

## Κρυφές Μνήμες

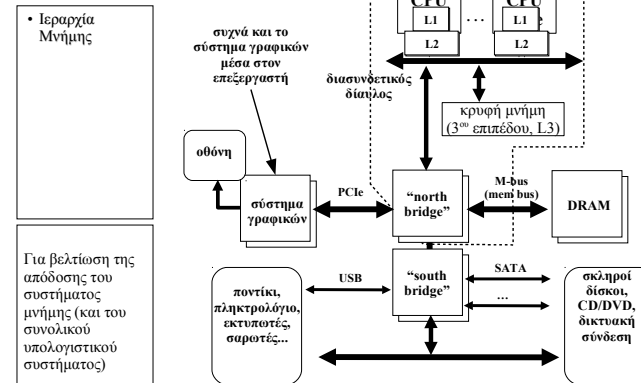
(οργάνωση, λειτουργία και απόδοση)

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



Μ.Στεφανιδάκης

## Ιεραρχία Μνήμης



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

2

## Σκοπός της Ιεραρχίας Μνήμης

### • Ιεραρχία Μνήμης

#### • Προσέγγιση της ιδανικής μνήμης

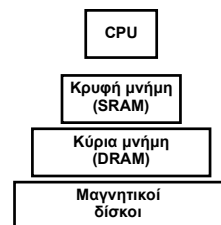
- Ο επεξεργαστής να βλέπει “μνήμη”
- Με την ταχύτητα του υψηλότερου επιπέδου
- Και το μέγεθος του χαμηλότερου επιπέδου

Για να επιτύχει τον σκοπό της η ιεραρχία μνήμης εκμεταλλεύεται την αρχή της τοπικότητας

0,5-5ns

50-70ns

5.000.000-20.000.000 ns  
«δευτερεύουσα μνήμη»



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

3

## Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

### • Ιεραρχία Μνήμης

#### • Χρονική Τοπικότητα

- Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστεί ξανά στο άμεσο μέλλον
  - Παράδειγμα: οι εντολές ενός βρόχου (loop)

#### • Εφαρμογή:

- Δεδομένα και εντολές που βρίσκονται ήδη κοντύτερα στον επεξεργαστή (π.χ. στην κρυφή μνήμη) θα προσπελαστούν πολύ γρηγορότερα

«ένα πρόγραμμα εκτελεί το 90% των εντολών του μέσα στο 10% του κώδικά του»

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

4

## Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

### • Ιεραρχία Μνήμης

#### • Χωρική Τοπικότητα

- Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστούν και οι γειτονικές θέσεις στο άμεσο μέλλον
  - Εντολές προγραμμάτων
  - Δεδομένα σε πίνακες κλπ

#### • Εφαρμογή:

- Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, μεταφέρονται και οι διπλανές της λέξεις στη μνήμη του υψηλότερου επιπέδου
  - Μεταφορά σε μπλοκ (πολλαπλές λέξεις μνήμης)
- Γρηγορότερη προσπέλαση όταν ζητηθούν και αυτές

## Κρυφές μνήμες

### • Ιεραρχία Μνήμης • Κρυφή Μνήμη

#### • Σημαντικό τμήμα στην ιεραρχία μνήμης

#### • Εξέλιξη συστημάτων κρυφής μνήμης

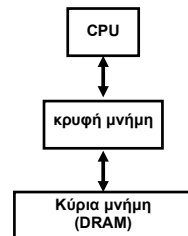
- 1962: οι πρώτες ιεραρχίες μνήμης (Atlas computer)
  - Όχι όμως κρυφή μνήμη
- 1965: η πρώτη περιγραφή κρυφής μνήμης (Wilkes)
  - Ο πρώτος υπολογιστής με κρυφή μνήμη (IBM 360/85)
- 1968: η πρώτη χρησιμοποίηση του όρου “cache memory”
- Στη συνέχεια:
  - Πολλαπλά επίπεδα κρυφής μνήμης (L1, L2, L3)
  - Βελτιωμένες αρχιτεκτονικές κρυφής μνήμης

## Απλό μοντέλο ιεραρχίας μνήμης

### • Ιεραρχία Μνήμης • Κρυφή Μνήμη

Οι αρχές λειτουργίας της απλής ιεραρχίας μπορούν να επεκταθούν σε πολλαπλά επίπεδα (κρυφή μνήμη L1, L2 και L3)

Η διαχείριση της κρυφής μνήμης γίνεται από το υλικό διαφανώς προς τις εφαρμογές



- Τα δεδομένα βρίσκονται αρχικά στην κύρια μνήμη
- Η κρυφή μνήμη περιέχει υποσύνολο των δεδομένων
- Μεταφορά μεταξύ επιπέδων μνήμης σε μπλοκ λέξεων

## Αποθήκευση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

### • Ιεραρχία Μνήμης • Κρυφή Μνήμη

#### • Αποθήκευση δεδομένων

- Τα υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας μνήμης (πιο κοντά στις ΚΜΕ) είναι υποσύνολα των χαμηλότερων
- Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται τελικά στο χαμηλότερο επίπεδο (κύρια μνήμη)
- Μεταφορά δεδομένων
  - Αντιγραφή από επίπεδο σε επίπεδο
  - Το ελάχιστο σύνολο δεδομένων που μεταφέρεται μεταξύ δύο επιπέδων ονομάζεται μπλοκ
    - Πολλαπλά bytes (πολλές λέξεις μαζί)

## Αναζήτηση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

### Αναζήτηση δεδομένων

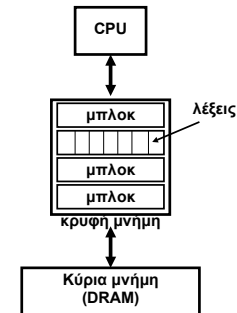
- Ο επεξεργαστής ζητά πάντοτε τα δεδομένα/εντολές από το κοντινότερο σε αυτόν επίπεδο
- Τα δεδομένα υπάρχουν στο επίπεδο αυτό: **hit**
- Τα δεδομένα δεν βρίσκονται στο επίπεδο αυτό: **miss**
  - Η αίτηση προωθείται στο επόμενο (χαμηλότερο) επίπεδο
  - Όταν βρεθεί, το μπλοκ που περιέχει τα δεδομένα αντιγράφεται στο ανώτερο επίπεδο

## Μπλοκ (γραμμές) κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

Οι σύγχρονοι επεξεργαστές διαθέτουν κρυφές μνήμες με μέγεθος μπλοκ ίσο με 64 bytes

- Για την εκμετάλλευση της τοπικότητας
- Όταν πρέπει να μεταφερθεί μια λέξη, μεταφέρεται το μπλοκ που την περιέχει
- Το μέγεθος του μπλοκ είναι καθοριστικό για την απόδοση της ιεραρχίας μνήμης
- Το σύστημα κύριας μνήμης έχει βελτιστοποιηθεί αρχιτεκτονικά για μεταφορές μπλοκ



## Τοποθέτηση ενός μπλοκ

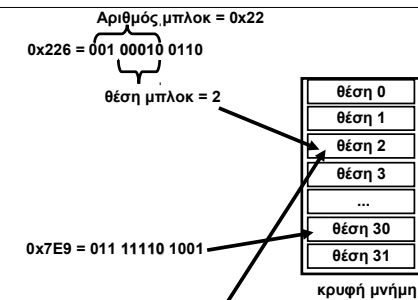
- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

- Η κύρια μνήμη περιέχει πολύ περισσότερα «μπλοκ» από όσα χωρούν στην κρυφή μνήμη
    - Συνεπώς, στην ίδια θέση της κρυφής μνήμης πρέπει να τοποθετηθούν (κατά τη διάρκεια εκτέλεσης) περισσότερα από ένα μπλοκ
      - Σύγκρουση μπλοκ
  - Πώς αποφασίζεται η θέση ενός μπλοκ στην κρυφή μνήμη;
    - Η απλή λύση: άμεση απεικόνιση (direct mapped caches)
    - Κάθε μπλοκ πηγαίνει σε μία μόνο θέση
- (αριθμός μπλοκ) mod (θέσεις στην κρυφή μνήμη)**
- Υπολογίζεται πολύ εύκολα αν οι θέσεις είναι δύναμη του 2

## Άμεση απεικόνιση θέσης μπλοκ

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

**Παράδειγμα:**  
Block = 16 bytes  
Cache = 32 blocks

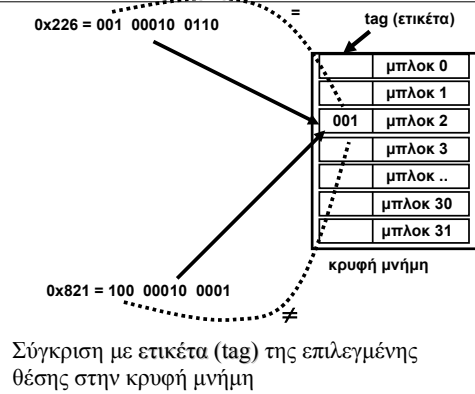


Κάθε διεύθυνση μπορεί να βρίσκεται σε μία μόνο θέση στην κρυφή μνήμη

## Ποιο μπλοκ βρίσκεται σε κάθε θέση;

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

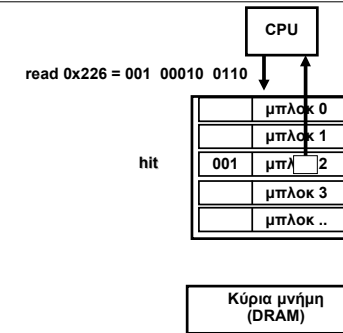
Είναι η θέση κατελιγμένη από κάποιο μπλοκ;  
valid bit (V)



## Ανάγνωση: Cache Hit

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

Σε περίπτωση εύρεσης των δεδομένων στην κρυφή μνήμη, η ΚΜΕ μπορεί να τα λάβει ακόμα και σε 1 κύκλο

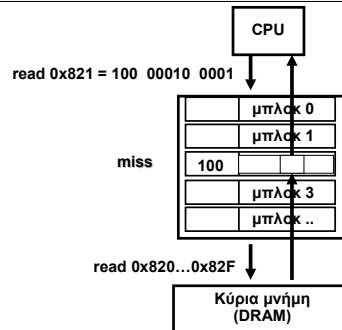


•Αιτήσεις για ανάγνωση: εντολές και δεδομένα

## Ανάγνωση: Cache Miss

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

**Miss penalty:**  
ο χρόνος για την μεταφορά του μπλοκ από κύρια μνήμη και επιστροφή δεδομένων στον επεξεργαστή



•Αιτήσεις για ανάγνωση: εντολές και δεδομένα

## Εγγραφή στην κρυφή μνήμη

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

**Συνοχή δεδομένων:**  
Πώς επηρεάζουν οι κρυφές μνήμες τη σχεδίαση πολυεπεξεργαστικών συστημάτων;

- Μόνο για δεδομένα
- Write Hit – Ενημέρωση κρυφής μνήμης
  - Η νέα τιμή βρίσκεται μόνο στην κρυφή μνήμη
  - Η τιμή στην κύρια μνήμη (ή γενικότερα, στο χαμηλότερο επίπεδο) ενημερώνεται όταν το μπλοκ εκτοπίζεται από την κρυφή μνήμη (victim)
    - Απαιτείται επιπλέον λογική (hardware) για τον έλεγχο της συνοχής των δεδομένων
    - Όλοι οι πυρήνες πρέπει να βλέπουν τα ίδια δεδομένα
- Write Miss
  - Πρέπει το μπλοκ να έρθει (ανάγνωση!) πρώτα στην κρυφή μνήμη από την κύρια μνήμη

## Τι δημιουργεί cache misses;

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- Η πρώτη φορά προσπέλασης ενός μπλοκ
  - Μπλοκ που δεν βρέθηκαν ποτέ μέχρι τώρα στην κρυφή μνήμη
- Λόγω χωρητικότητας της κρυφής μνήμης
  - Η κρυφή μνήμη δεν χωράει όλα τα μπλοκ (ταυτόχρονα)
  - Μπλοκ που τοποθετούνται στην ίδια θέση στην κρυφή μνήμη, συναγωνίζονται για τη θέση αυτή
    - ανάλογα με τη μέθοδο τοποθέτησης
    - ακόμα κι αν άλλο μέρος της κρυφής μνήμης είναι ελεύθερο...

## Χαρακτηριστικά απόδοσης κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- **Hit Rate**
  - Ποσοστό προσπελάσεων μνήμης, όπου τα δεδομένα βρίσκονται στην κρυφή μνήμη
- **Miss Rate**
  - Ποσοστό προσπελάσεων μνήμης, όπου τα δεδομένα δεν βρίσκονται στην κρυφή μνήμη
    - (1-hit rate)
- **Hit Time**
  - Ο χρόνος για την προσπέλαση δεδομένων σε hit
- **Miss Penalty**
  - Ο χρόνος για την προσπέλαση, μεταφορά και τοποθέτηση των δεδομένων miss από την κύρια στην κρυφή μνήμη και στον επεξεργαστή

## Το κόστος των cache misses

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- Χαμένοι κύκλοι ρολογιού
  - Σε αναμονή για προσπέλαση κύριας μνήμης

**Κύκλοι Αναμονής =**  
**Προσπελάσεις μνήμης \* Miss Rate \* Miss Penalty**
- Είναι απλουστευμένο μοντέλο γιατί:
  - Διαφορετικό Miss Rate ανά κατηγορίες εντολών
  - Διαφορετικό Miss Rate για ανάγνωση-εγγραφή
  - Σύνθετη ανάλυση για εκτέλεση εκτός σειράς
    - Ο επεξεργαστής “κρύβει” την καθυστέρηση εκτελώντας κάτι άλλο: πώς υπολογίζεται το miss penalty τότε;
- Βελτίωση της απόδοσης
  - Μείωση του miss rate
  - Μείωση του miss penalty

## Τεχνικές μείωσης miss rate

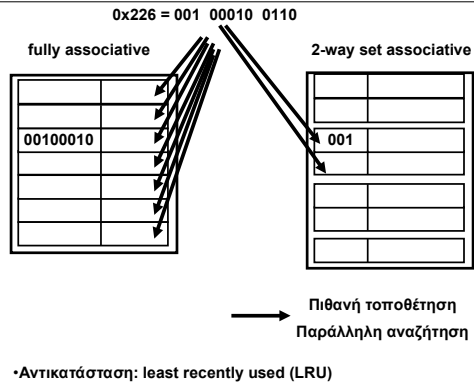
- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- Αντιμετώπιση αιτιών που προκαλούν misses
- Αύξηση χωρητικότητας κρυφής μνήμης
  - Αλλά: μια μεγάλη κρυφή μνήμη μπορεί να είναι πιο αργή (αύξηση hit time)
- Αύξηση του μεγέθους του μπλοκ
  - Προσπάθεια εκμετάλλευσης της τοπικότητας
  - Αλλά: αυξάνει το miss penalty
  - Πιθανόν να αυξάνει τελικά το miss rate, λόγω των λιγότερων μπλοκ στην κρυφή μνήμη
- Ευέλικτες τεχνικές τοποθέτησης των μπλοκ
  - Ωστε να παραμένουν περισσότερο στην κρυφή μνήμη

## Ευέλικτες τεχνικές τοποθέτησης μπλοκ

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

Πιθανή η αύξηση του hit time λόγω πολύπλοκου κυκλώματος



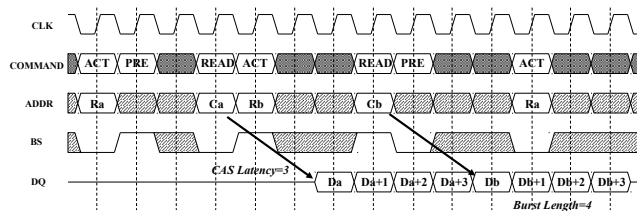
## Τεχνικές μείωσης miss penalty

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

Οι σύγχρονοι επεξεργαστές έχουν L1, L2 και L3 cache μέσα στο ίδιο το chip τους (ίσως και 4ο επίπεδο, ως cache «τελεονταίας ευκαιρίας»)

- Μείωση των χρόνων μεταφοράς μπλοκ
- Βελτιστοποιήσεις στην επικοινωνία με την κύρια μνήμη
  - Έτσι ώστε ένα ολόκληρο μπλοκ να μεταφέρεται με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση (bursts)
- Πολυεπίπεδες ιεραρχίες κρυφής μνήμης
  - Μείωση miss penalty πρώτου επιπέδου (L1)
    - L1: μικρότερο μέγεθος, μεγαλύτερη ταχύτητα
      - Μεγαλύτερο miss rate αλλά miss penalty μικρότερο
    - L2: μεγαλύτερο μέγεθος, μικρότερη ταχύτητα
      - Αργότερη αλλά δεν επηρεάζει hit time επεξεργαστή
    - L3: κοινή για ομάδες πυρήνων

## Ανάγνωση από κύρια μνήμη



## Πολυεπίπεδη οργάνωση κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

Τύπος	Μέγεθος	Χρόνος προσπέλασης	Ρυθμός μεταφοράς
L1	έως 64KB	4ns	50GB/s
L2	έως 8MB	10ns	25GB/s
L3	έως 64MB	20ns	10GB/s

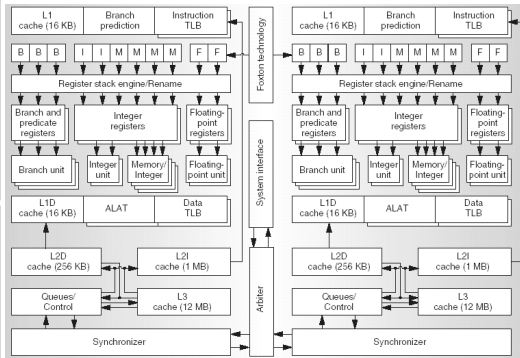
Οι σύγχρονοι επεξεργαστές έχουν ξεχωριστή κρυφή μνήμη L1 για εντολές και δεδομένα. Ποια τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα;

- Παράδειγμα: Pentium4
  - L1 cache: 4 κύκλοι ρολογιού (pipelined: 1)
  - L2 cache: 20 κύκλοι ρολογιού
  - Προσπέλαση στη μνήμη: >100 κύκλοι ρολογιού

## Intel “Montecito”: Επίπεδα κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

**Intel Montecito:**  
1,72 δις  
τρανζίστορ  
2 επεξεργαστές  
Itanium2  
1.8GHz @ 100W



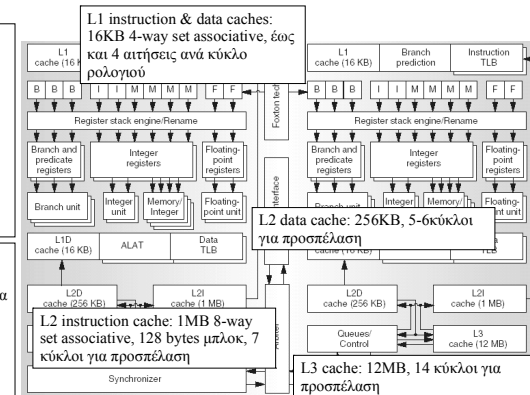
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

25

## Intel “Montecito”: Επίπεδα κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

**Intel Montecito:**  
συνολικά 27MB  
κρυφή μνήμη μέσα  
στο chip



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

26

## Βελτιστοποίηση απόδοσης κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- Αρχιτεκτονικές βελτιώσεις
  - Pipelining
  - Non-blocking – εξυπηρέτηση πολλαπλών αιτήσεων
  - Πολλαπλά επίπεδα κρυφής μνήμης στο chip του επεξεργαστή
- Ο ρόλος του λογισμικού (μεταγλωττιστές)
  - Αναδιοργάνωση προγραμμάτων για αύξηση της τοπικότητας (κυρίως στους βρόχους επανάληψης)
  - Prefetching: μετακίνηση δεδομένων στην κρυφή μνήμη πριν αυτά χρειαστούν στον επεξεργαστή

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

27

## Η απόδοση της κρυφής μνήμης συνοπτικά

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

- Καθοριστική για τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα
- Μείωση του miss rate ή του miss penalty
  - Όμως: η συμπεριφορά της ιεραρχίας μνήμης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες
- Η πραγματική συμπεριφορά
  - Είναι σύνθετη – απαιτούνται εξομοιώσεις πριν τη σχεδίαση νέων συστημάτων
  - Είναι διαφορετική ανά εφαρμογή – δεν υπάρχει ένα μόνο αντιπροσωπευτικό πρόγραμμα
  - Είναι διαφορετική ανά υπολογιστικό σύστημα – desktop, server ή embedded

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κρυφές Μνήμες”

28