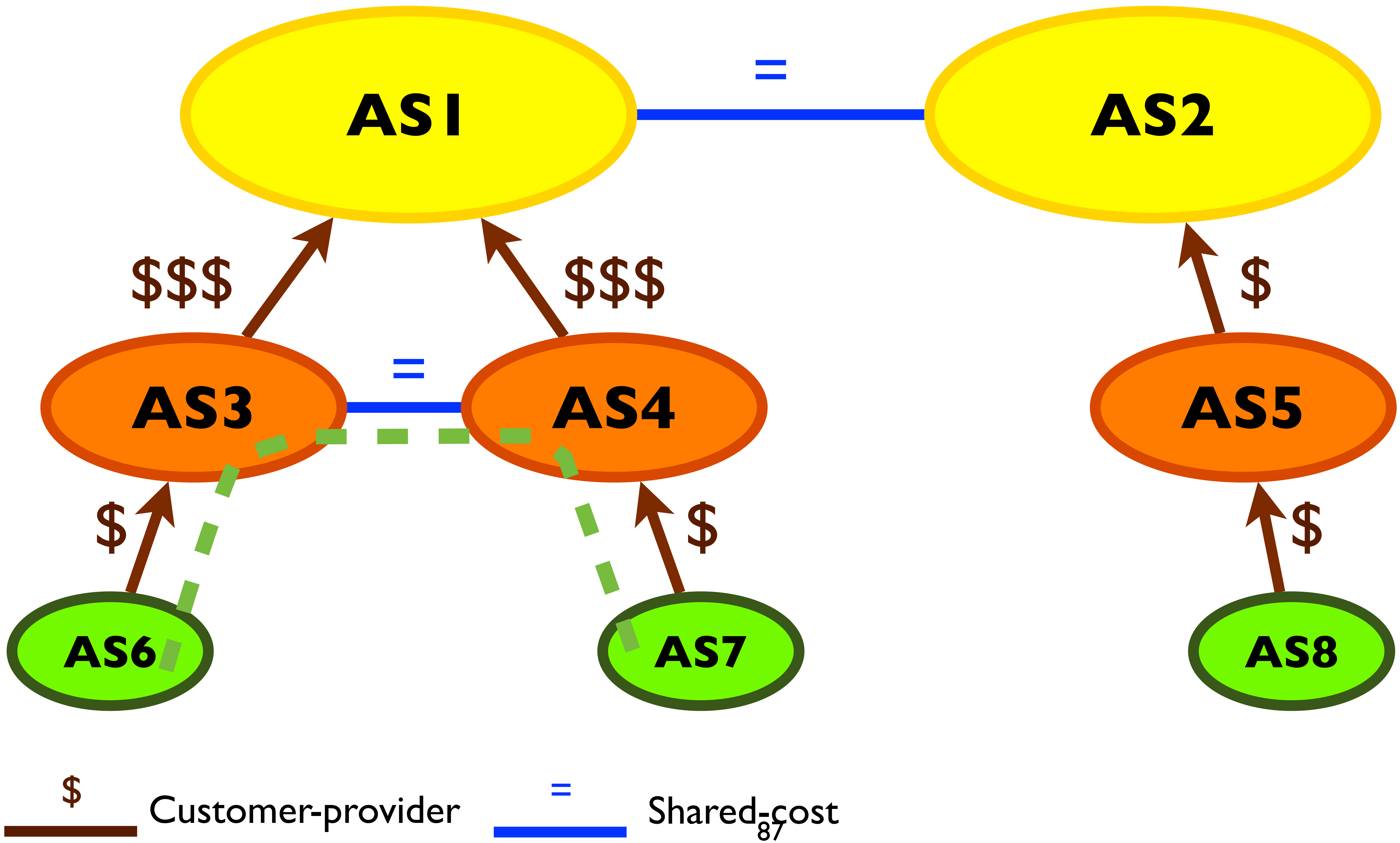
Customer-provider peering



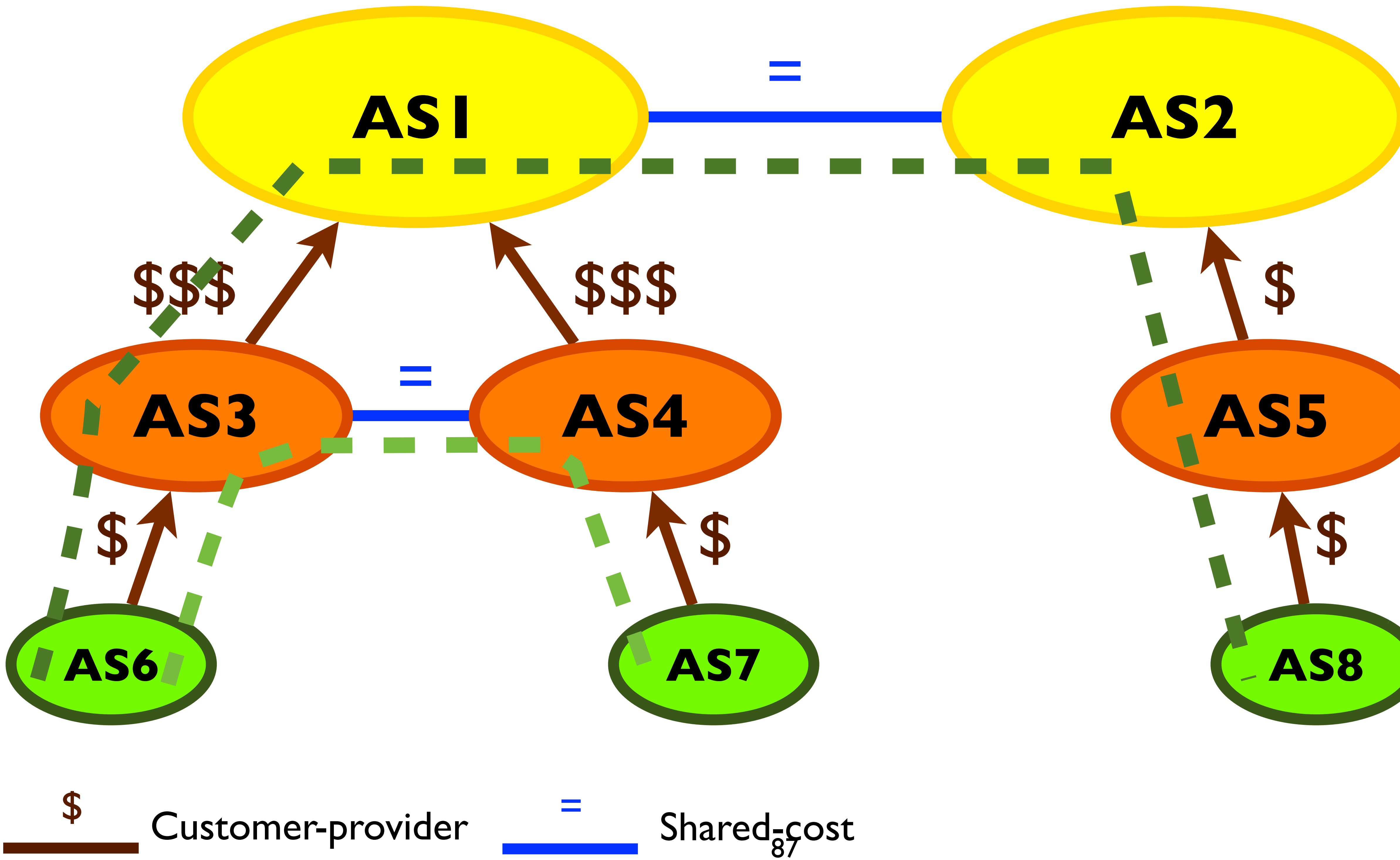
Shared-cost peering



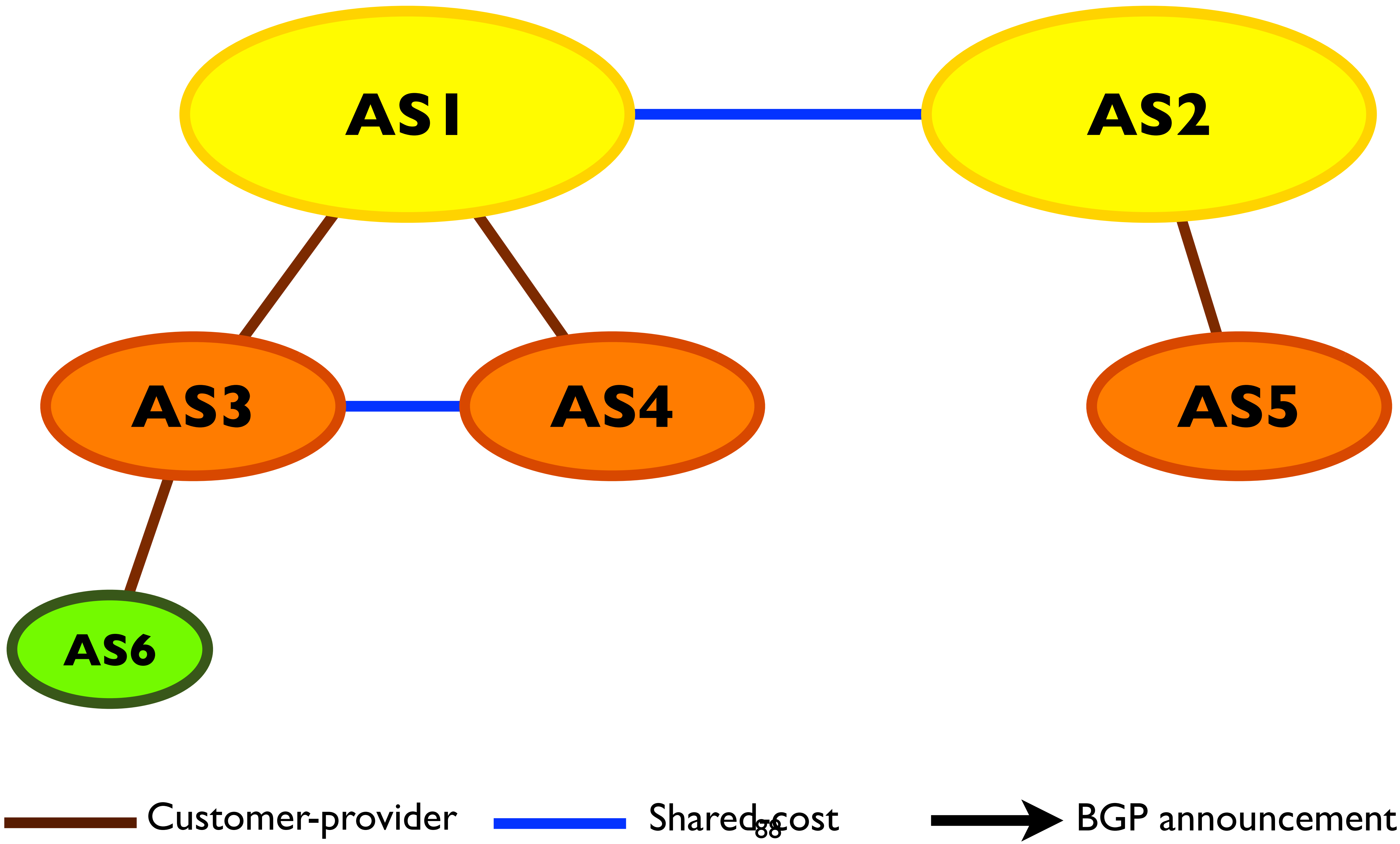
Shared-cost peering



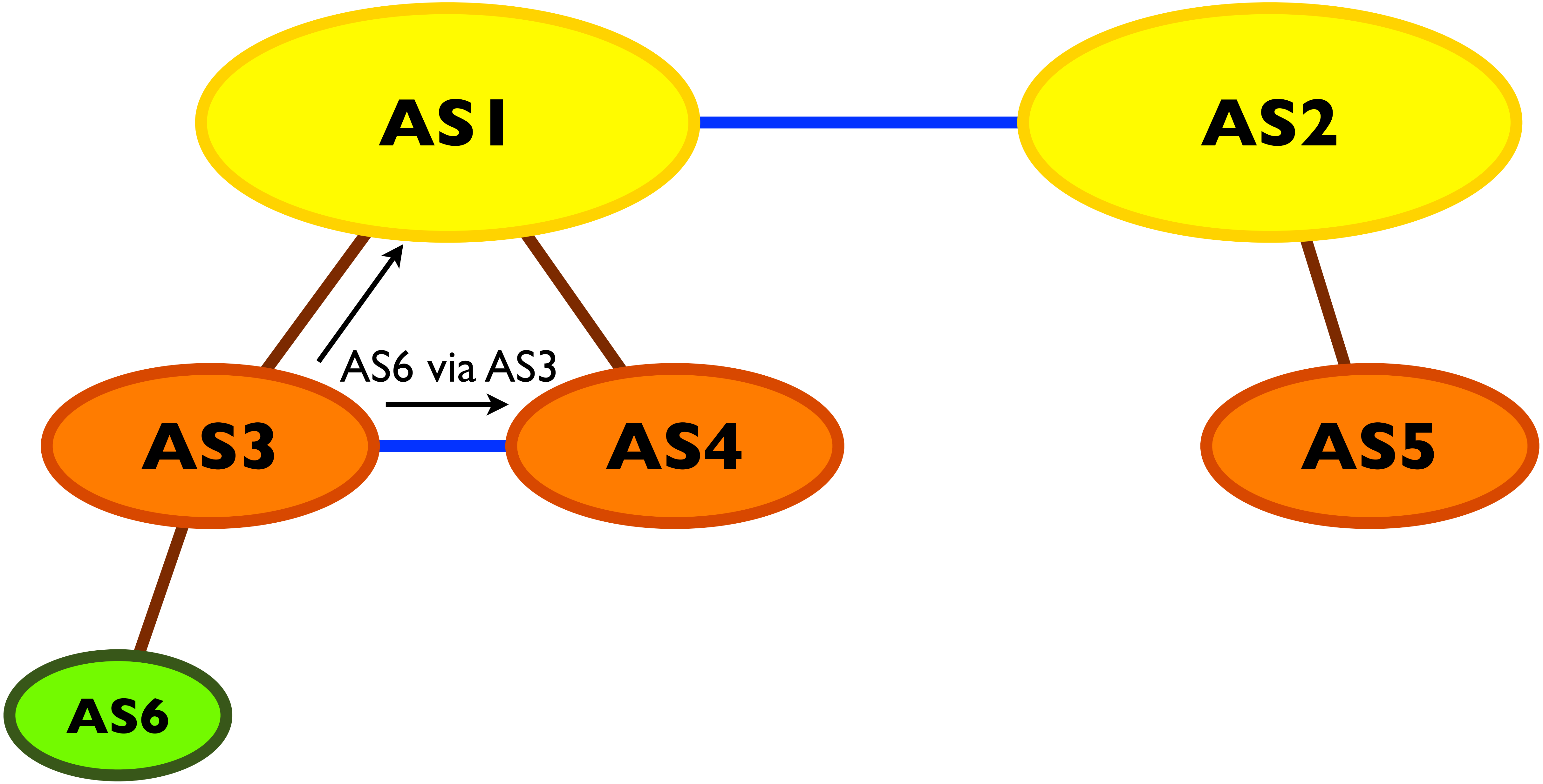
Shared-cost peering



How are routes discovered?

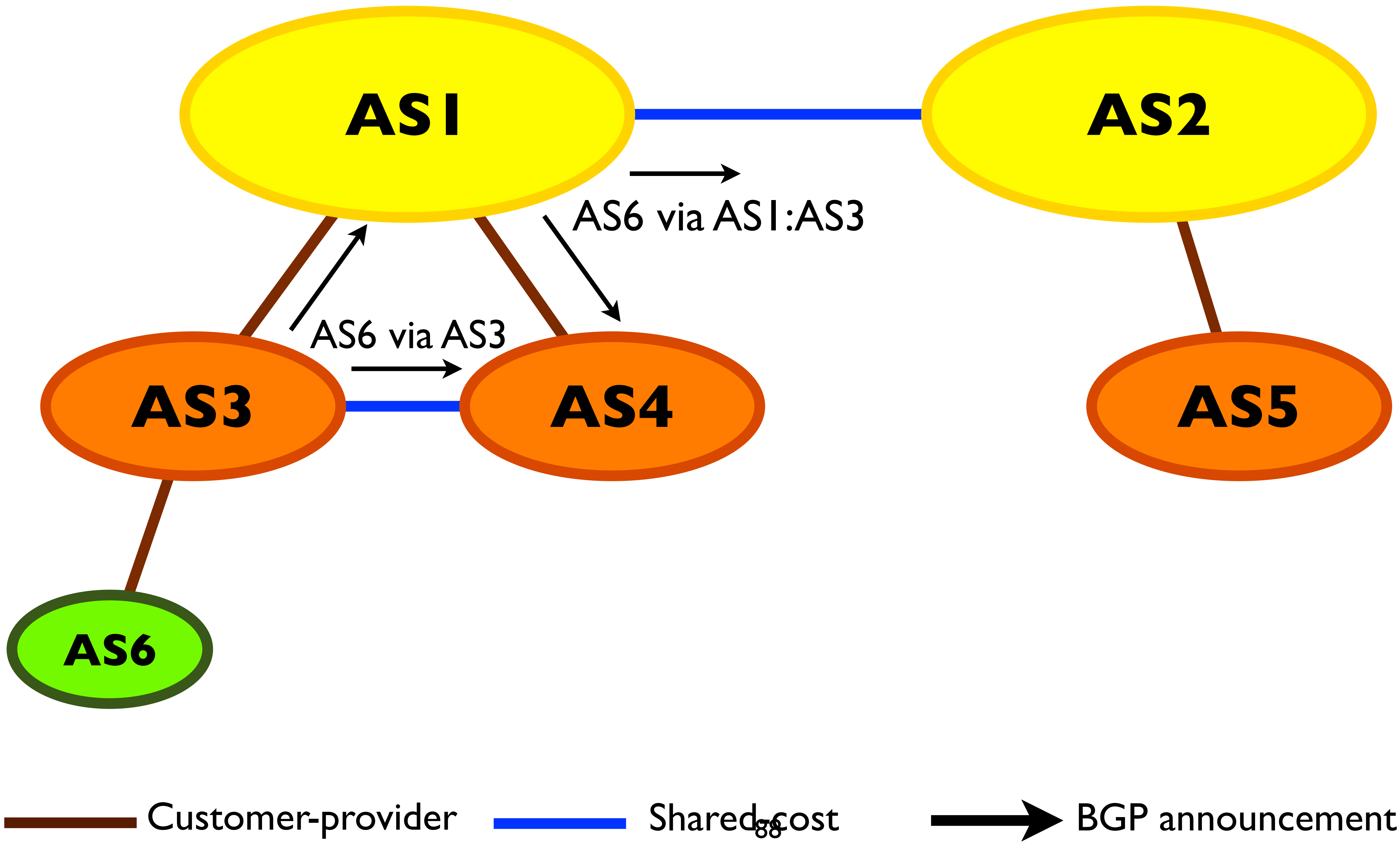


How are routes discovered?

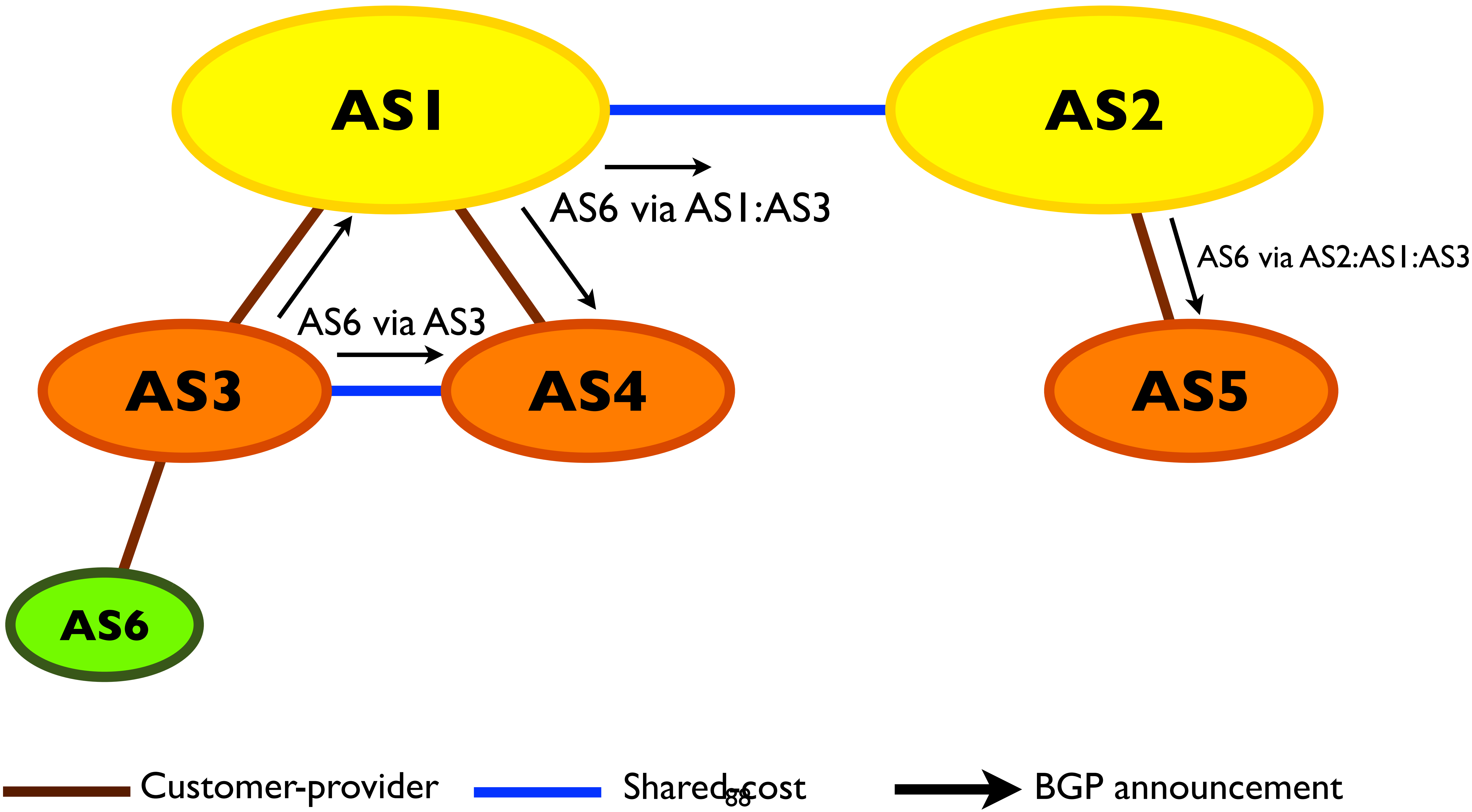


Customer-provider   Shared cost   BGP announcement

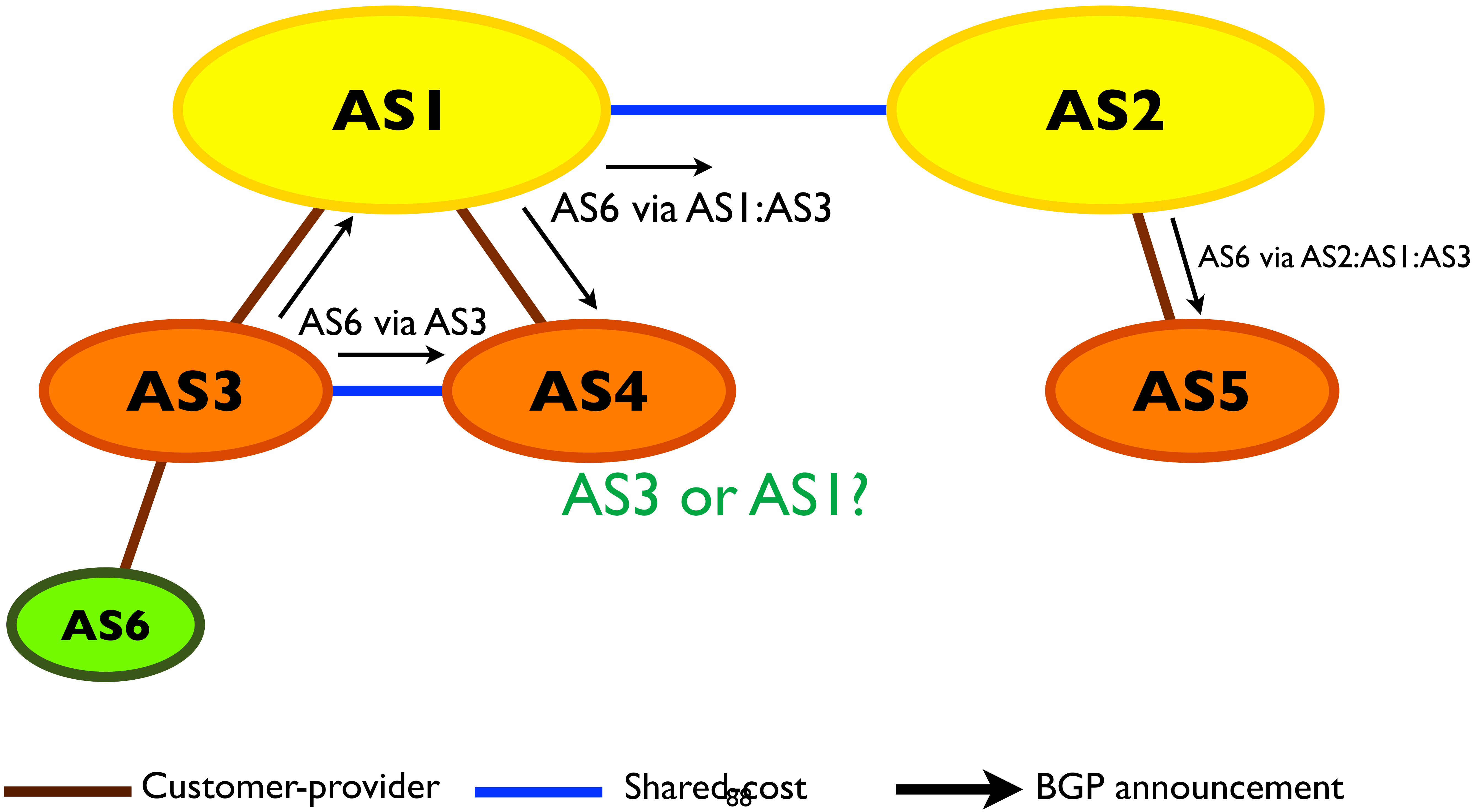
How are routes discovered?



How are routes discovered?



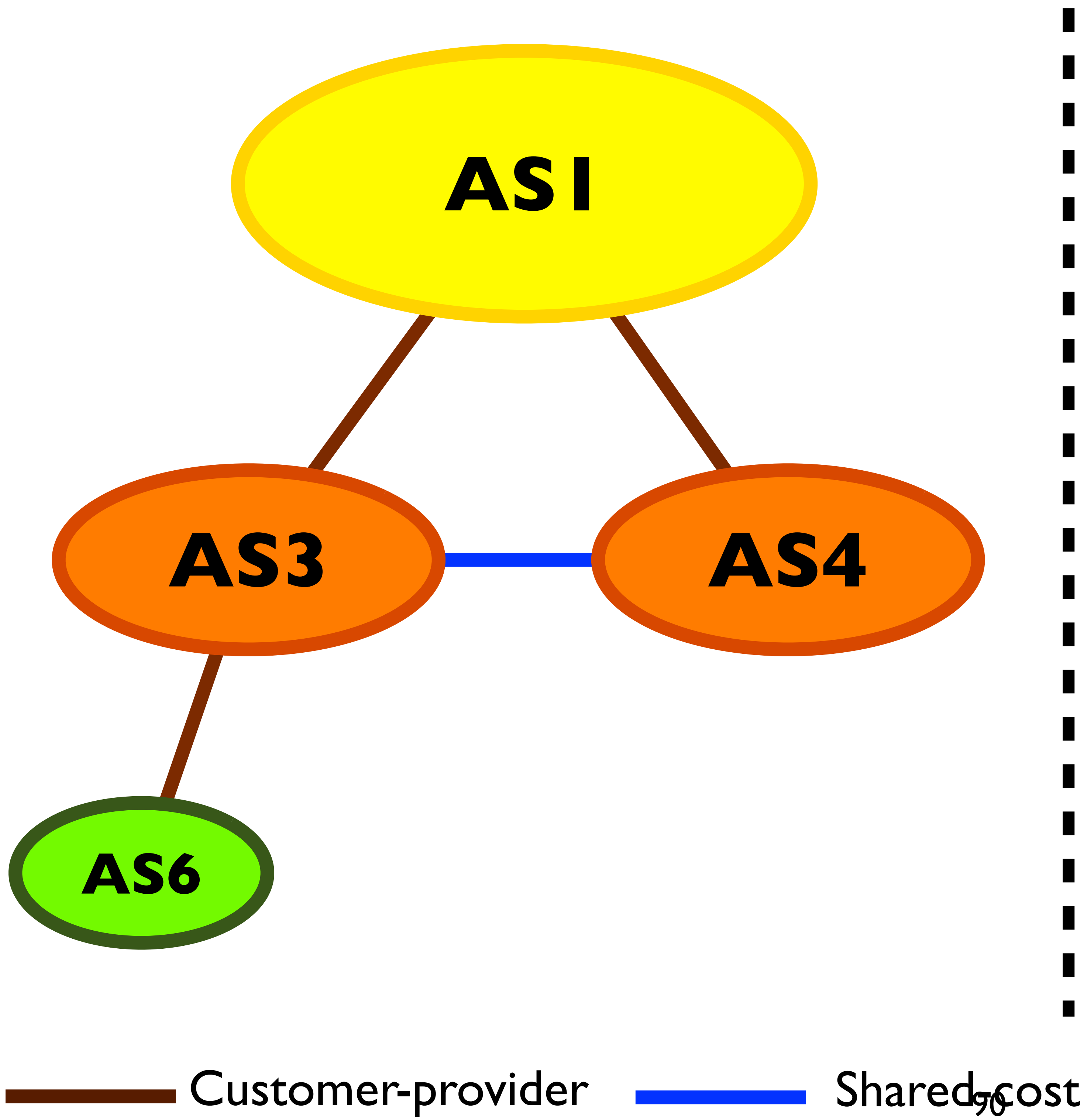
How are routes discovered?



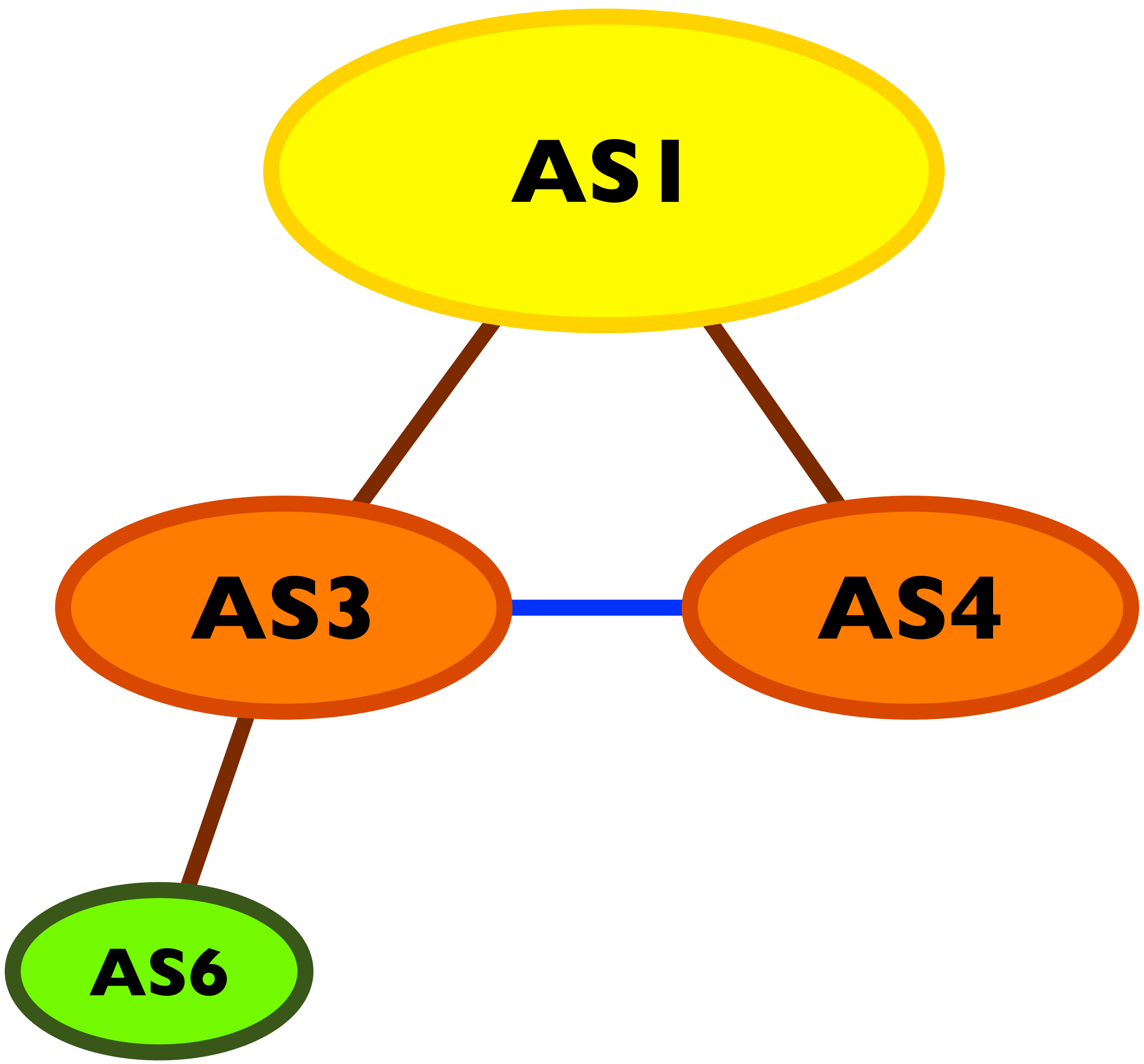
Simplified BGP decision process

1. Select routes with the highest local-pref
   - Manual configuration
2. If there are several routes, chose routes with the shortest AS path
   - Mostly determined by the topology
   - Can be influenced by using pre-pending
3. If there are still routes tie-breaking rule

Route control with BGP



Route control with BGP



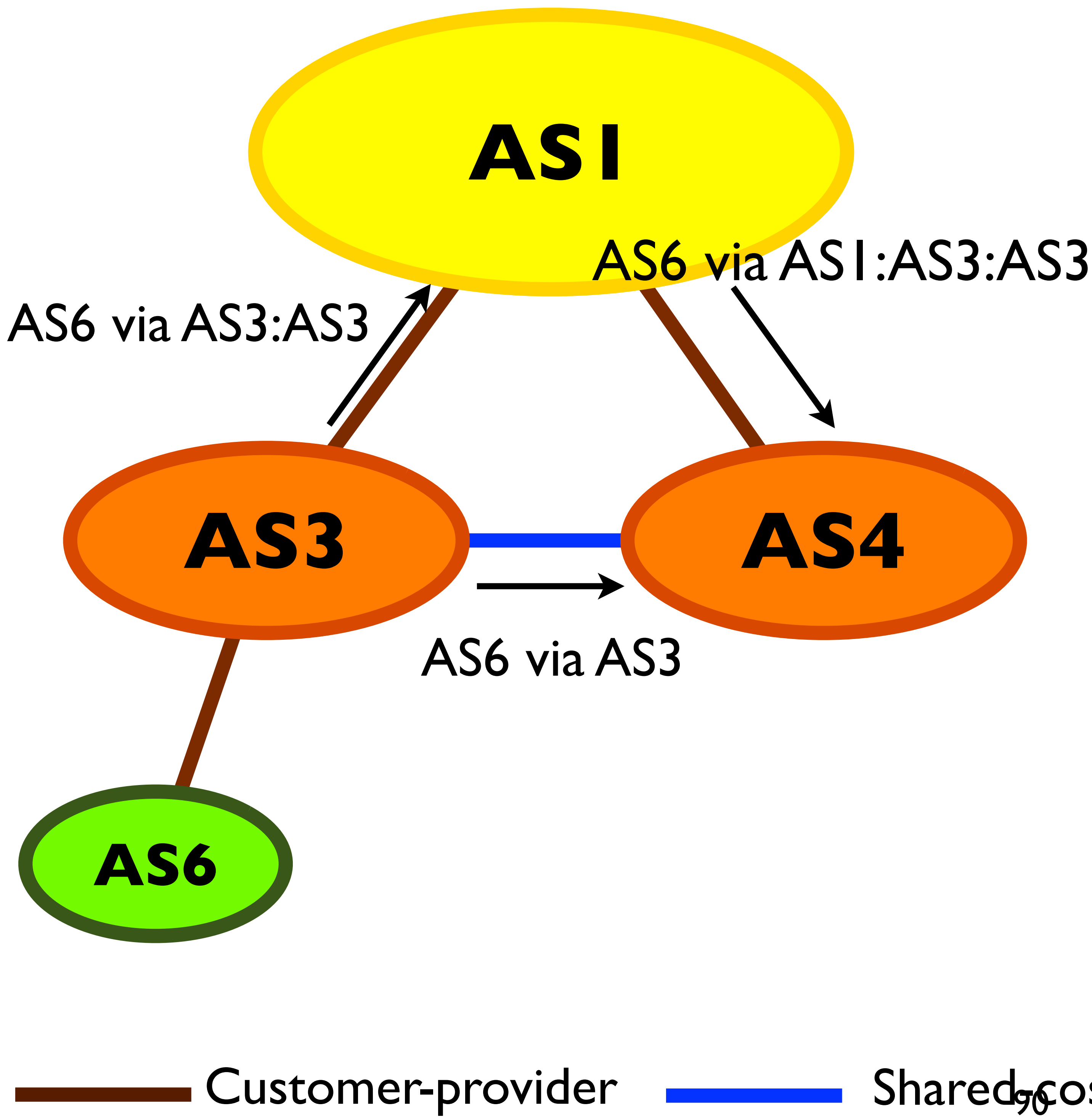
Policy for AS3:

Export:

To AS1 set as-path prepend AS3

Customer-provider   Shared cost   BGP announcement

Route control with BGP

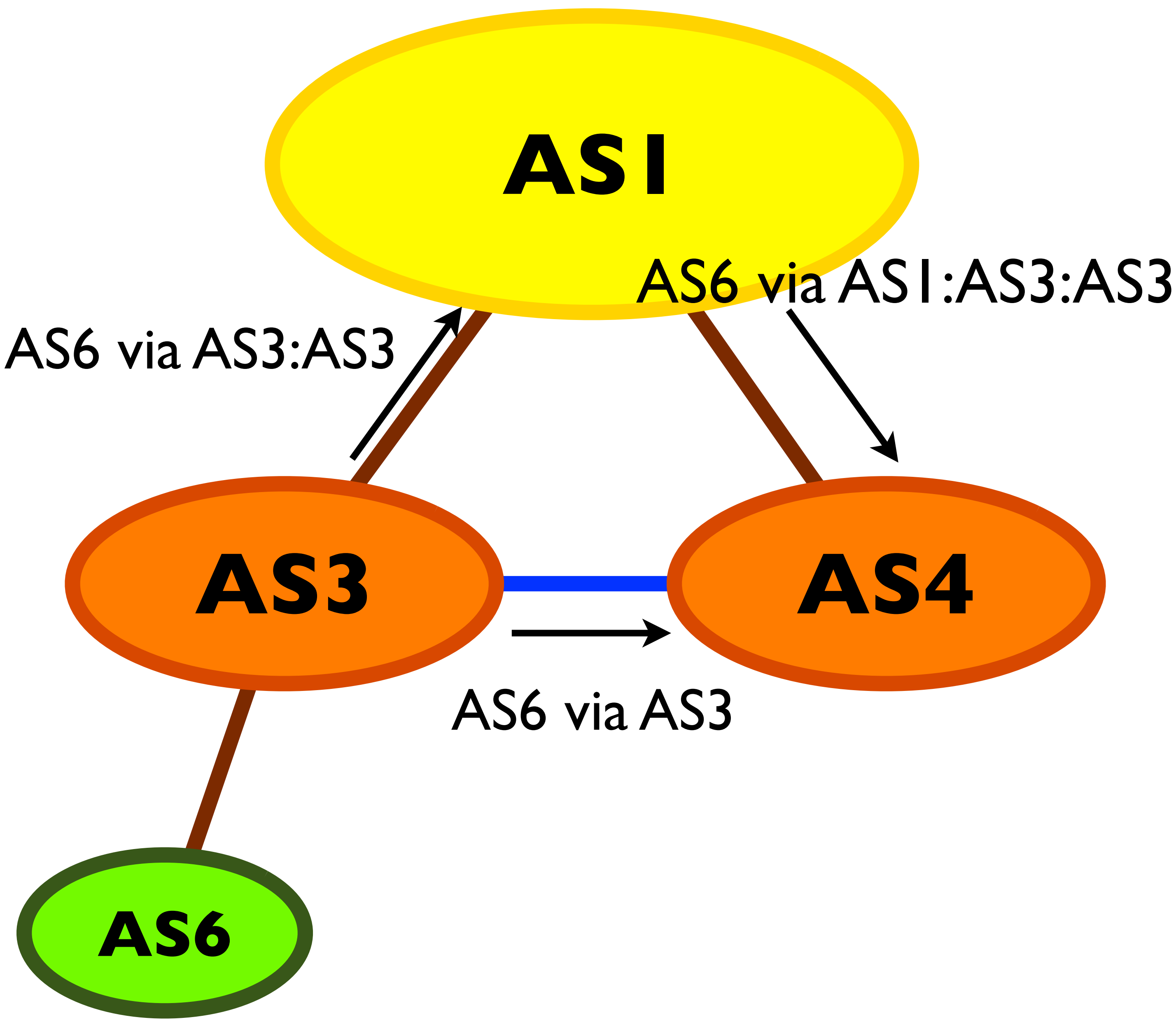


Policy for AS3:

Export:

To AS1 set as-path prepend AS3

Route control with BGP



Policy for AS3:

Export:

To AS1 set as-path prepend AS3

Policy for AS4:

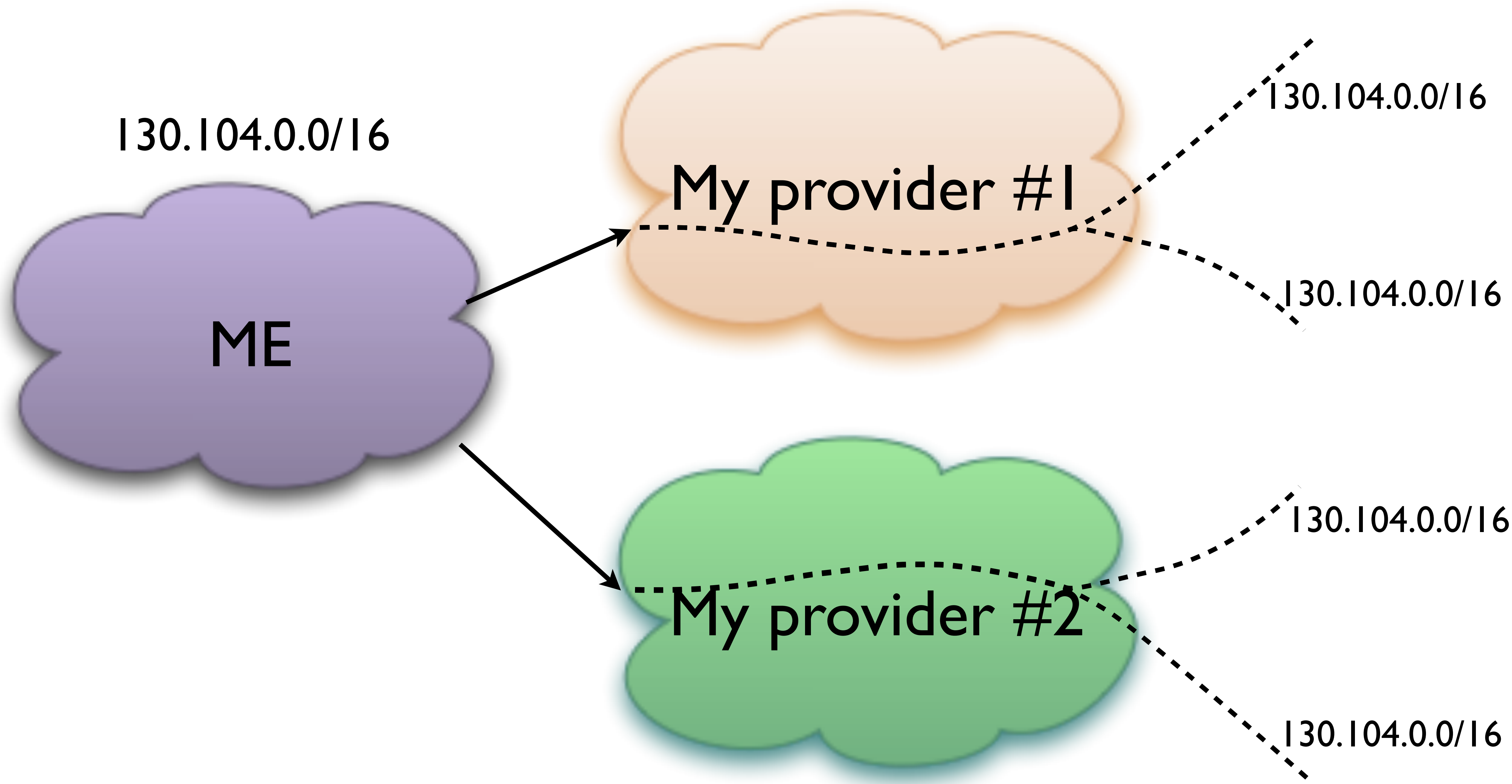
Import:

From AS3 set localpref=2000

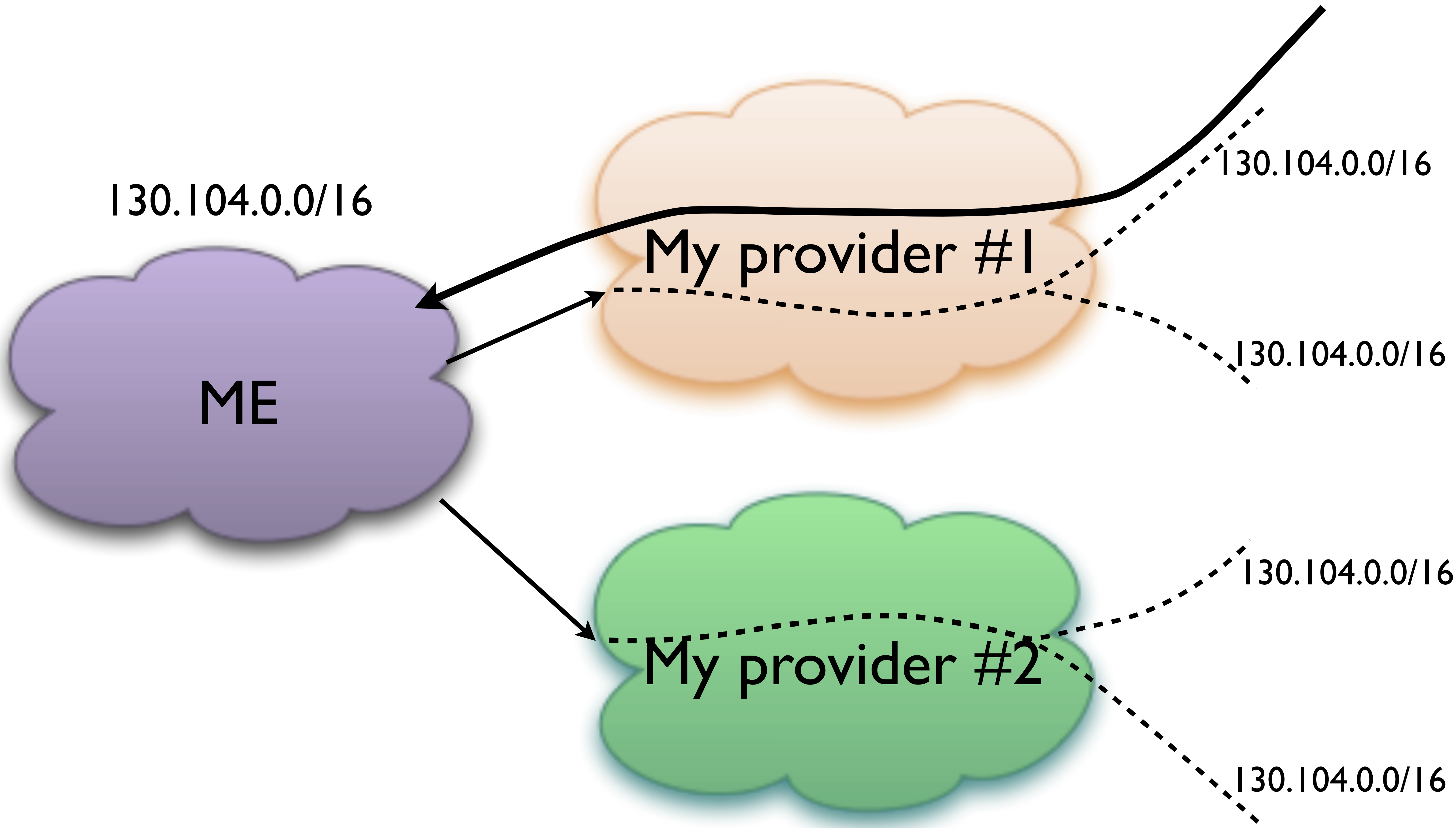
From AS1 set localpref=100

Customer-provider Shared cost BGP announcement

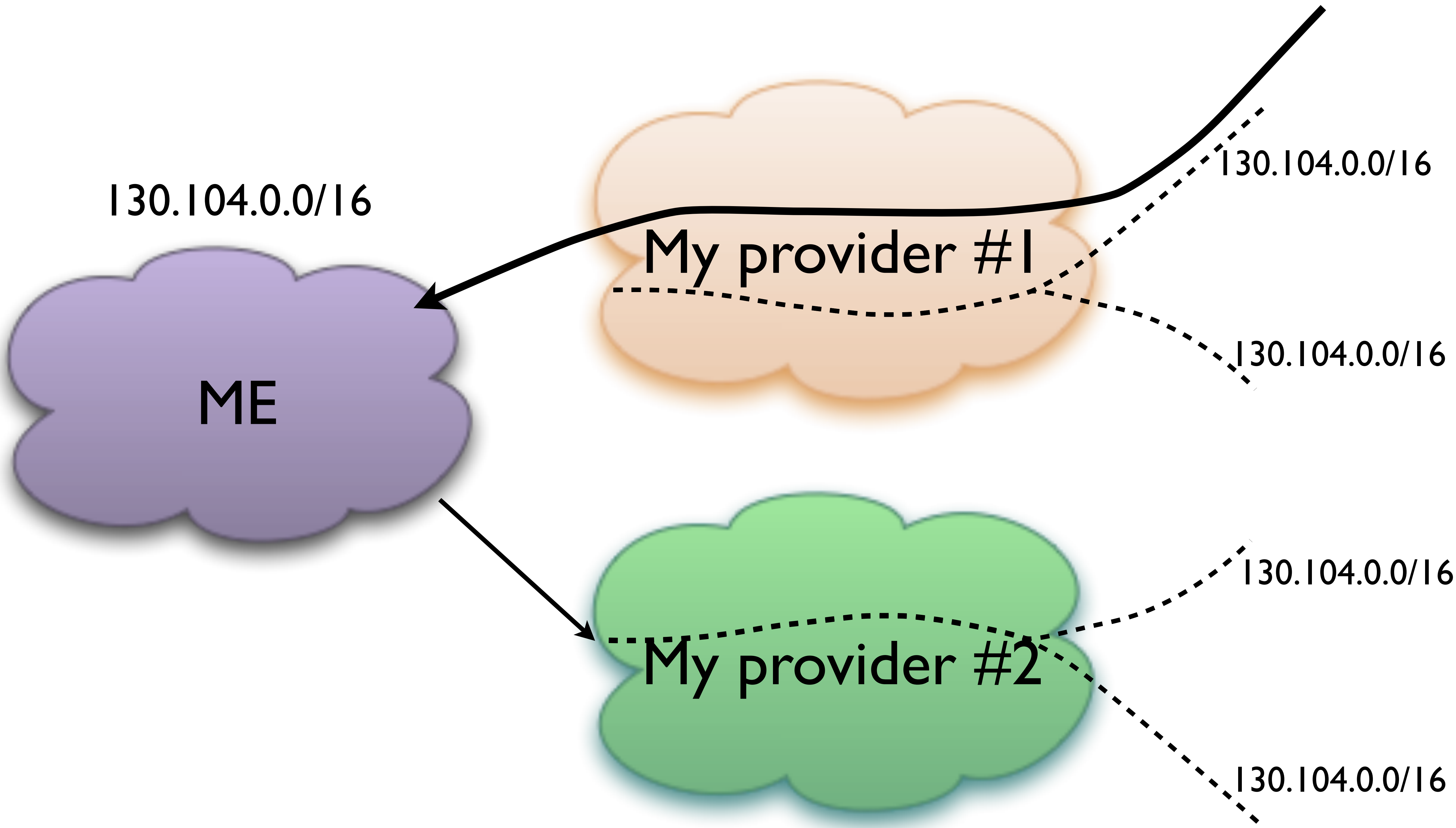
Multihoming



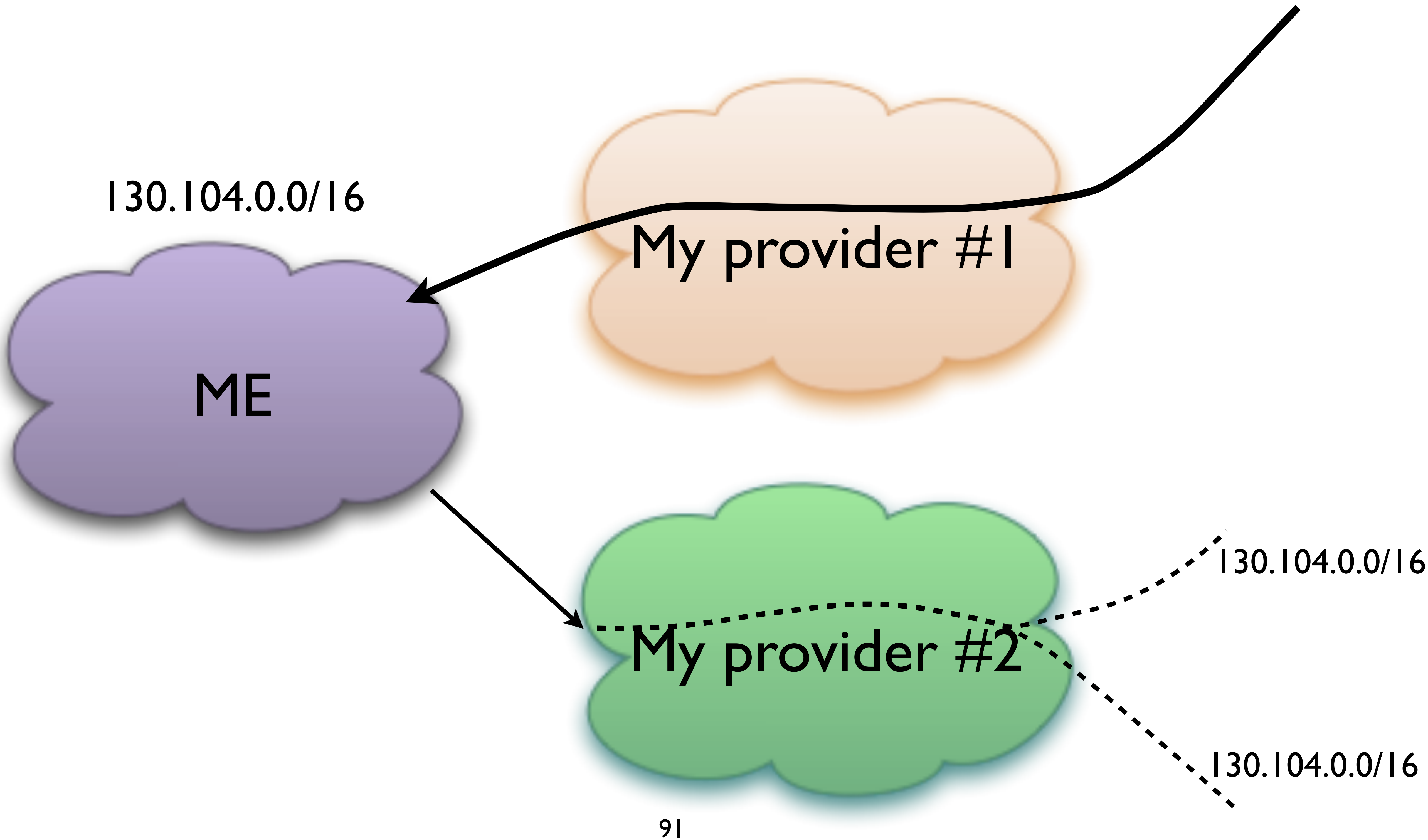
Multihoming



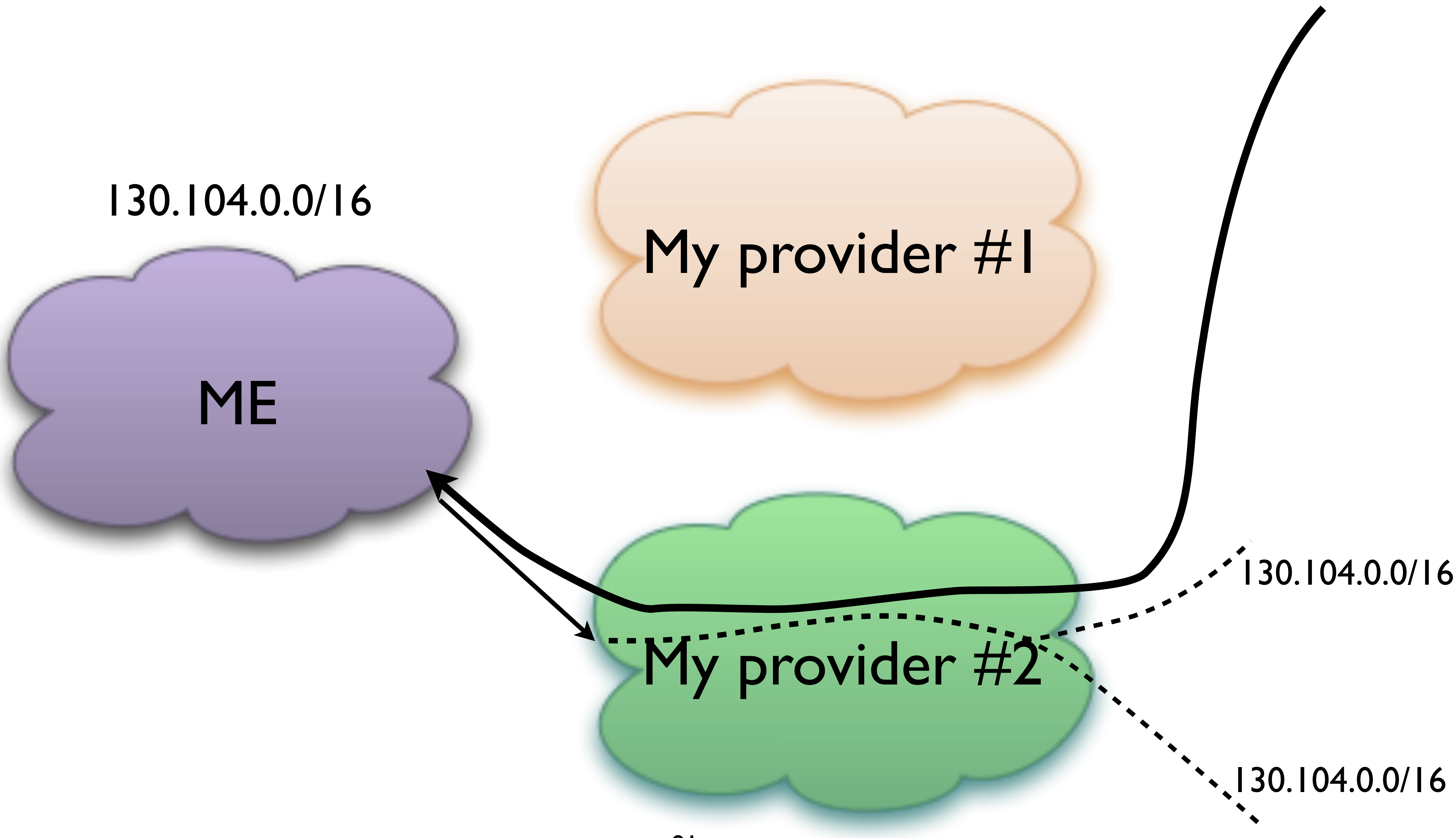
Multihoming



Multihoming



Multihoming



LISP Data-plane

Data-plane packets

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                    Source Routing Locator                     |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                 Destination Routing Locator                   |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
   UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   L   |N|L|E|  rflags |                 Nonce                         |
   I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   S / |                    Locator Status Bits                        |
   P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                           Source EID                          |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                         Destination EID                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Locator part

Presentation

Control Flags

Identifier Part

Payload

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
          0                   1                   2                   3
          0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
         +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
      /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
     |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
     |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |   |                    Source Routing Locator                     |
      \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       \ |                 Destination Routing Locator                   |
         +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
     UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
         +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     L   |N|L|E|  rflags |                 Nonce                         |
     I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     S / |                     Locator Status Bits                       |
     P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
      /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
     |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
     |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |   |                           Source EID                          |
      \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       \ |                         Destination EID                       |
         +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

Source/Destination Locators

```
         0                   1                   2                   3
         0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
     /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |                    Source Routing Locator                     |
     \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |                 Destination Routing Locator                   |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
    UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    L   |N|L|E|  rflags |                 Nonce                         |
    I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    S / |                     Locator Status Bits                       |
    P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
     /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |                           Source EID                          |
     \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |                         Destination EID                       |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

Source/Destination Locators

Random Source Port

```
         0                   1                   2                   3
         0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
     /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |                    Source Routing Locator                     |
     \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |                 Destination Routing Locator                   |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
    UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    L   |N|L|E|  rflags |                  Nonce                        |
    I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    S / |                     Locator Status Bits                       |
    P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
     /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
    |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |   |                           Source EID                          |
     \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      \ |                         Destination EID                       |
        +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
      0                   1                   2                   3
      0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
  /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |                    Source Routing Locator                     |
  \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |                 Destination Routing Locator                   |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
 UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 L   |N|L|E|  rflags |                  Nonce                        |
 I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 S / |                     Locator Status Bits                       |
 P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
  /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |                           Source EID                          |
  \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |                         Destination EID                       |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Source/Destination Locators

Random Source Port

Fixed Destination port

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

Source/Destination Locators

Random Source Port

Fixed Destination port

Encap data integrity check

```
           0                   1                   2                   3
           0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
          +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
       /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
      |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
      |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |   |                    Source Routing Locator                     |
       \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        \ |                 Destination Routing Locator                   |
          +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
      UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
          +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      L   |N|L|E|  rflags |                  Nonce                        |
      I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      S / |                     Locator Status Bits                       |
      P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
       /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
      |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
      |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |   |                           Source EID                          |
       \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
        \ |                         Destination EID                       |
          +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
                     0                   1                   2                   3
                     0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
                    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
                 /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
                |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
                |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                |   |                    Source Routing Locator                     |
                 \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  \ |                 Destination Routing Locator                   |
                    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
                UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
                    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                L   |N|L|E|  rflags |                  Nonce                        |
                I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                S / |                       Locator Status Bits                     |
                P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
                 /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
                |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
                |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                |   |                           Source EID                          |
                 \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
                  \ |                         Destination EID                       |
                    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Source/Destination Locators

Random Source Port

N: Nonce present bit
L: Locator Status Bits present bit
E: Echo-Nonce request bit

Fixed Destination port

Encap data integrity check

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                    Source Routing Locator                     |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                 Destination Routing Locator                   |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
   UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   L   |N|L|E|   rflags  |                  Nonce                      |
   I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   S / |                     Locator Status Bits                       |
   P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                           Source EID                          |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                         Destination EID                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Source/Destination Locators

Random Source Port

N: Nonce present bit
L: Locator Status Bits present bit
E: Echo-Nonce request bit

Fixed Destination port

Encap data integrity check

Packet unique identifier

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
      0                   1                   2                   3
      0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
  /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |                    Source Routing Locator                     |
  \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |                 Destination Routing Locator                   |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
 UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 L   |N|L|E|   rflags  |                 Nonce                       |
 I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 S / |                    Locator Status Bits                        |
 P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
  /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |                           Source EID                          |
  \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |                         Destination EID                       |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Source/Destination Locators

Random Source Port

N: Nonce present bit
L: Locator Status Bits present bit
E: Echo-Nonce request bit

Fixed Destination port

Encap data integrity check

Packet unique identifier

Source locator reachability

Header details

(IP(UDP(LISP(IP))))

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   OH  |  Time to Live | Protocol = 17 |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                    Source Routing Locator                     |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                 Destination Routing Locator                   |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4341        |
   UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   L   |N|L|E|   rflags  |                 Nonce                       |
   I \ +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   S / |                     Locator Status Bits                       |
   P   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |Version|  IHL  |Type of Service|          Total Length         |
    /  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |         Identification        |Flags|      Fragment Offset    |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   IH  |  Time to Live |    Protocol   |         Header Checksum       |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                           Source EID                          |
    \  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                         Destination EID                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Source/Destination Locators

Random Source Port

N: Nonce present bit
L: Locator Status Bits present bit
E: Echo-Nonce request bit

Fixed Destination port

Encap data integrity check

Packet unique identifier

Source locator reachability

Source/Destination Identifiers

Src/Dst Locators

- Source locator: IP address of the ITR that performed the encapsulation
- Destination locator: IP address of one ETR responsible for the destination EID's prefix
- Locators can be in IPv4 or IPv6

Src/Dst EID

- Source EID: IP address of the source end-host
- Destination EID: IP address of destination end-hosts
- EIDs can be in IPv4 or IPv6
- AFI(RLOC) can be different AFI(EID)
    - LISP can be an IPv4/IPv6 transition mechanism (but does not support XAFI)

LISP is over UDP

- UDP to traverse firewalls/NAT, limit the impact of ECMP hashing on reordering...
- Source port is random
  - but per-flow source port is recommended
- Destination port is fixed to 4341
- Checksum is important if IPv6 RLOCs

LISP Control-plane

LISP Mapping messages

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                       IPv4 or IPv6 Header                     |
       |                      (uses RLOC addresses)                    |
       |                                                               |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |       Source Port = xxxx      |       Dest Port = 4342        |
   UDP +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |           UDP Length          |        UDP Checksum           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   LCM |                      LISP Control Message                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

- Map-Request
  - request for a mapping
- Map-Reply
  - provides the mapping requested by a Map-Request
- Map-Register
  - an ETR informs the mapping system that it is responsible for an EID prefix
    - provides the RLOCs where the mapping can be found

Map-Request

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=1 |0|M|P|S|            Reserved             | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Source EID Address  ...                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                Originating ITR RLOC Address ...               |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
   Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                       EID-prefix  ...                         |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Map-Reply Record  ...                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Map-Request

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=1 |0|M|P|S|            Reserved             | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Source EID Address  ...                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                Originating ITR RLOC Address ...               |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
   Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                      EID-prefix  ...                          |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Map-Reply Record  ...                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Map-Request

```
     0                   1                   2                   3
     0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |Type=1 |0|M|P|S|          Reserved               | Record Count  |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                         Nonce . . .                           |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                         . . . Nonce                           |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                   Source EID Address  ...                     |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                Originating ITR RLOC Address ...               |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  \ |                       EID-prefix  ...                         |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                   Map-Reply Record  ...                       |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                     Mapping Protocol Data                     |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Number of records in the request

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Map-Request

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=1 |0|M|P|S|            Reserved             | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Source EID Address  ...                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                Originating ITR RLOC Address ...               |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
   Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     \ |                       EID-prefix  ...                         |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                   Map-Reply Record  ...                       |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Number of records in the request

64-bits Nonce, uniquely identifying the request

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Map-Request

```
 0                   1                   2                   3
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|Type=1 |0|M|P|S|            Reserved            | Record Count  |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                         Nonce . . .                           |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                         . . . Nonce                           |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                   Source EID Address  ...                     |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                Originating ITR RLOC Address ...               |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
 Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   \ |                       EID-prefix  ...                         |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                   Map-Reply Record  ...                       |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                     Mapping Protocol Data                     |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Number of records in the request

64-bits Nonce, uniquely identifying the request

EID of the source that generated the miss

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Map-Request

```
 0                   1                   2                   3
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|Type=1 |0|M|P|S|          Reserved               | Record Count  |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                         Nonce . . .                           |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                         . . . Nonce                           |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                   Source EID Address  ...                     |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                Originating ITR RLOC Address ...               |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 / |    Reserved   | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 \ |                       EID-prefix  ...                         |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                   Map-Reply Record  ...                       |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|                     Mapping Protocol Data                     |
+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Number of records in the request

64-bits Nonce, uniquely identifying the request

EID of the source that generated the miss

RLOC of the ITR to reply to

Map-Request

```
    0                   1                   2                   3
    0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |Type=1 |0|M|P|S|            Reserved           | Record Count  |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                         Nonce . . .                           |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                         . . . Nonce                           |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |         Source-EID-AFI        |            ITR-AFI            |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                   Source EID Address  ...                     |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                Originating ITR RLOC Address ...               |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 / |   Reserved    | EID mask-len  |        EID-prefix-AFI         |
Rec +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 \ |                       EID-prefix  ...                         |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                   Map-Reply Record  ...                       |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                     Mapping Protocol Data                     |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

M: Map-Reply
P: probing bit
S: Solicitation bit

Number of records in the request

64-bits Nonce, uniquely identifying the request

EID of the source that generated the miss

RLOC of the ITR to reply to

EID prefix to retrieve a mapping for

Map-Reply

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=2 |P|E|            Reserved                | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                          Record  TTL                          |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
   e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
   o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   r   |                          EID-prefix                           |
   d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
   | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   | o |        Unused Flags     |R|         Loc-AFI                   |
   | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  \|                             Locator                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Map-Reply

```
       0                   1                   2                   3
       0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
      +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
      +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |                         Nonce . . .                           |
      +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |                         . . . Nonce                           |
  +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  |   |                          Record  TTL                          |
  |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
  e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
  o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  r   |                          EID-prefix                           |
  d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
  | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  | o |           Unused Flags      |R|           Loc-AFI             |
  | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
  |  \|                            Locator                            |
  +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
      |                     Mapping Protocol Data                     |
      +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Map-Reply

Number of records in the request

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                          Record  TTL                          |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
   e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
   o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   r   |                          EID-prefix                           |
   d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
   | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   | o |        Unused Flags     |R|         Loc-AFI                   |
   | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  \|                             Locator                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Map-Reply

Number of records in the request

```
    0                   1                   2                   3
    0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |Type=2 |P|E|            Reserved                | Record Count  |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                         Nonce . . .                           |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                         . . . Nonce                           |
+-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|  |                          Record  TTL                          |
|  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
R  | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
e  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
c  |           Reserved            |            EID-AFI            |
o  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
r  |                          EID-prefix                           |
d  +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
| L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
| o |        Unused Flags     |R|           Loc-AFI                 |
| c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|  \|                             Locator                           |
+-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |                     Mapping Protocol Data                     |
   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Copied from the Map-Request

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Map-Reply

Number of records in the request

Copied from the Map-Request

Lifetime of the record in min

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                          Record  TTL                          |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
   e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
   o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   r   |                          EID-prefix                           |
   d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
   | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   | o |        Unused Flags         |R|           Loc-AFI             |
   | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  \|                            Locator                            |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Map-Reply

Number of records in the request

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                          Record  TTL                          |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|       Reserved        |
   e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
   o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   r   |                          EID-prefix                           |
   d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
   | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   | o |        Unused Flags     |R|         Loc-AFI                   |
   | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  \|                             Locator                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Copied from the Map-Request

Lifetime of the record in min

Authoritative bit

Map-Reply

Number of records in the request

```
     0                   1                   2                   3
     0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                         Nonce . . .                           |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                         . . . Nonce                           |
+-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|   |                          Record  TTL                          |
|   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
r   |                          EID-prefix                           |
d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
| L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
| o |        Unused Flags     |R|         Loc-AFI                   |
| c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
|  \|                            Locator                            |
+-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
    |                     Mapping Protocol Data                     |
    +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Copied from the Map-Request

Lifetime of the record in min

Authoritative bit

Negative reply action

Map-Reply

```
      0                   1                   2                   3
      0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |                         Nonce . . .                           |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |                         . . . Nonce                           |
 +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |   |                          Record  TTL                          |
 |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|       Reserved        |
 e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
 o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 r   |                          EID-prefix                           |
 d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
 | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 | o |        Unused Flags     |R|           Loc-AFI             |
 | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
 |  \|                             Locator                           |
 +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
     |                     Mapping Protocol Data                     |
     +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

Number of records in the request

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Copied from the Map-Request

Lifetime of the record in min

Authoritative bit

Negative reply action

Priority : RLOCs with lower priority are preferred. If several have same priority, load balance among them
Weight : percentage of traffic to this RLOC when load balancing is active.
(M for multicast)

Map-Reply

Number of records in the request

```
        0                   1                   2                   3
        0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |Type=2 |P|E|            Reserved               | Record Count  |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         Nonce . . .                           |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                         . . . Nonce                           |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |   |                          Record  TTL                          |
   |   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   R   | Locator Count | EID mask-len  | ACT |A|      Reserved         |
   e   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   c   |           Reserved            |            EID-AFI            |
   o   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   r   |                          EID-prefix                           |
   d   +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  /|    Priority   |    Weight     |  M Priority   |   M Weight    |
   | L +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   | o |        Unused Flags         |R|           Loc-AFI             |
   | c +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
   |  \|                            Locator                            |
   +-> +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
       |                     Mapping Protocol Data                     |
       +-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+
```

P: probing bit
E: Echo-nonce capable

Copied from the Map-Request

Lifetime of the record in min

Authoritative bit

Negative reply action

Priority : RLOCs with lower priority are preferred. If several have same priority, load balance among them
Weight : percentage of traffic to this RLOC when load balancing is active.
(M for multicast)

Is record is reachable from responder's viewpoint ?

NERD: A Not-so-novel EID to RLOC Database

NERD

- The only proposed push model
  - Composed of 4 parts
    - a network database format;
    - a change distribution format;
    - a database retrieval/bootstrapping method;
    - a change distribution method

- Principles
  - An authority computes the mapping database based on the stored registrations
  - The database signed by the authority is stored on servers
  - ITR poll regularly the database servers to update their own mapping database

LISP-DHT

LISP-DHT

- Distribute the storage of the mappings on a distributed hash table
- Storage: DHT
- Control plane
  - build over a modified chord ring
  - able to enforce the position where the mappings have to be stored (e.g., one's does not want to have its mappings stored by a competitor)

[DHT] LISP-DHT: Towards a DHT to map identifiers onto locators, Mathy and Iannone, Rearch, 2008

LISP-DHT

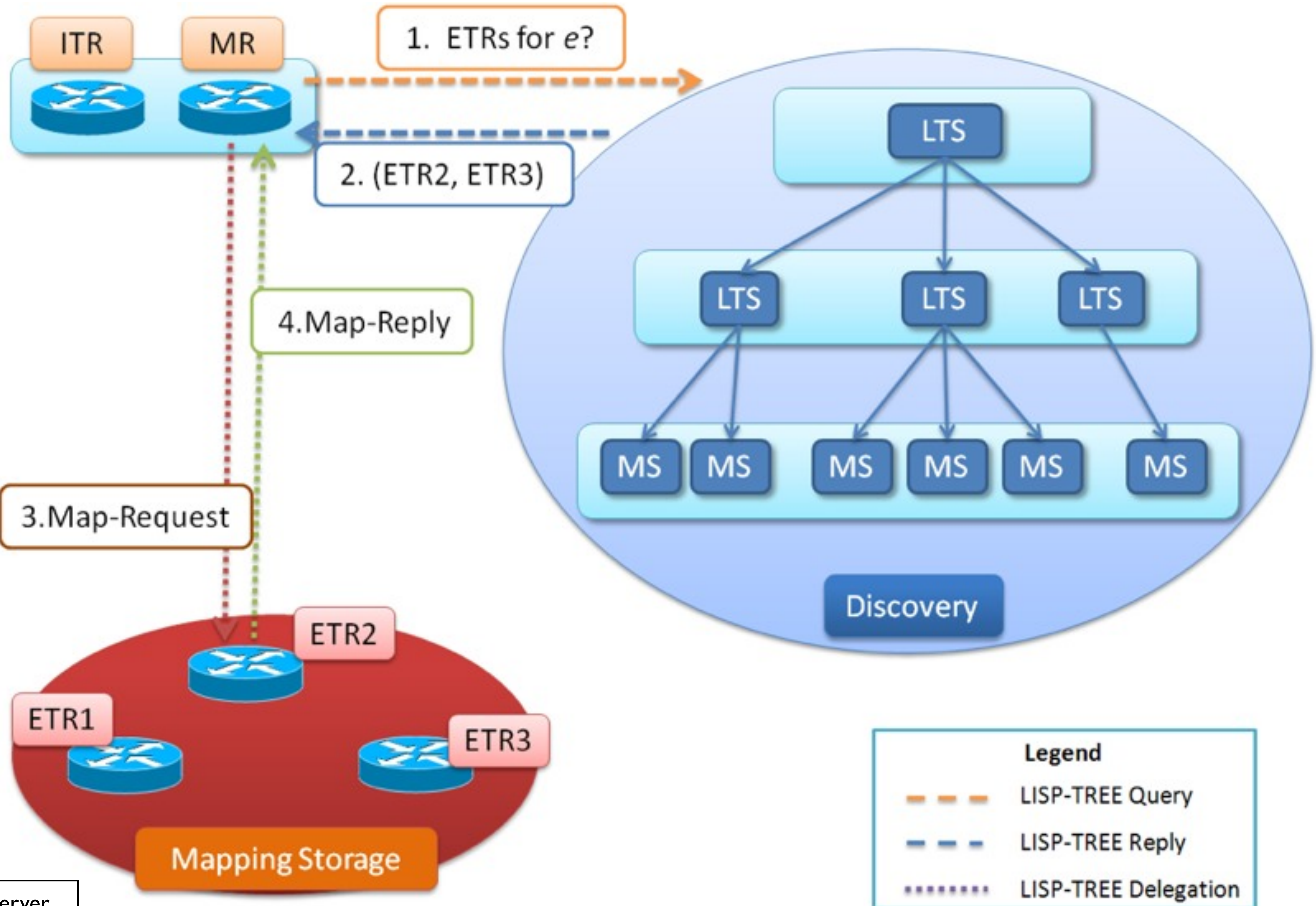
- Has been proved to provide bad behaviors in the Internet
  - hot-spots
  - low TE capabilities
  - no control on the path followed by the requests
- Still a good idea for other scenarios?

LISP-TREE

LISP-Tree

- DNS like approach
- Why a DNS-like mapping system?
  - Troubleshooting and fault tolerance
  - Scalability
  - Security
  - Impact of configuration errors
  - Experience

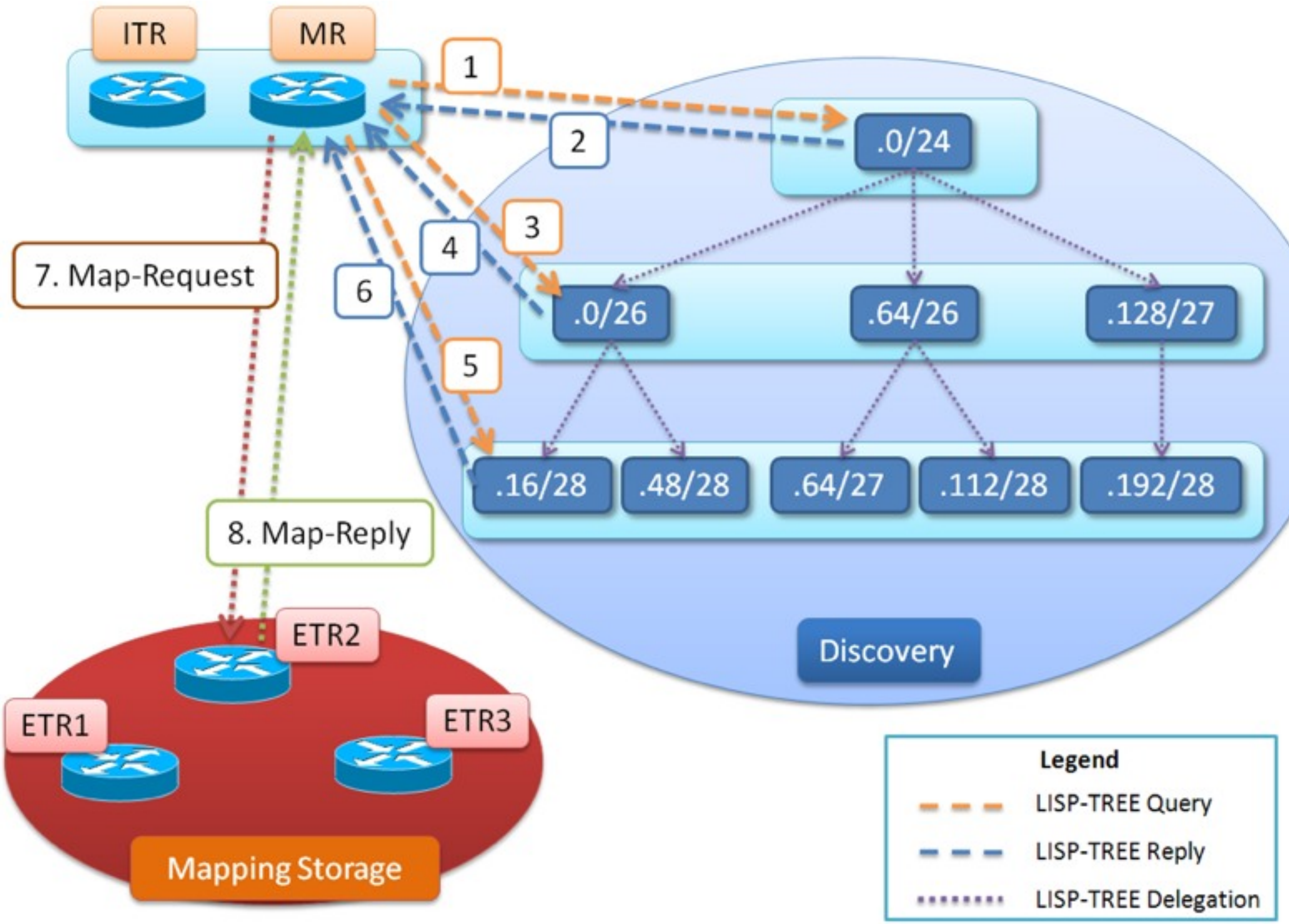
LISP-Tree in a nutshell



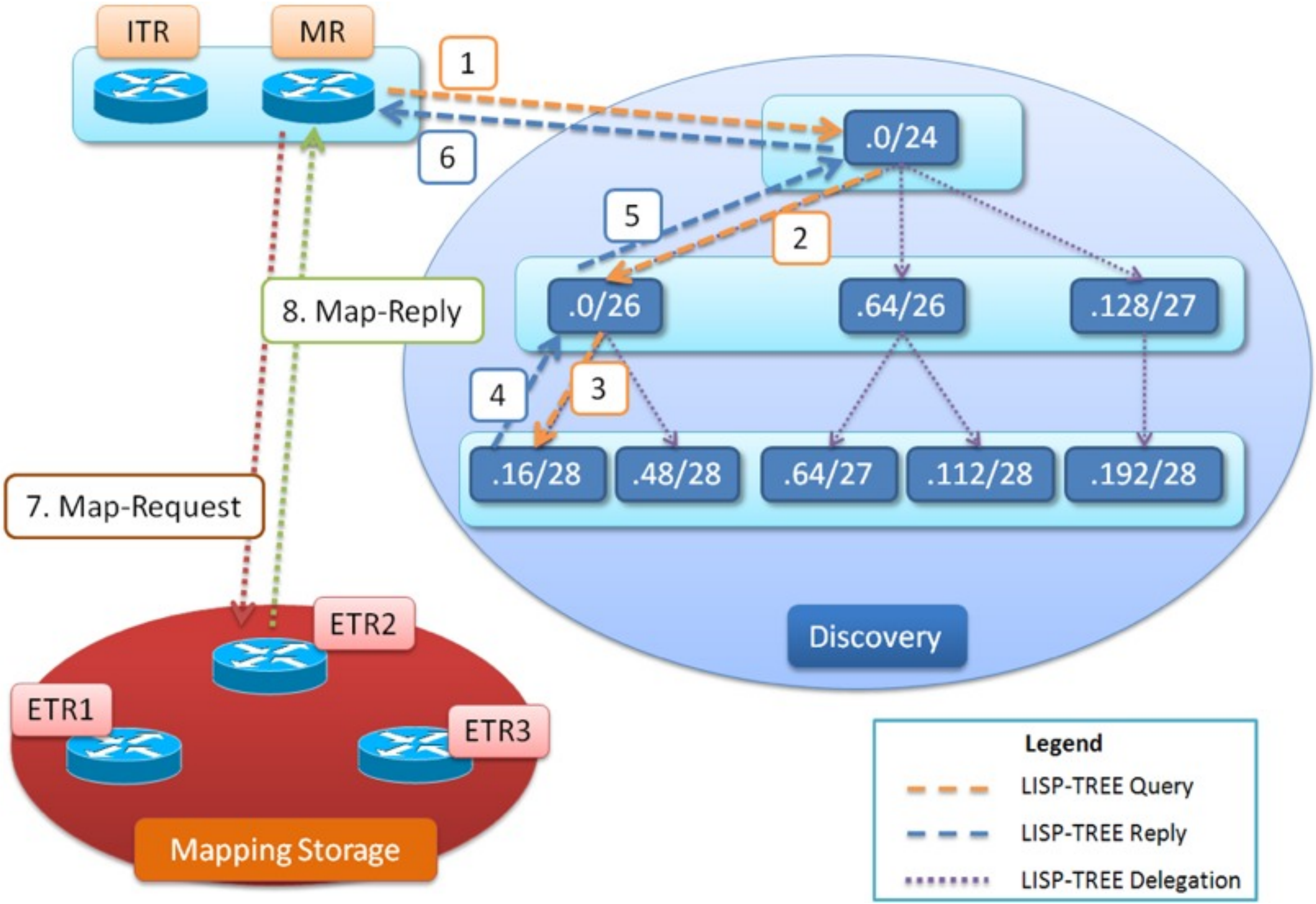
LTS: LISP-Tree Server
MS: Mapping Server
MR: Mapping Resolver

[TREE] LISP-TREE: A DNS Hierarchy to Support the LISP Mapping System, Jakab et al., JSAC, 2010

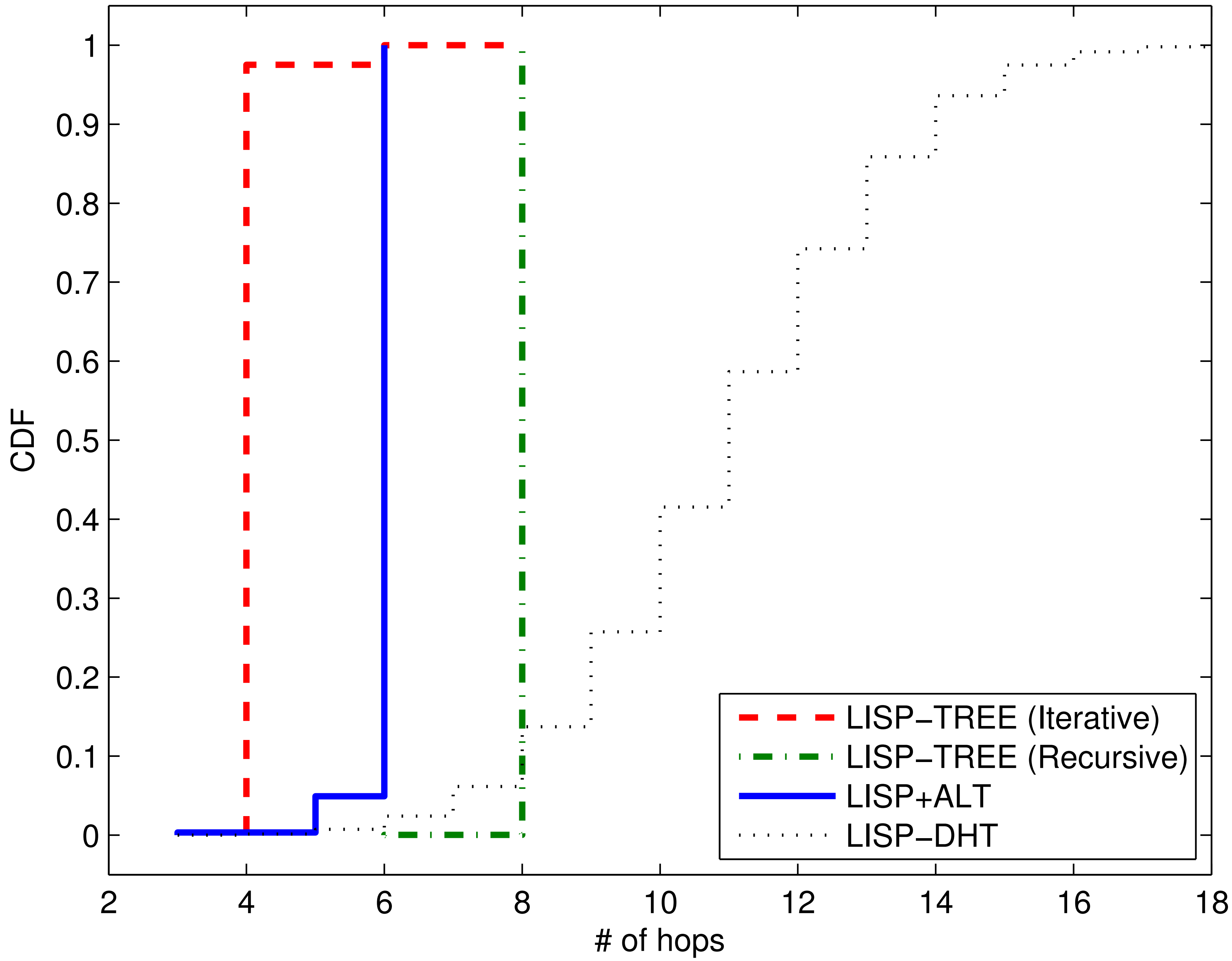
LISP-Tree Iterative



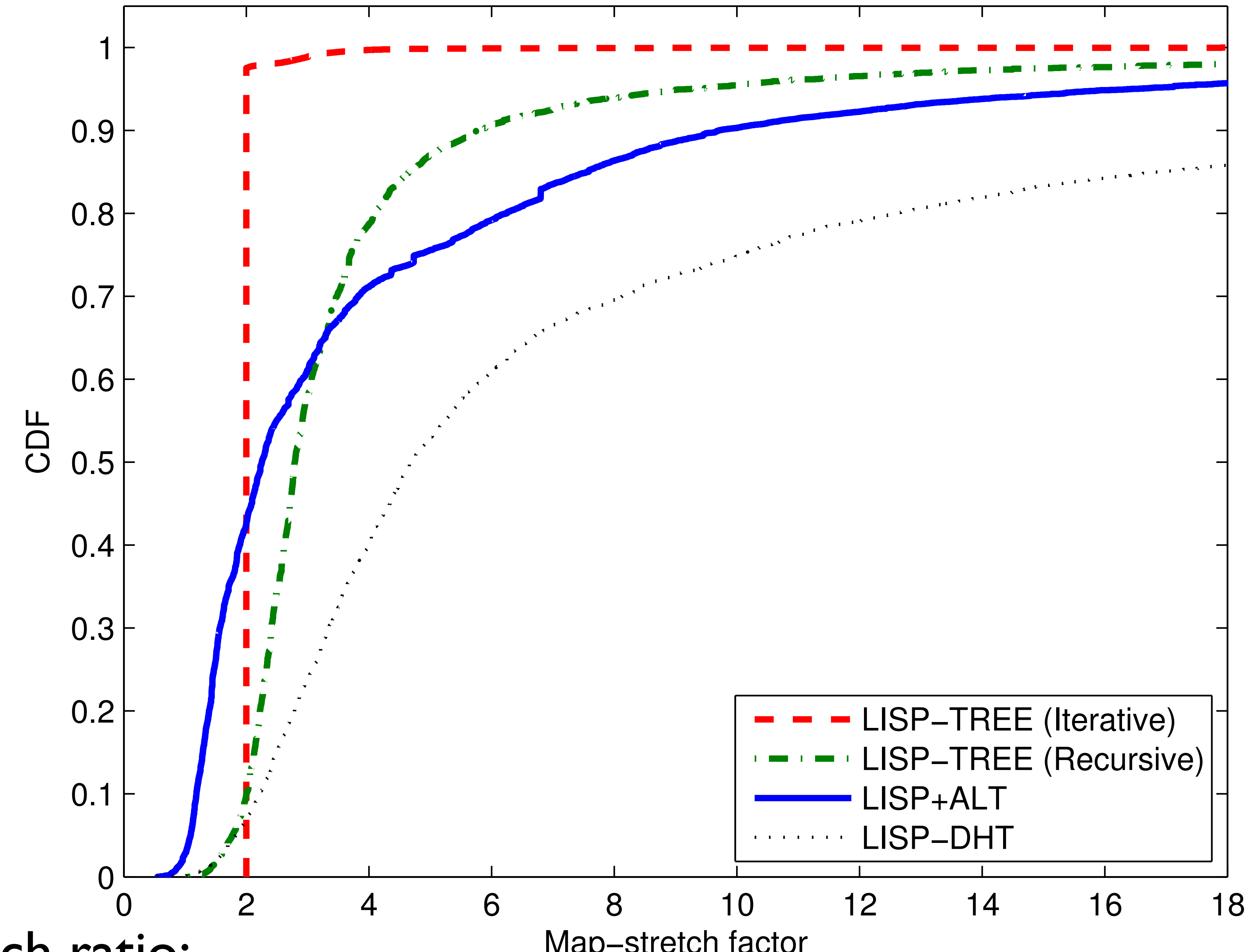
LISP-Tree Recursive



Evaluation: Hop-Count



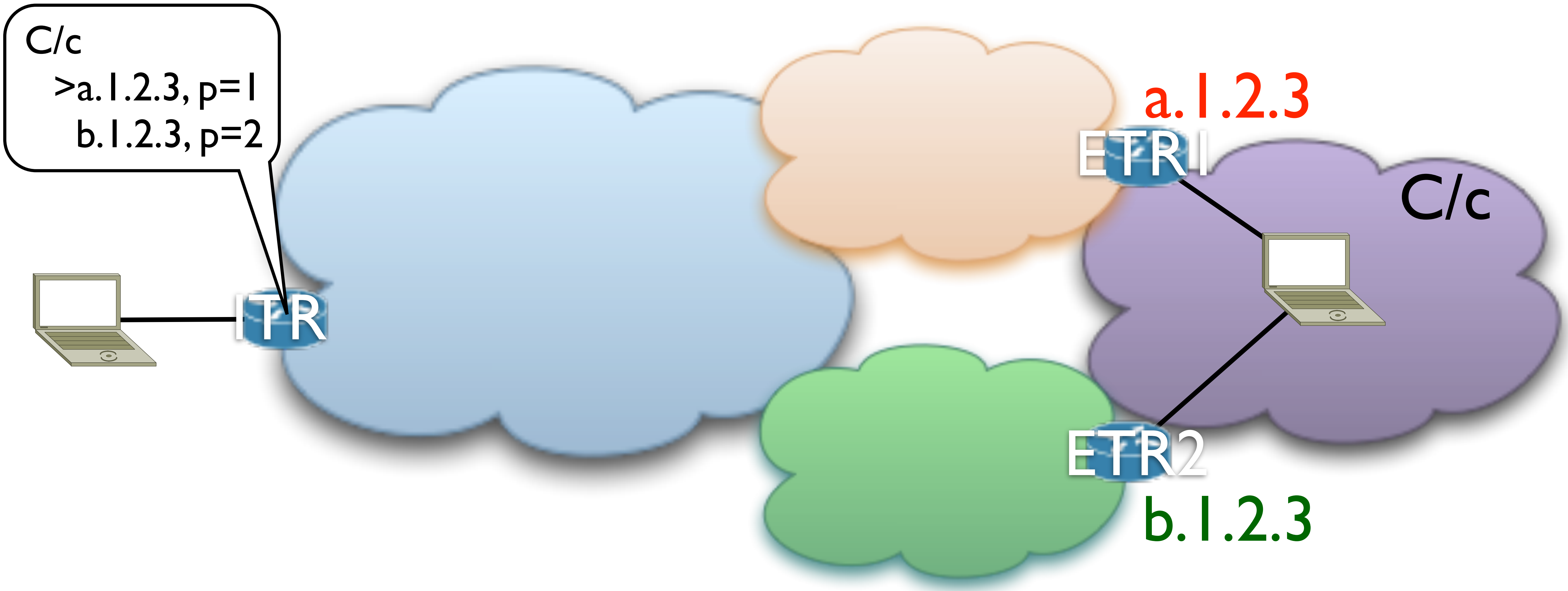
Evaluation: Map-stretch



- Map-stretch ratio:

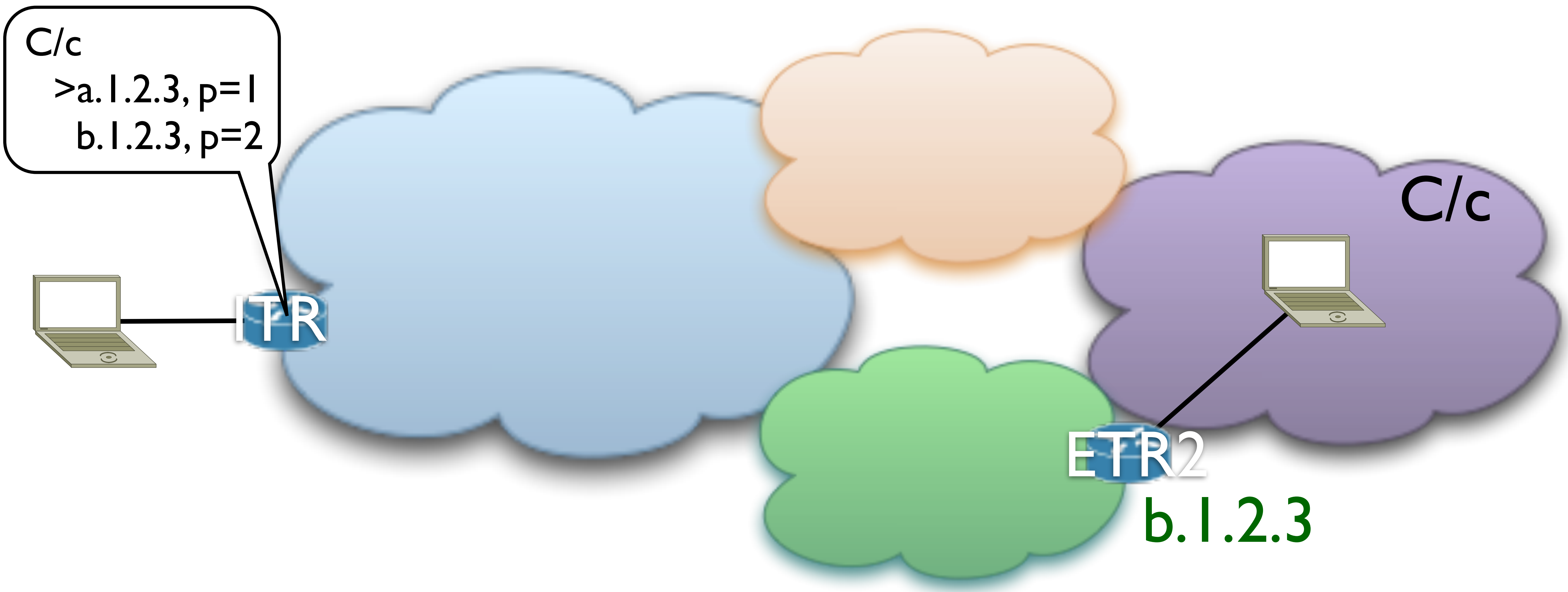
  total mapping resolution time / ITR to ETR RTT

Solving the reachability problem with the SMR bit



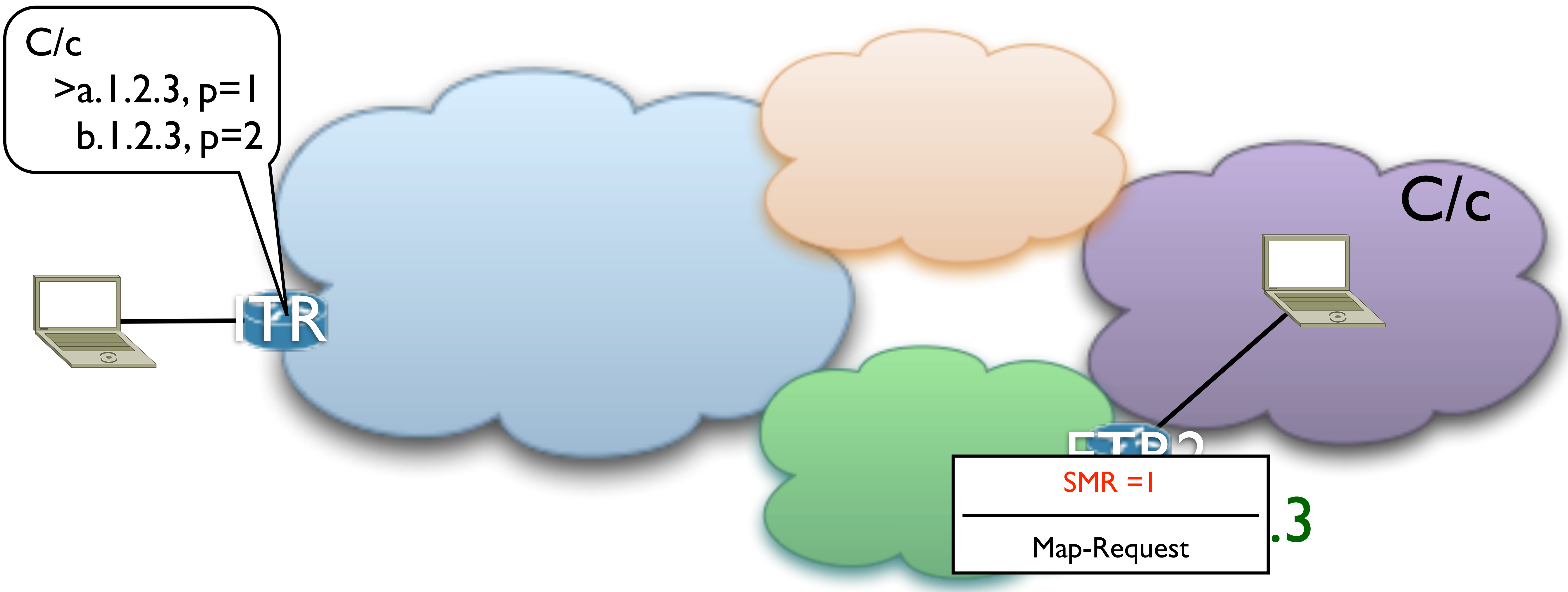
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



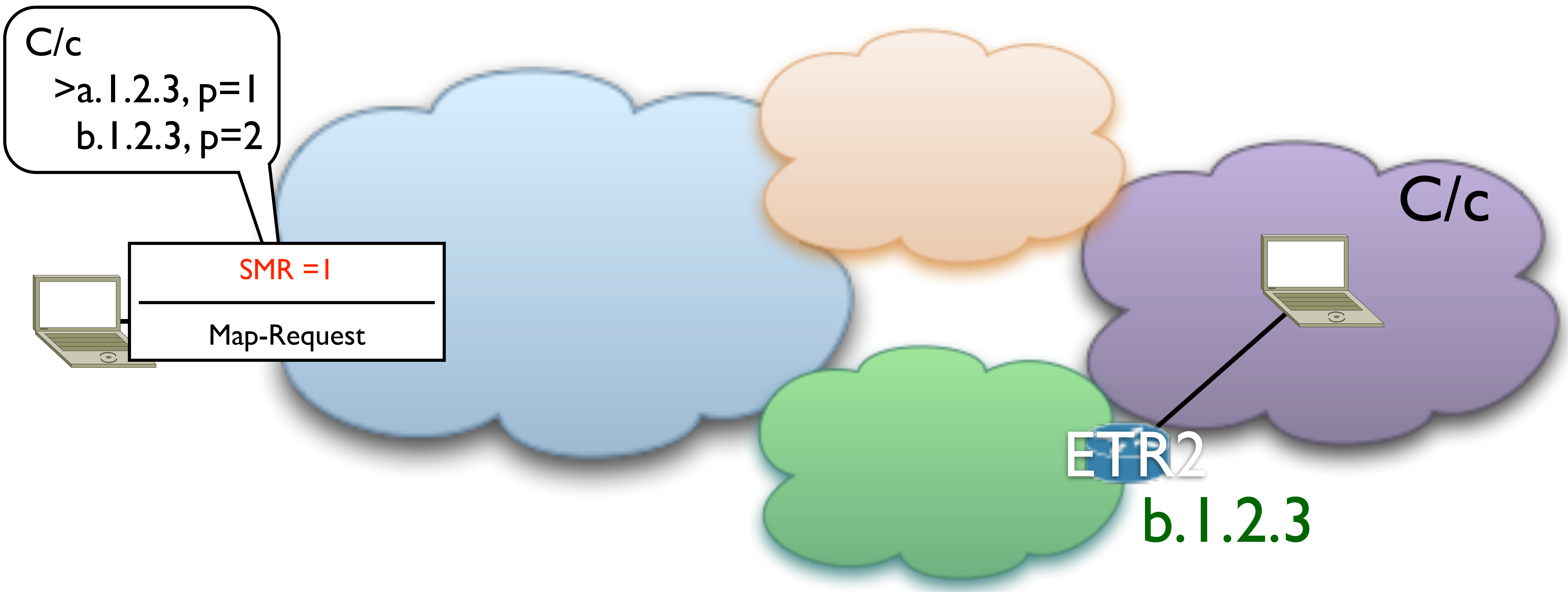
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



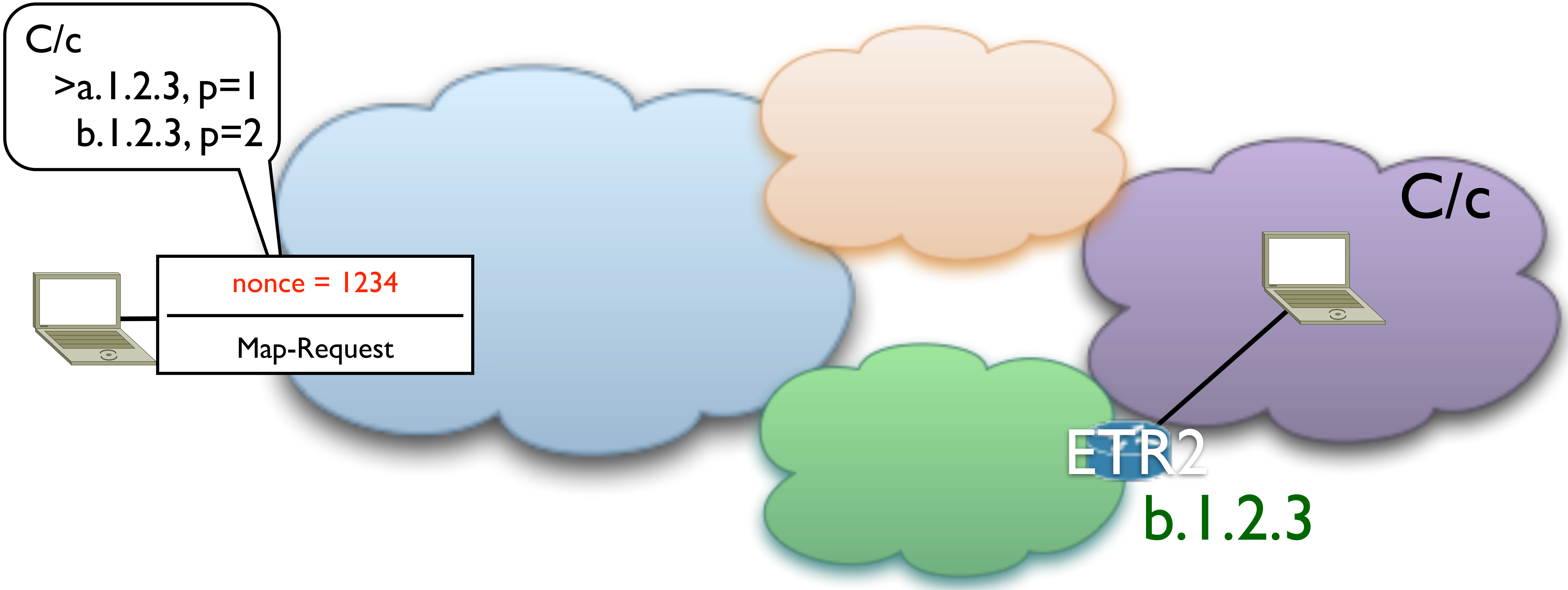
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



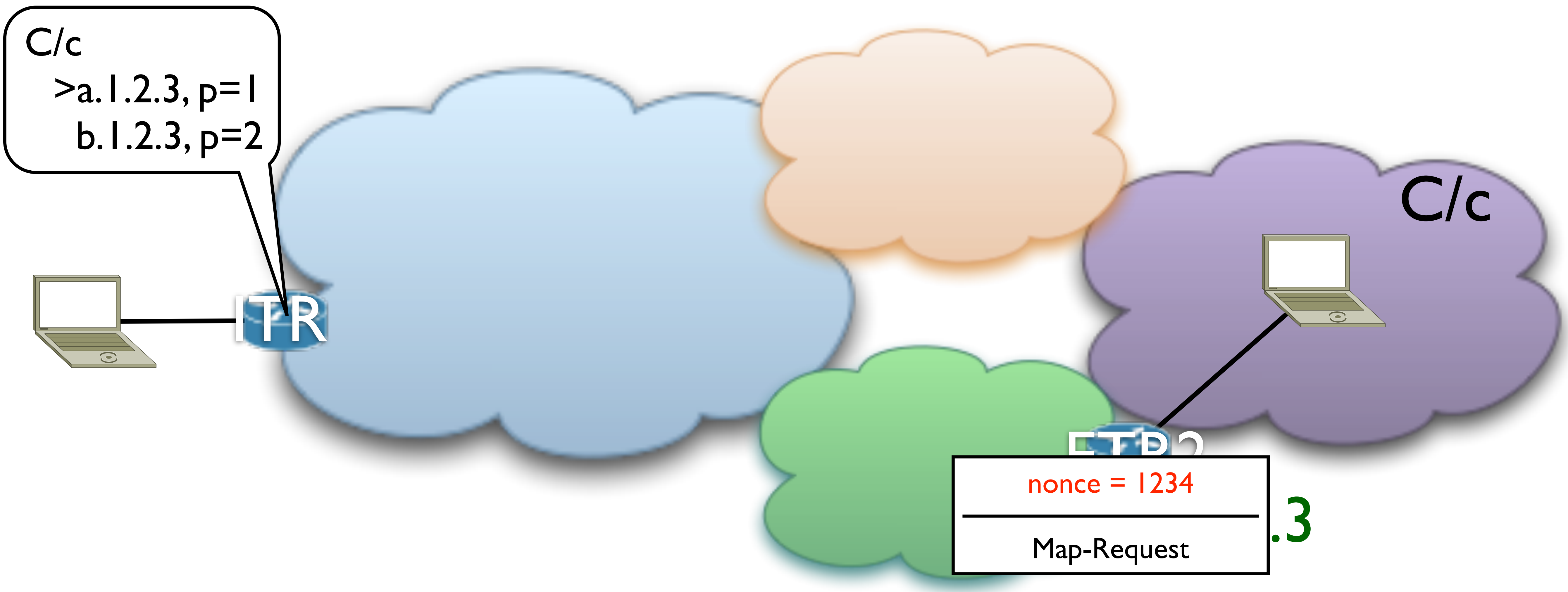
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



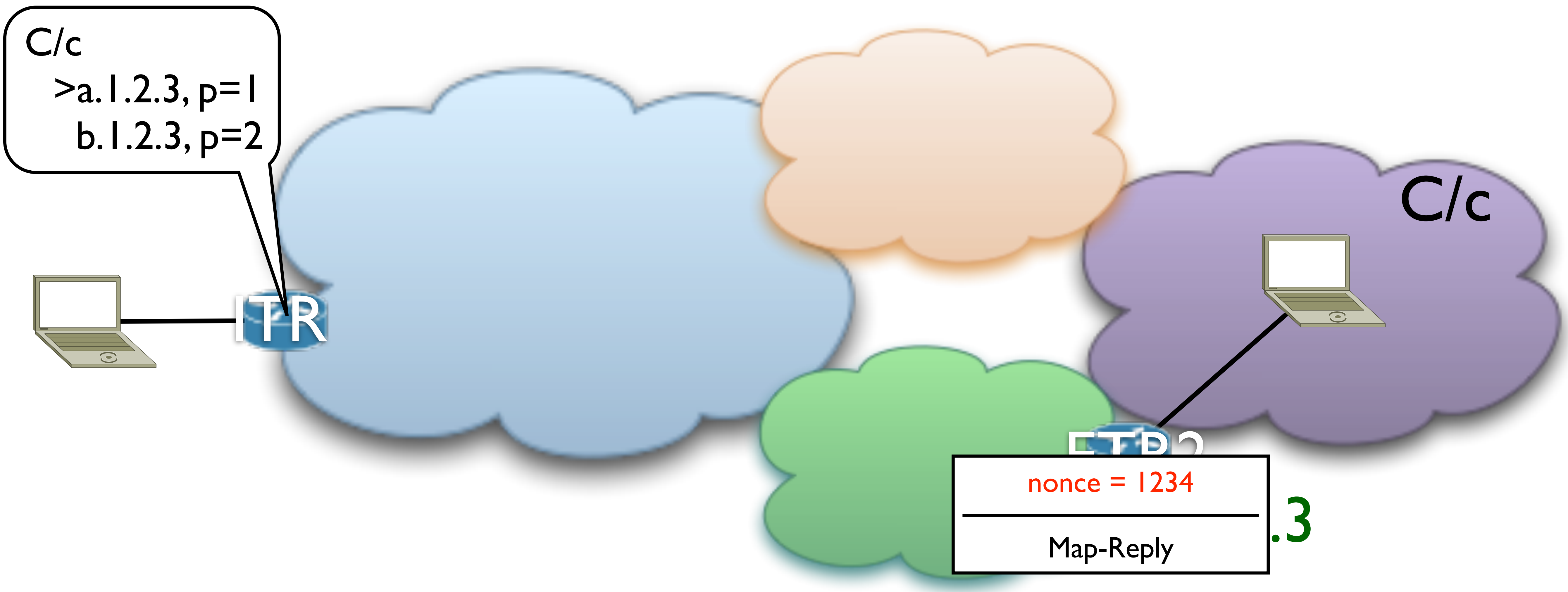
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



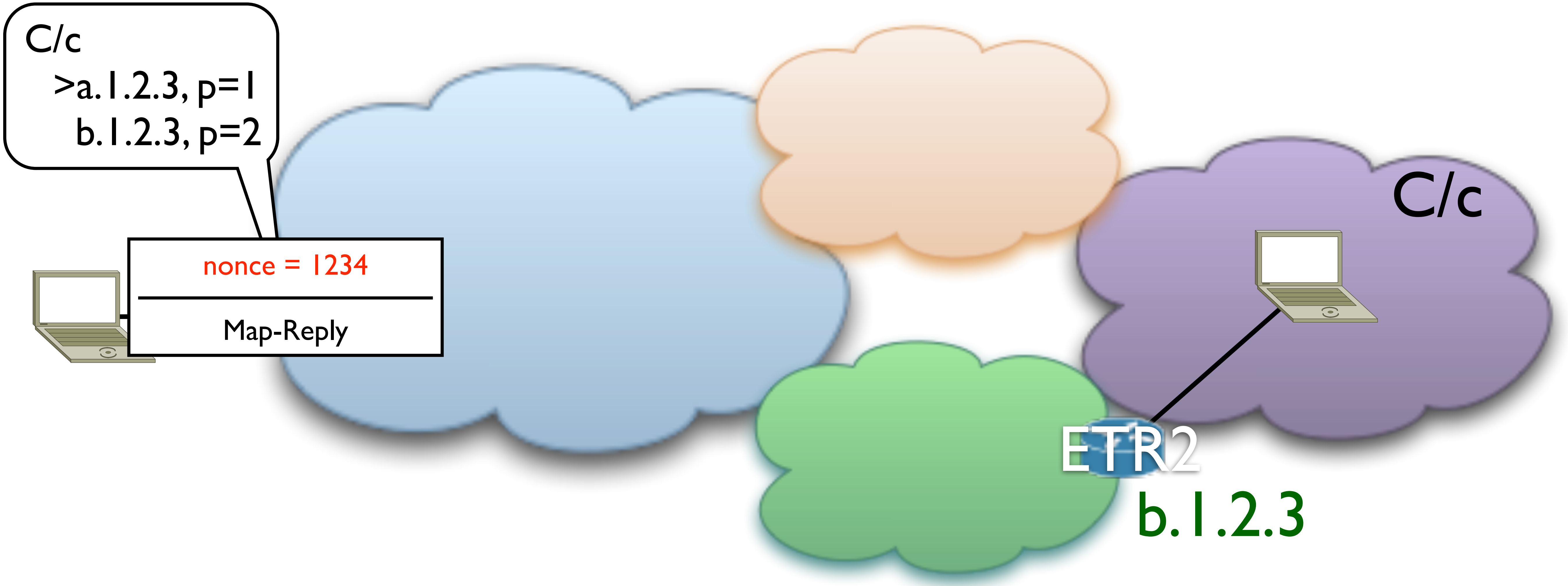
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



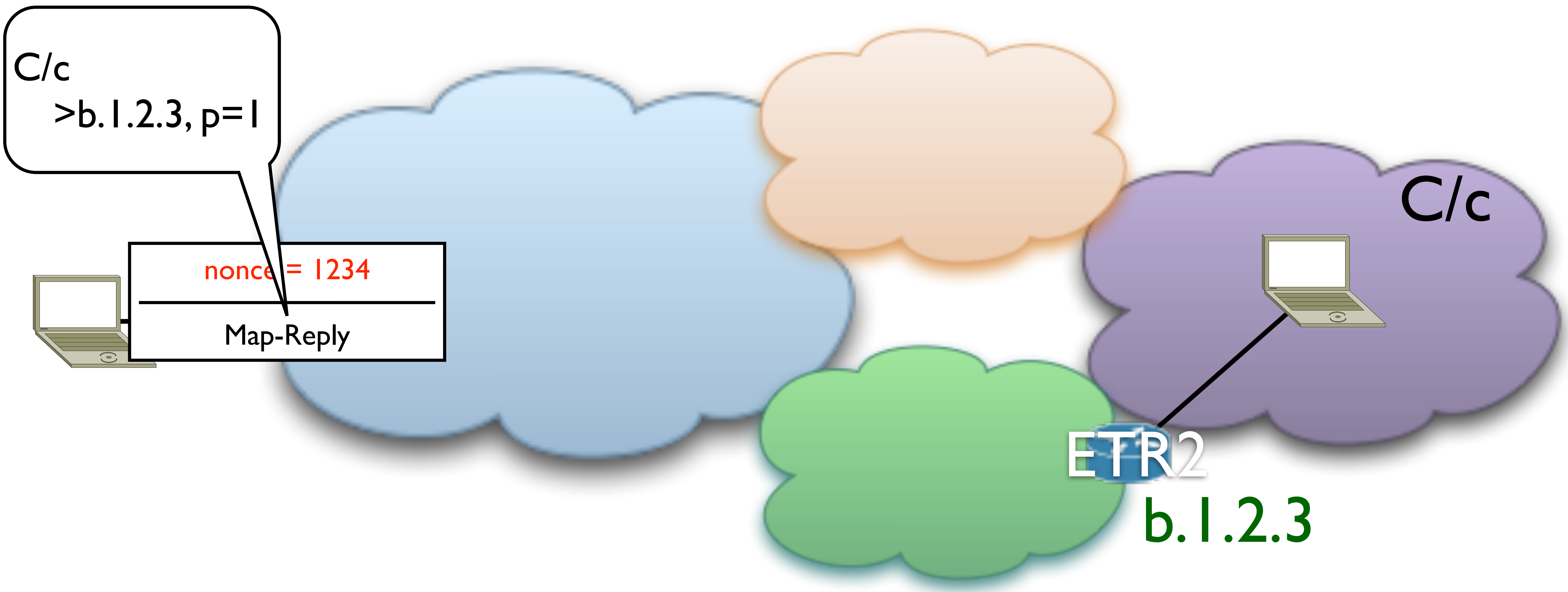
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



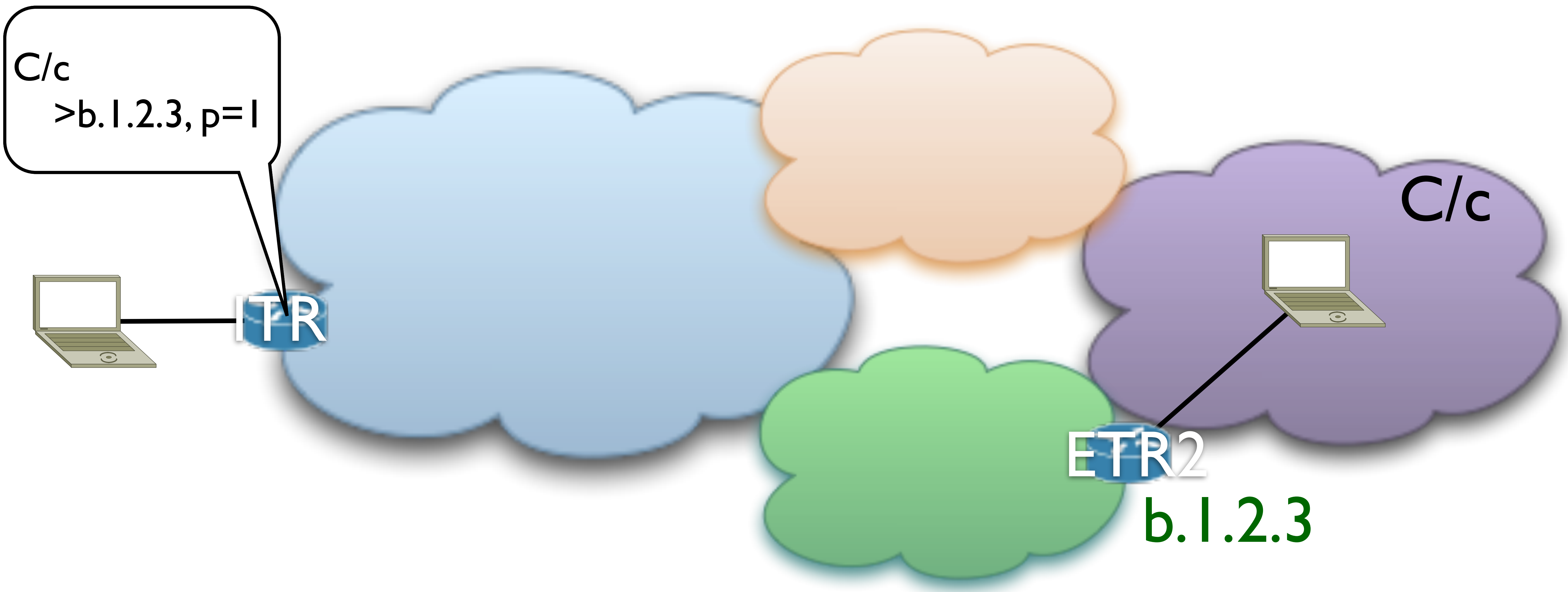
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



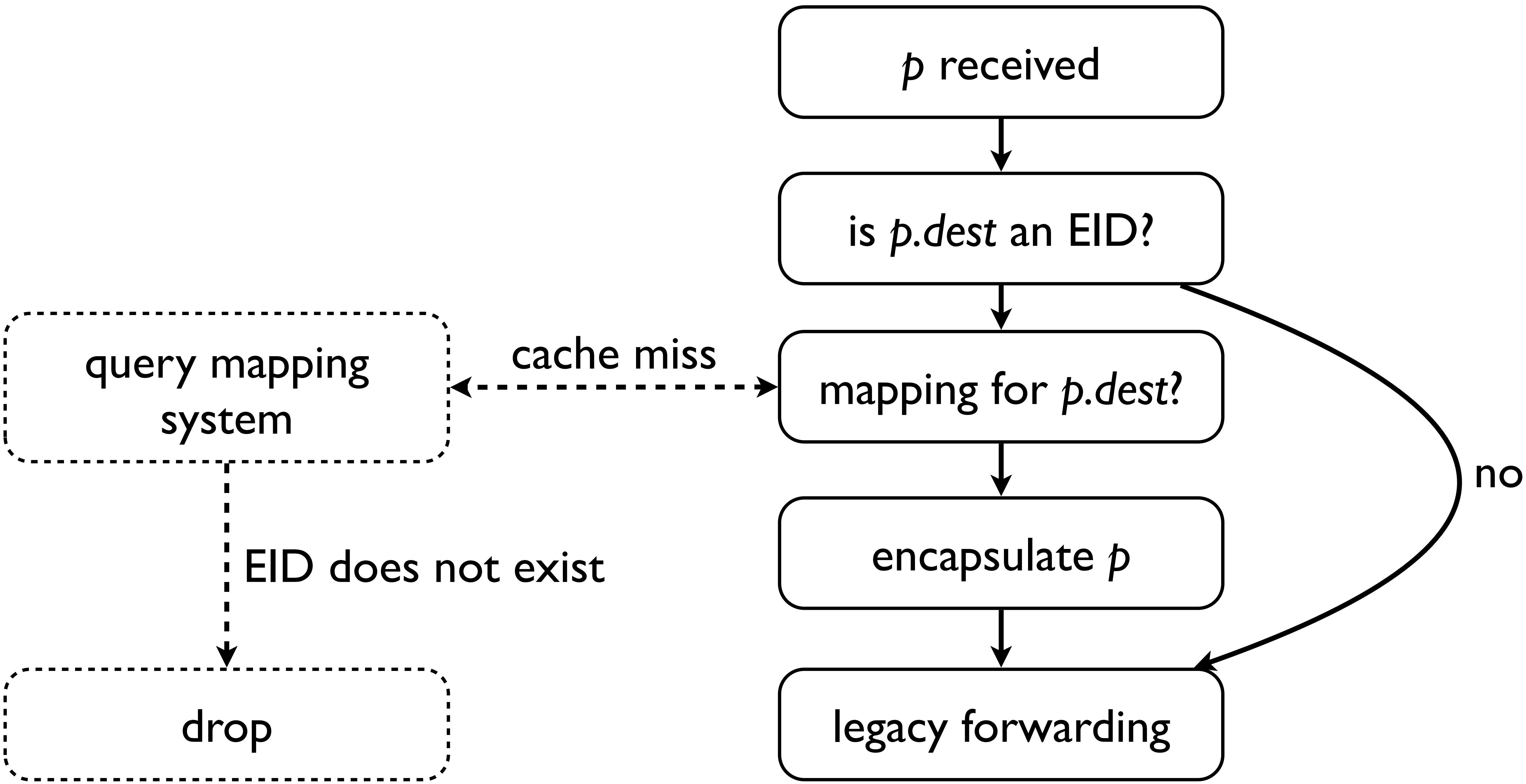
- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

Solving the reachability problem with the SMR bit



- ETR1 has been decommissioned and ETR2 wants that all the sites currently sending encapsulated data to itself update the mapping

The life of a packet in an ITR



The life of a packet in an ETR