

## Εικονική Μνήμη

(και ο ρόλος της στην ιεραρχία μνήμης)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

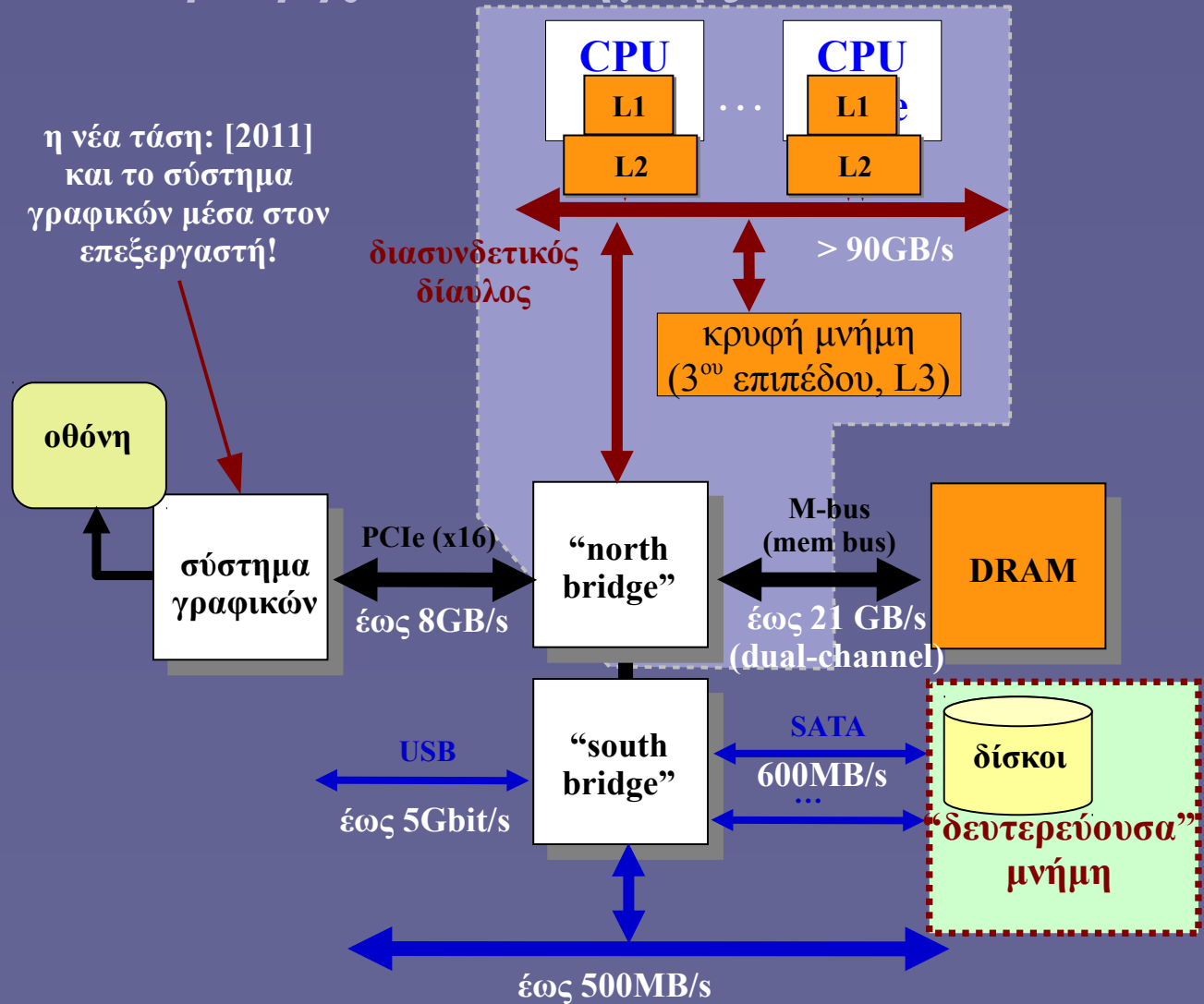
Μ.Στεφανιδάκης



# Ιεραρχία Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης

η νέα τάση: [2011]  
και το σύστημα  
γραφικών μέσα στον  
επεξεργαστή!



“Δευτερεύουσα  
μνήμη”:

Το τελευταίο  
επίπεδο στην  
ιεραρχία εντός του  
υπολογιστικού  
συστήματος

οι ρυθμοί μεταφοράς που δίνονται είναι οι θεωρητικά μέγιστοι!

# Επεκτείνοντας την Ιεραρχία Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης

- **Εννοιολογικά:**

- Κάθε υψηλότερο επίπεδο δρα ως “κρυφή μνήμη” για το αμέσως χαμηλότερο
  - Η κύρια μνήμη λειτουργεί ως “κρυφή μνήμη” των μαγνητικών δίσκων
  - Τα περιεχόμενα στην κύρια μνήμη είναι υποσύνολο εκείνων στους δίσκους του συστήματος

Επέκταση  
ιεραρχίας εκτός  
του συστήματος:  
δικτυακές θέσεις  
αποθήκευσης

0,5-5ns  
\$4.000-\$10.000/GB

50-70ns  
\$100-\$200/GB

5.000.000-20.000.000 ns  
\$0,5-\$2/GB

CPU

Κρυφή μνήμη  
(SRAM)

Κύρια μνήμη  
(DRAM)

Μαγνητικοί  
δίσκοι

# Εικονική μνήμη (virtual memory)

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Το πρώτο σύστημα εικονικής μνήμης παρουσιάστηκε το 1962 (Atlas computer)

- Για ποιον λόγο εμφανίστηκε;
  - Στους πρώτους υπολογιστές το μέγεθος της κύριας μνήμης ήταν **περιορισμένο**
  - Ακόμα και στην περίπτωση του **μονοπρογραμματισμού** η κύρια μνήμη ήταν ανεπαρκής
  - Εμφάνιση ΛΣ με υποστήριξη **πολυπρογραμματισμού**: αδυναμία **ταυτόχρονης διατήρησης** πολλών προγραμμάτων στην κύρια μνήμη
  - Η λύση: **εικονική μνήμη**
    - Μέρος των δεδομένων βρίσκεται στους δίσκους του συστήματος
    - Μεταφορά στην κύρια μνήμη όταν χρειαστεί
    - Πιθανότατα αντικαθιστώντας άλλα τμήματα δεδομένων
    - Τα τελευταία μεταφέρονται πίσω στους δίσκους

# Πριν την εικονική μνήμη: overlays

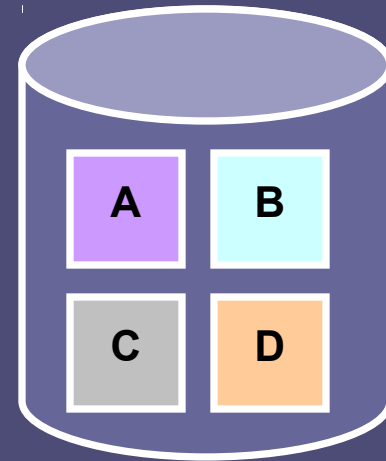
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υπο-προγραμμάτων!

## Κύρια μνήμη

```
main( ) {  
  
  swap-in(D)  
  call D1  
  
  swap-in(B)  
  Call B2  
}
```

## δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
  - υποπρογράμματα

# Πριν την εικονική μνήμη: overlays

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υπο-προγραμμάτων!

## Κύρια μνήμη

```
main( ) {
```

```
  swap-in(D) ←  
  call D1
```

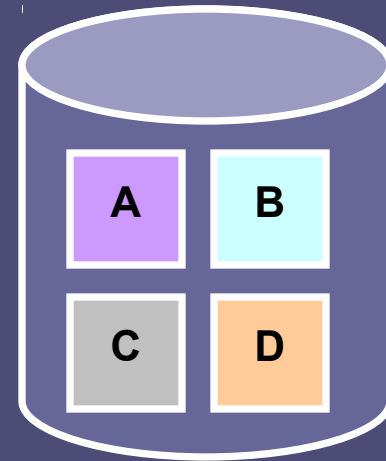
```
  swap-in(B)  
  Call B2
```

```
D1( ) {
```

```
  ...
```

```
}
```

## δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
  - υποπρογράμματα

# Πριν την εικονική μνήμη: overlays

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υπο-προγραμμάτων!

## Κύρια μνήμη

```
main( ) {
```

```
  swap-in(D) ←  
  call D1
```

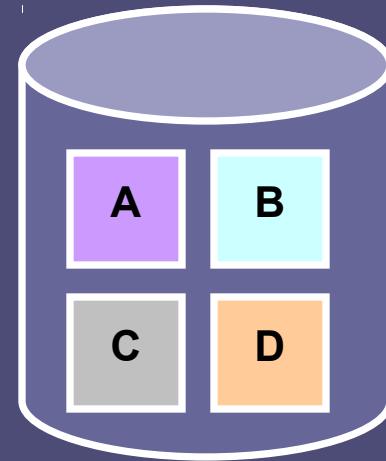
```
  swap-in(B) ←  
  Call B2
```

```
B2( ) {
```

```
  ...
```

```
}
```

## δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
  - υποπρογράμματα

# Χώρος διευθύνσεων προγράμματος

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

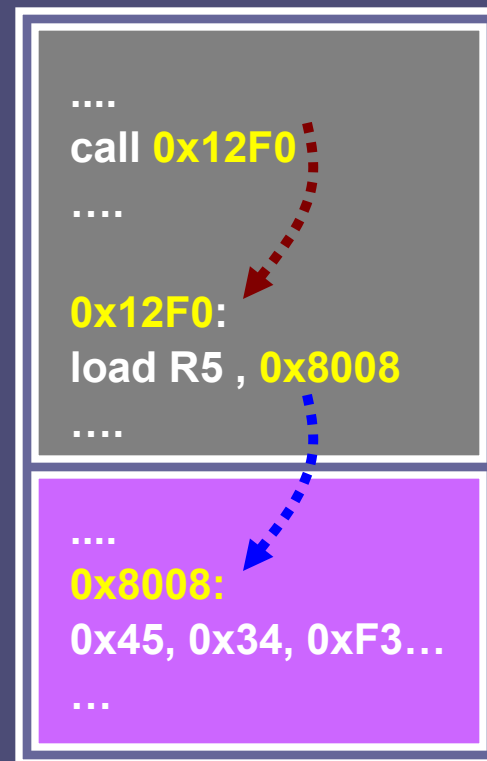
- Address Space

- Εκτελούμενο πρόγραμμα στη μνήμη:
- Διευθύνσεις κώδικα
  - Εντολές διακλάδωσης
- Διευθύνσεις δεδομένων
  - Εντολές load-store

- Πριν την εικονική μνήμη:

- Φυσικές διευθύνσεις
- Άμεση αντιστοιχία με διευθύνσεις κύριας μνήμης

## Κύρια μνήμη



Ποιες οι διευθύνσεις που δημιουργούσε ο μεταγλωττιστής; Τι συνέβαινε αν το πρόγραμμα δεν φορτωνόταν πάντοτε στον ίδιο χώρο μνήμης;

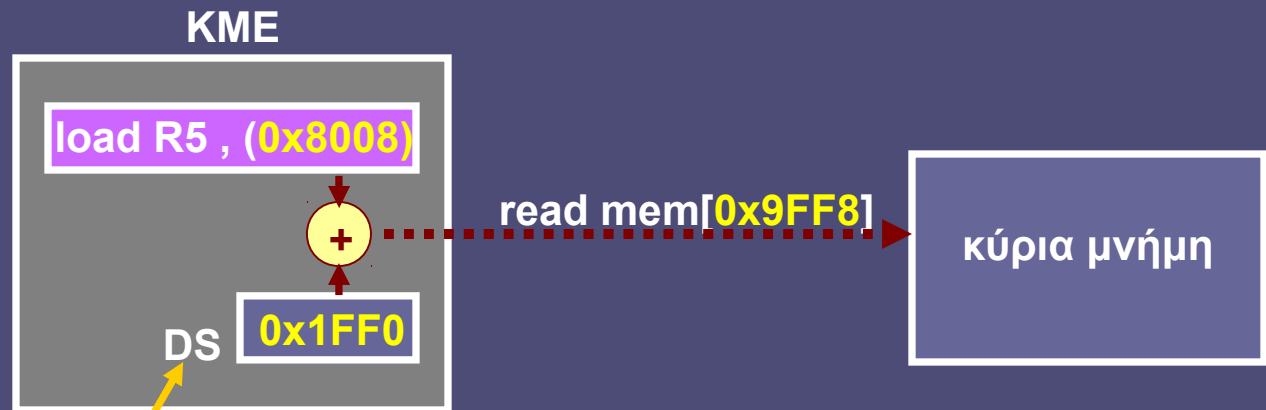


# Πολυπρογραμματισμός πριν την εικονική μνήμη

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Χρήση καταχωρητών βάσης (χωρίς άλλη υποστήριξη) σε χαμηλού κόστους επεξεργαστές (π.χ. Intel 8086).

Διευκόλυνση τοποθέτησης προγραμμάτων οπουδήποτε στη μνήμη.



καταχωρητής βάσης τμήματος δεδομένων (data segment)

- Καταχωρητές βάσης για κώδικα και δεδομένα
- Αλλαγή τιμής καταχωρητών βάσης ανά πρόγραμμα

# Μεταβαίνοντας σε εικονικές διευθύνσεις

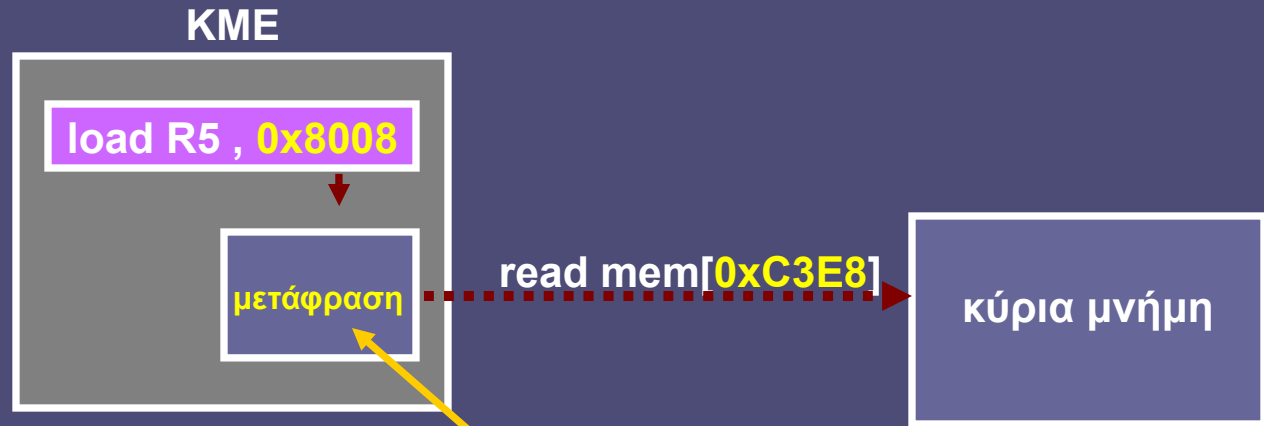
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

- Το προηγούμενο σχήμα
  - Εισήγαγε την **αποσύνδεση** των **λογικών διευθύνσεων** των προγραμμάτων από τις **φυσικές διευθύνσεις** κύριας μνήμης
  - Με απλή αντιστοιχία:  
**φυσική διεύθυνση = λογική διεύθυνση + καταχωρητής βάσης**
  - Απαιτείται υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ)
  - Το πρόγραμμα μπορεί να φορτωθεί σε οποιαδήποτε θέση μνήμης (**relocation**)
    - Δεν περιέχει αναφορές σε φυσικές διευθύνσεις
  - Εισάγεται η έννοια των ξεχωριστών χώρων διευθύνσεων (κώδικα, δεδομένων...) ανά πρόγραμμα
    - χωρίς περαιτέρω υποστήριξη όμως!

# Εικονικές Διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ο κύριος ρόλος της εικονικής μνήμης στα σημερινά υπολογιστικά συστήματα, με την άφθονη κύρια μνήμη, είναι η υποστήριξη και προστασία των εικονικών χώρων διευθύνσεων ανά πρόγραμμα



**Μηχανισμός μετάφρασης  
εικονικών διευθύνσεων σε  
φυσικές διευθύνσεις**

- Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων προγραμμάτων
- Προστασία χώρων διευθύνσεων
  - Προνόμια προσπέλασης μνήμης
- Απαιτείται συνδυασμένη υποστήριξη από ΚΜΕ, κρυφή μνήμη και λειτουργικό σύστημα

# Η εικονική μνήμη (ξανά)

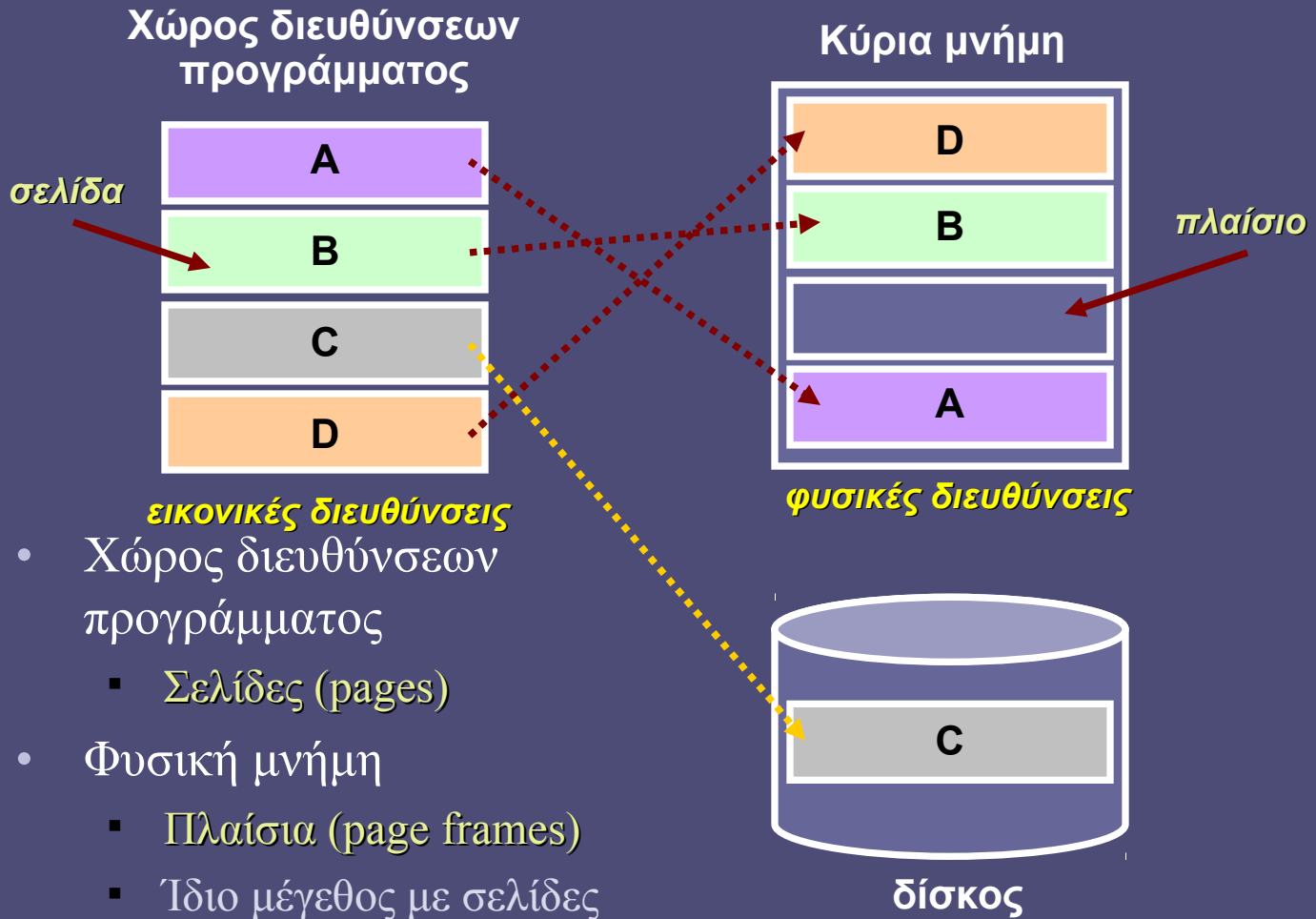
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η διαχείριση της εικονικής μνήμης έχει ομοιότητες με τη διαχείριση κρυφής-κύριας μνήμης. Τα δύο επίπεδα εδώ όμως (μνήμη-δίσκοι) έχουν σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά τους!

- **Ποιος ο ρόλος της;**
  1. Η χρήση εικονικής μνήμης, πέρα από όση είναι πραγματικά διαθέσιμη
  2. Η αντιστοίχιση εικονικών διευθύνσεων σε φυσικές και η διαχείριση των προνομίων προσπέλασης
    - Σημαντικότερο σήμερα!
- **Ποιος τη διαχειρίζεται;**
  - Διαχείριση από το λειτουργικό σύστημα
  - Υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ/κρυφή μνήμη)
- **Πώς υλοποιείται;**
  - Μετακίνηση τμημάτων μνήμης από/προς τους δίσκους
  - Εκμετάλλευση αρχής τοπικότητας
    - Μερικά μέρη μόνο των προγραμμάτων είναι “ενεργά” κάθε στιγμή

# Βασικό σχήμα Εικονικής Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη



## Σελιδοποίηση (paging):

Το μέγεθος των σελίδων καθορίζεται από τους μηχανισμούς του υλικού.

Συνήθη μεγέθη 4KB έως 16KB

# Σελίδες και εικονικές διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ο επεξεργαστής παράγει εικονική διεύθυνση



Στη μνήμη στέλνεται φυσική διεύθυνση

- Ο επεξεργαστής μπορεί να παράγει έως και  $2^N$  εικονικές διευθύνσεις
- Η φυσική μνήμη μπορεί να έχει έως  $2^K$  διευθύνσεις
- Το μέγεθος σελίδας είναι  $2^M$  bytes

Η μετάφραση γίνεται στον επεξεργαστή, άρα εκεί (δηλ. στο υλικό) καθορίζεται το μέγεθος της σελίδας

# “Σελίδες” και “Τμήματα”

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

- **Σελίδες (pages)**
  - Σταθερό μέγεθος (4KB-16KB)
  - Μία λέξη εικονικής διεύθυνσης (page+offset)
  - Ευκολία τοποθέτησης και αντικατάστασης σελίδων στην κύρια μνήμη
  - Βέλτιστο μέγεθος για μεταφορά από-προς δίσκο
  - Ενδεχομένως μέρος σελίδας μένει αχρησιμοποίητο
- **Τμήματα (segments)**
  - Μεταβλητό μέγεθος (από 1 byte(!) έως  $2^{32}$  bytes)
  - Δύο λέξεις ανά διεύθυνση (segment, offset)
  - Αναγκαίος ο έλεγχος ορίων
  - “ταιριάζει καλύτερα στα χαρακτηριστικά των εφαρμογών”
  - Σε ορισμένους επεξεργαστές χρησιμοποιείται ως πρώτο επίπεδο μετάφρασης (πριν τη μετάφραση των σελίδων)

# Σελιδοποίηση κατ'απαίτηση

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η μεγάλη επιβάρυνση για τη μετακίνηση των σελίδων από και προς τον δίσκο είναι καθοριστική για την απόδοση ενός συστήματος

- Οι σελίδες των προγραμμάτων (κώδικας-δεδομένα) βρίσκονται αρχικά μόνο στον δίσκο
- Το ΛΣ τις σημειώνει ως “**απούσες**” από τη μνήμη
- Όταν προσπελαστεί μια “απούσα” σελίδα, δημιουργείται ένα σφάλμα σελιδοποίησης (**page fault**)...
- ...και το ΛΣ τη φορτώνει σε ένα πλαίσιο στη μνήμη
- Ενδεχομένως εκτοπίζοντας πίσω στον δίσκο μια άλλη σελίδα από τη μνήμη
  - Η τελευταία σημειώνεται ως “**απούσα**”
- **Page faults**: μεγάλο κόστος σε κύκλους αναμονής
  - 1-10Mκύκλοι



# Κρίσιμα σημεία στη σχεδίαση εικονικής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

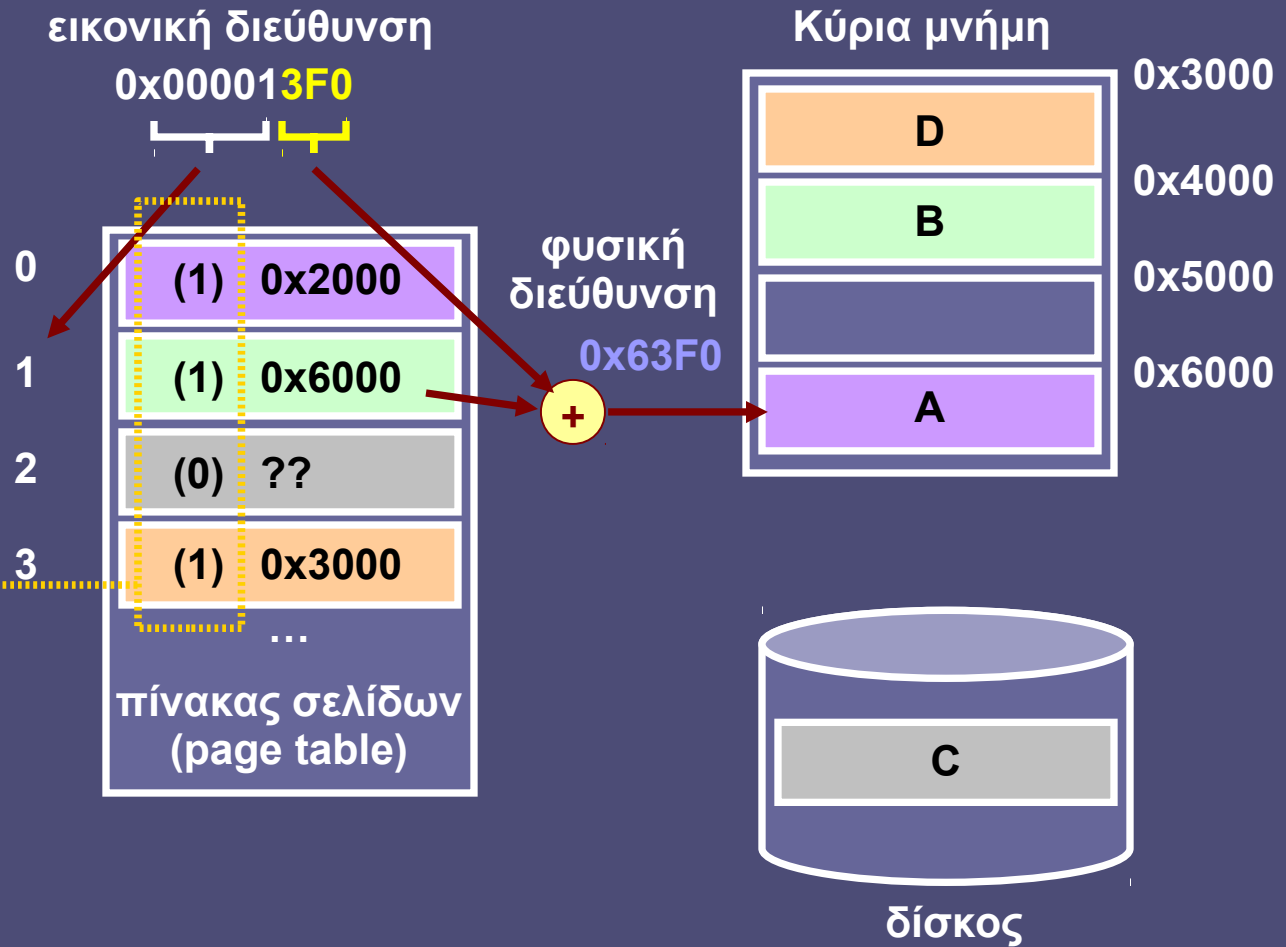
Ακόμα και μικρή μείωση στην εμφάνιση page faults μπορεί να έχει σημαντικό όφελος για την απόδοση του συστήματος

- Οι σελίδες πρέπει να έχουν ικανό μέγεθος
  - Για εξισορρόπηση του κόστους προσπέλασης του δίσκου
- Η μείωση των page faults είναι επιβεβλημένη
  - Οι σελίδες τοποθετούνται οπουδήποτε μέσα στη μνήμη
    - Σχήμα ανάλογο των fully-associative κρυφών μνημών
- Η διαχείριση της εικονικής μνήμης γίνεται από λογισμικό (ΛΣ)
  - Μικρή επιβάρυνση συγκρινόμενη με χρόνο μετακίνησης σελίδων στους δίσκους
  - Δυνατότητα χρήσης πολυπλοκότερων αλγορίθμων για τοποθέτηση-αντικατάσταση σελίδων στη μνήμη
- Δεν είναι δυνατή η ενημέρωση στον δίσκο με κάθε εγγραφή νέων δεδομένων στη σελίδα

# Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Presence bit: .....  
βρίσκεται η σελίδα  
στην κύρια μνήμη;



# Πίνακας σελίδων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Τι συμβαίνει στην περίπτωση πολλαπλών προγραμμάτων;

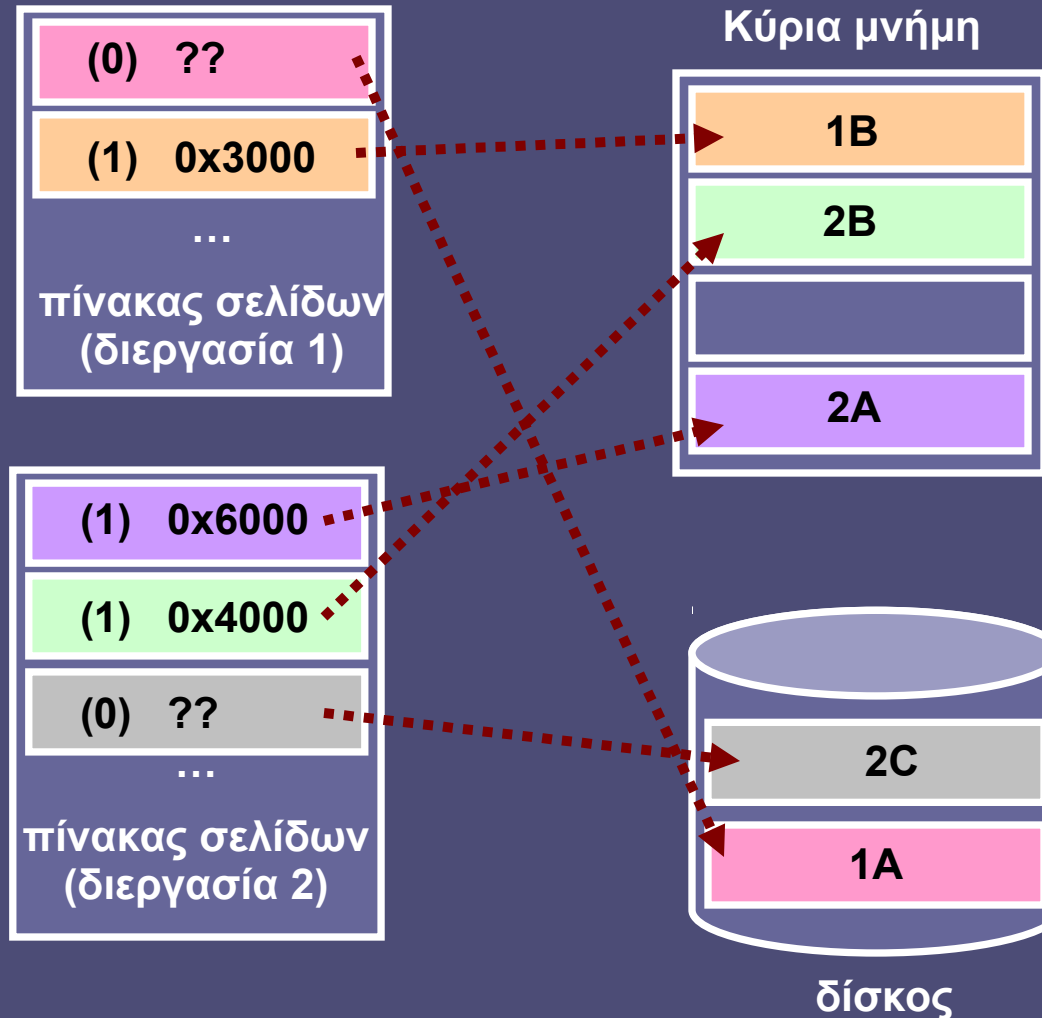
- Πού βρίσκεται;
  - Στην κύρια μνήμη!
- Πόσες θέσεις διαθέτει;
  - Θεωρητικά: ίσες με τον μέγιστο αριθμό σελίδων
    - Για  $2^{20}$  σελίδες με 4 bytes ανά γραμμή, απαιτούνται 4MB
  - Πρακτικά: πίνακες πολλαπλών επιπέδων
  - Πιθανόν: σελιδοποίηση πινάκων (!)
    - Αρκεί να υπάρχει πάντα στη μνήμη ένα μέρος του πίνακα
- Ποια πρόσθετη πληροφορία χρειάζεται;
  - Βρίσκεται η σελίδα στη μνήμη; Έχει αλλάξει;
  - Αν όχι, σε ποιο σημείο του δίσκου είναι;
    - Συχνά η πληροφορία αυτή φυλάσσεται μέσα στον πίνακα σελίδων
  - Ποια σελίδα βρίσκεται σε κάθε πλαίσιο μνήμης;
  - Πόσο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε;
    - Δομές του ΛΣ για αλγόριθμο αντικατάστασης σελίδων

# Πίνακες σελίδων και πολλαπλά προγράμματα

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Κάθε διεργασία έχει τους δικούς του πίνακες σελίδων!

Κατά την εναλλαγή διεργασιών αλλάζει και ο καταχωρητής-δείκτης στους πίνακες



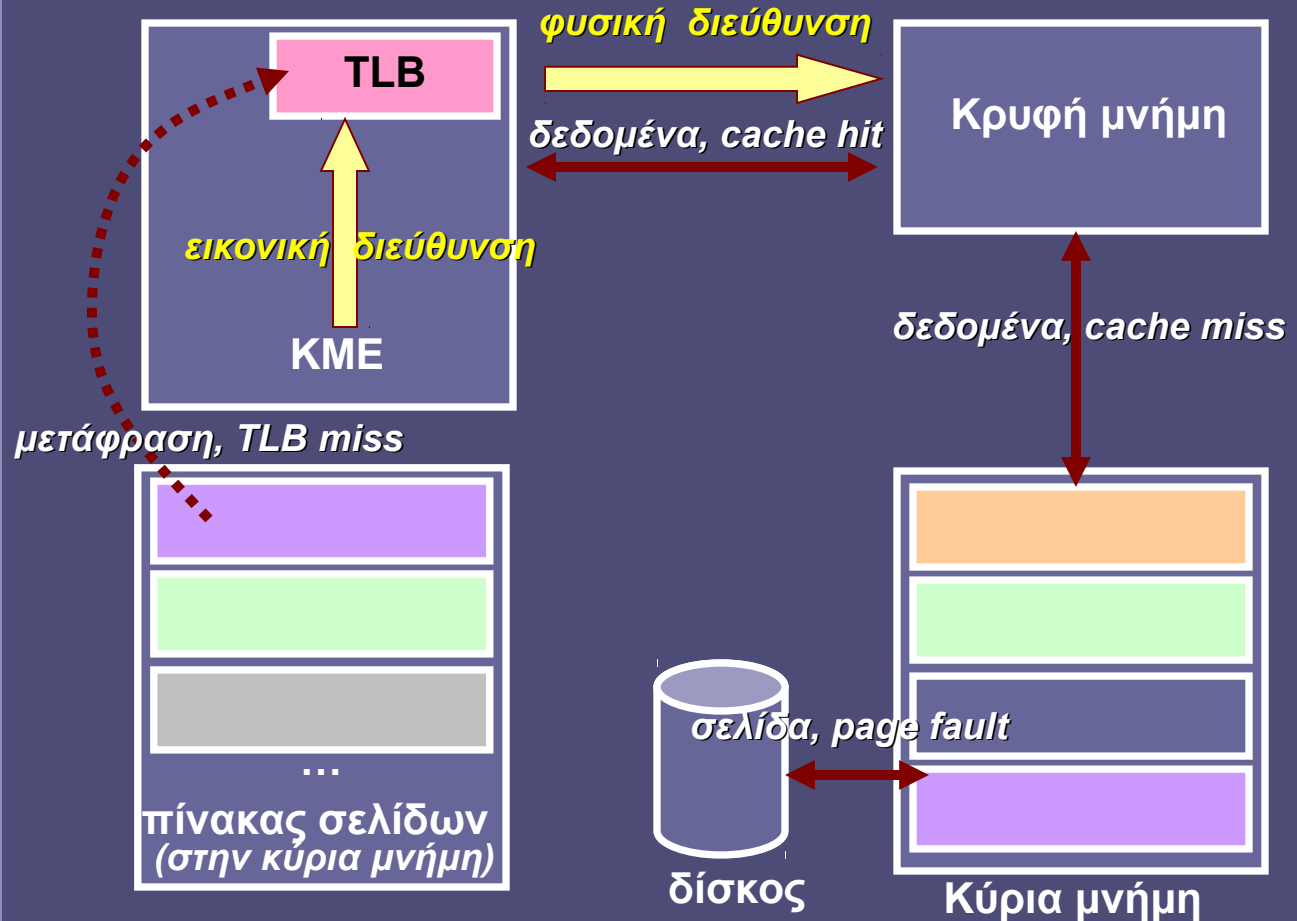
# Translation-Lookaside Buffer

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

- **Το πρόβλημα με τους πίνακες σελίδων**
  - Βρίσκονται στην κύρια μνήμη
  - Για κάθε προσπέλαση μνήμης απαιτείται μια δεύτερη!
    - Για τον πίνακα σελίδων
    - Μη αποδεκτή χρονική επιβάρυνση!
- **Translation-Lookaside Buffer (TLB)**
  - Μικρή “κρυφή μνήμη” για πρόσφατες μεταφράσεις εικονικών διευθύνσεων
    - Μέσα στον επεξεργαστή
    - 16-512 θέσεις, 1-2 γραμμές του πίνακα σελίδων ανά θέση
    - Προσπέλαση  $< 1$  κύκλο ρολογιού
    - Παρατηρούμενο Miss rate: 0.01% - 1%

# Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη



Στο σχήμα η κρυφή μνήμη δέχεται φυσικές διευθύνσεις. Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με εικονική κρυφή μνήμη ή συνδυασμό εικονικής-φυσικής κρυφής μνήμης

# Εικονική Μνήμη και Προστασία Προσπέλασης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

- **Προστασία προσπέλασης σελίδων**
  - Με διαφορετικούς πίνακες σελίδων ανά διεργασία είναι αδύνατη η προσπέλαση “ξένων” σελίδων
  - Δικαιώματα προσπέλασης ανά σελίδα
  - User mode και Supervisor Mode
    - Σε user mode δεν είναι δυνατή η προσπέλαση του TLB, του πίνακα σελίδων και των αντίστοιχων καταχωρητών συστήματος
    - Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με περισσότερα από 2 επίπεδα προνομίων
  - Ελεγχόμενη προσπέλαση συναρτήσεων ΛΣ
    - Call gates: ελεγχόμενη εκτέλεση συναρτήσεων ΛΣ από χρήστη, **στο επίπεδο όμως των προνομίων του χρήστη → δεν είναι δυνατή η προσπέλαση “ξένων” δεδομένων!**