

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής  
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών  
2020-21

# Κρυφές Μνήμες

(οργάνωση, λειτουργία και απόδοση)

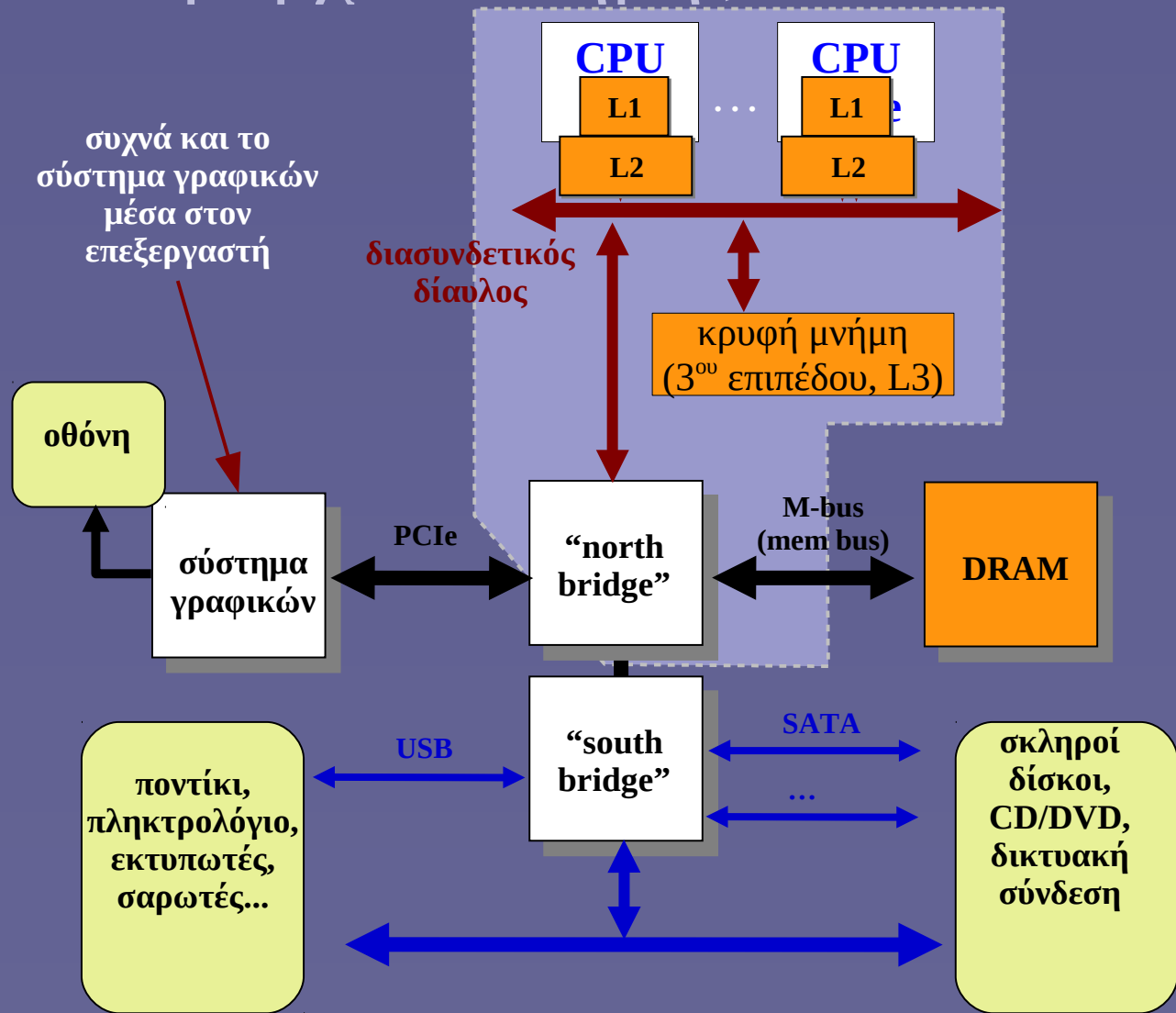
<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

Μ.Στεφανιδάκης



# Ιεραρχία Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης



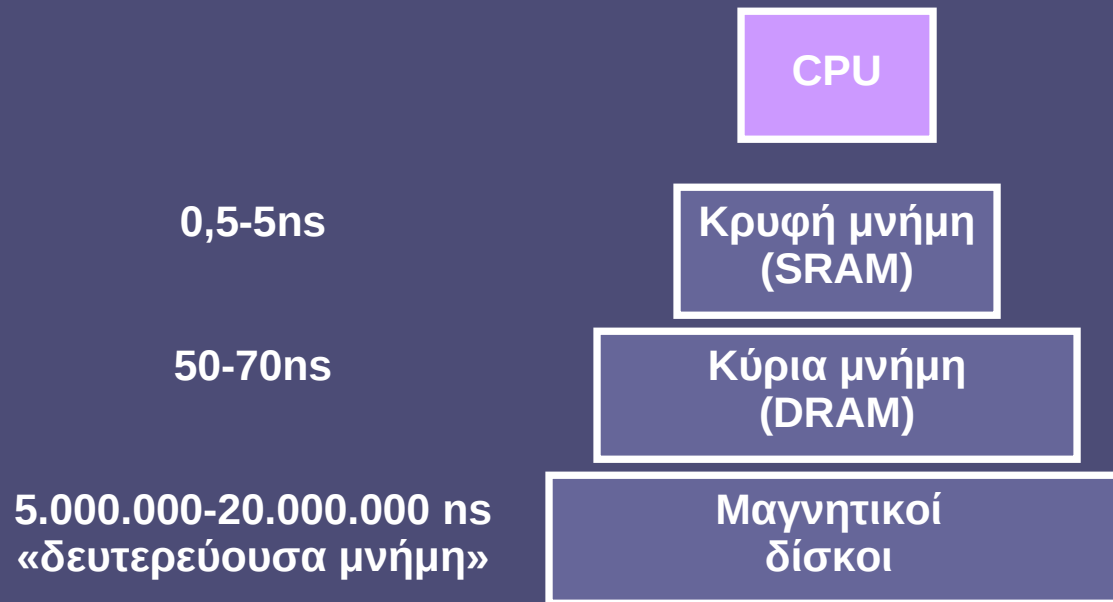
Για βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μνήμης (και του συνολικού υπολογιστικού συστήματος)

# 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**



# Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

- Ιεραρχία Μνήμης

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

- **Χρονική Τοπικότητα**
  - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστεί ξανά στο άμεσο μέλλον
    - Παράδειγμα: οι εντολές ενός βρόχου (loop)
- **Εφαρμογή:**
  - Δεδομένα – εντολές που βρίσκονται ήδη κοντύτερα στον επεξεργαστή (π.χ. στην κρυφή μνήμη) θα προσπελαστούν πολύ γρηγορότερα

# Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

- Ιεραρχία Μνήμης

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

- **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

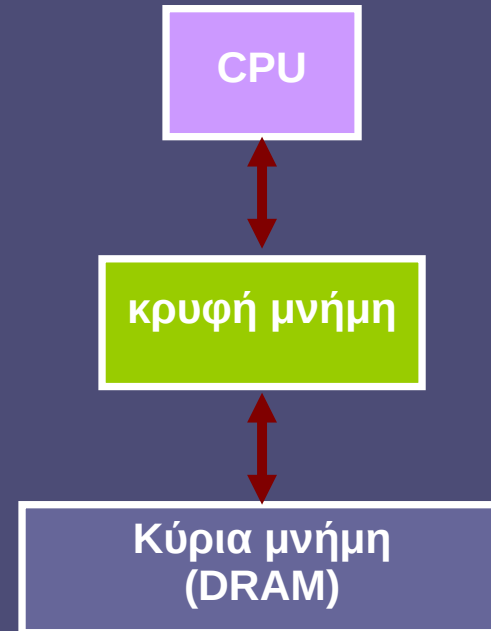
- Σημαντικό τμήμα στην ιεραρχία μνήμης
- Εξέλιξη συστημάτων κρυφής μνήμης
  - 1962: οι πρώτες ιεραρχίες μνήμης (Atlas computer)
    - Όχι όμως κρυφή μνήμη
  - 1965: η πρώτη περιγραφή κρυφής μνήμης (Wilkes)
    - Ο πρώτος υπολογιστής με κρυφή μνήμη (IBM 360/85)
  - 1968: η πρώτη χρησιμοποίηση του όρου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

# Απλό μοντέλο ιεραρχίας μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

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

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

# 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

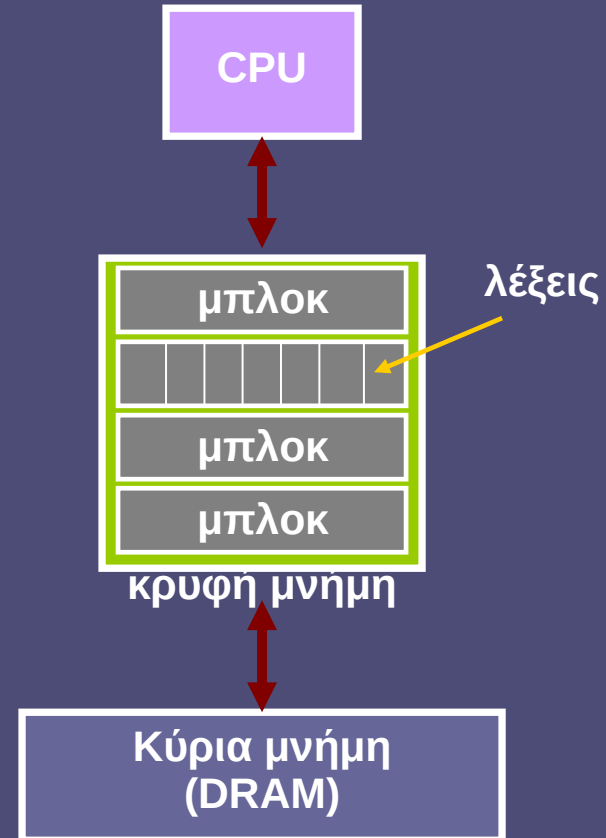
- **Αναζήτηση δεδομένων**
  - Ο επεξεργαστής ζητά **πάντοτε** τα δεδομένα/εντολές από το κοντινότερο σε αυτόν επίπεδο
  - Τα δεδομένα υπάρχουν στο επίπεδο αυτό: **hit**
  - Τα δεδομένα δεν βρίσκονται στο επίπεδο αυτό: **miss**
    - Η αίτηση προωθείται στο επόμενο (χαμηλότερο) επίπεδο
    - Όταν βρεθεί,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

# Μπλοκ (γραμμές) κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

- 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

Οι σύγχρονοι επεξεργαστές διαθέτουν κρυφές μνήμες (L1) με μέγεθος μπλοκ ίσο με 64 bytes



# 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  
 **$(\text{αριθμός μπλοκ}) \bmod (\text{θέσεις στην κρυφή μνήμη})$** 
    - 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

Αριθμός μπλοκ = 0x22

0x226 = 001 00010 0110

θέση μπλοκ = 2

0x7E9 = 011 11110 1001

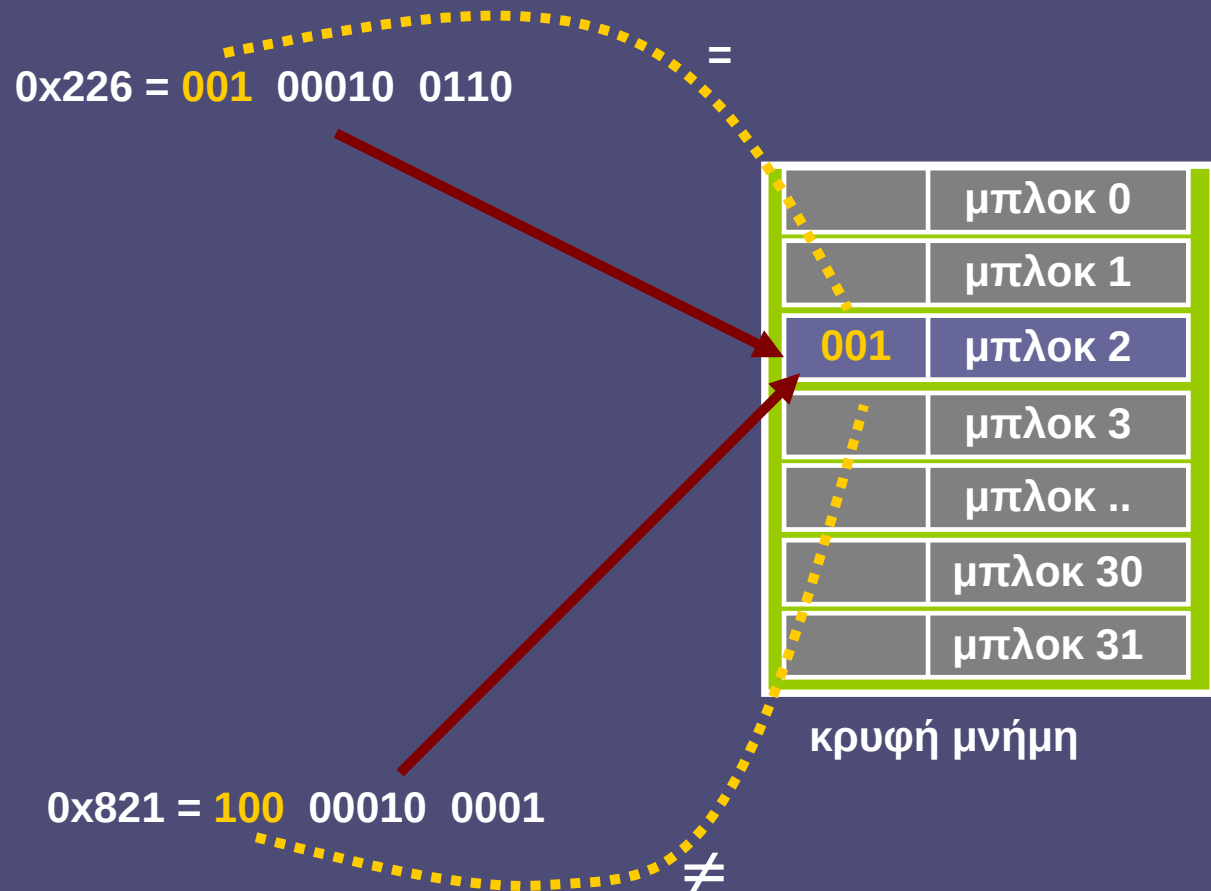
0x821 = 100 00010 0001



κρυφή μνήμη

# Ποιο μπλοκ βρίσκεται σε κάθε θέση;

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη



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

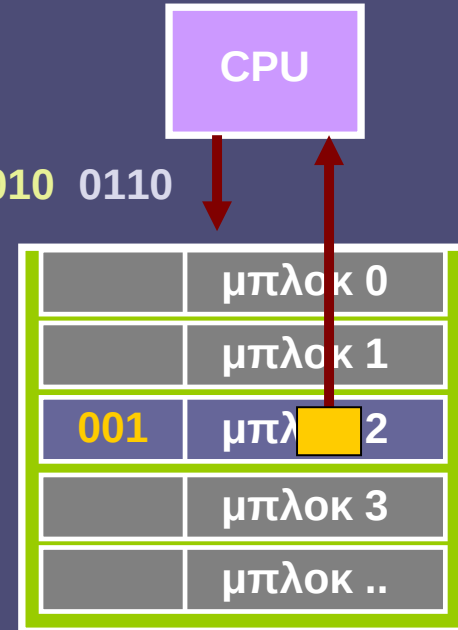
# Ανάγνωση: Cache Hit

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

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

read 0x226 = 001 00010 0110

hit



Κύρια μνήμη  
(DRAM)

• 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

read 0x821 = 100 00010 0001

miss

read 0x820...0x82F

CPU

μπλοκ 0

μπλοκ 1

100

μπλοκ 3

μπλοκ ..

Κύρια μνήμη  
(DRAM)

• 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**
  - Όστε να παραμένουν περισσότερο στην κρυφή μνήμη

# Ευέλικτες τεχνικές τοποθέτησης μπλοκ

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη

Πιθανή η αύξηση του hit time λόγω πολύπλοκου κυκλώματος



Πιθανή τοποθέτηση  
Παράλληλη αναζήτηση

• Αντικατάσταση: least recently used (LRU)

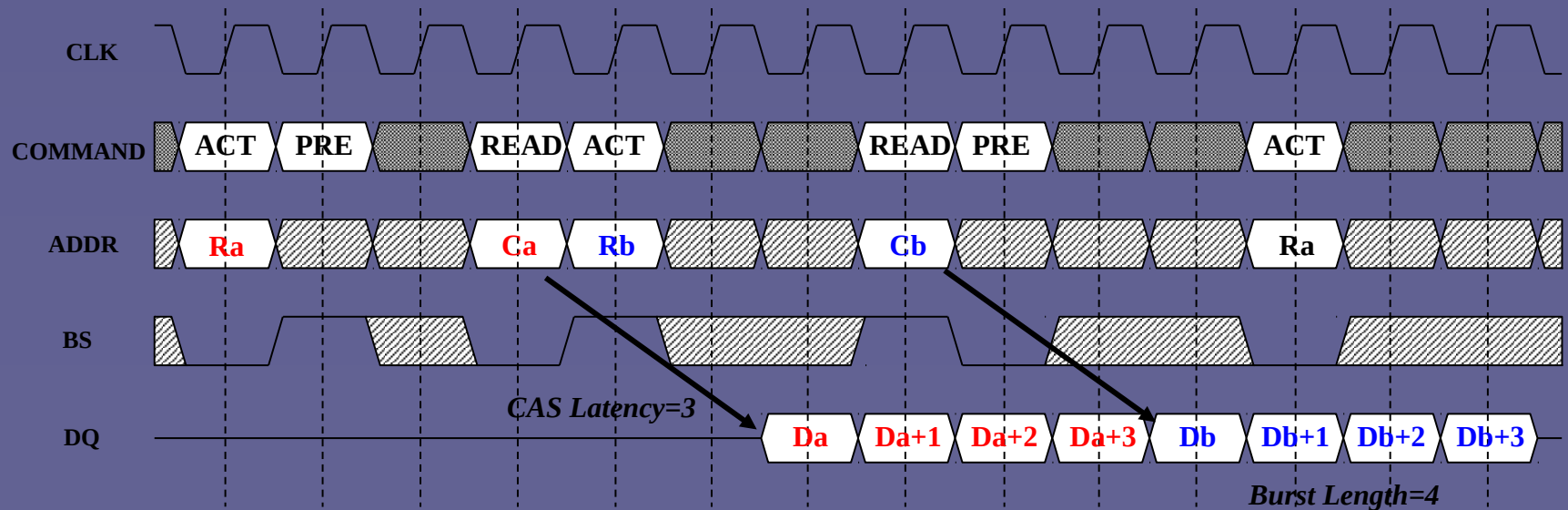
# Τεχνικές μείωσης miss penalty

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

Οι σύγχρονοι επεξεργαστές έχουν L1, L2 και L3 cache μέσα στο ίδιο το chip τους

- 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

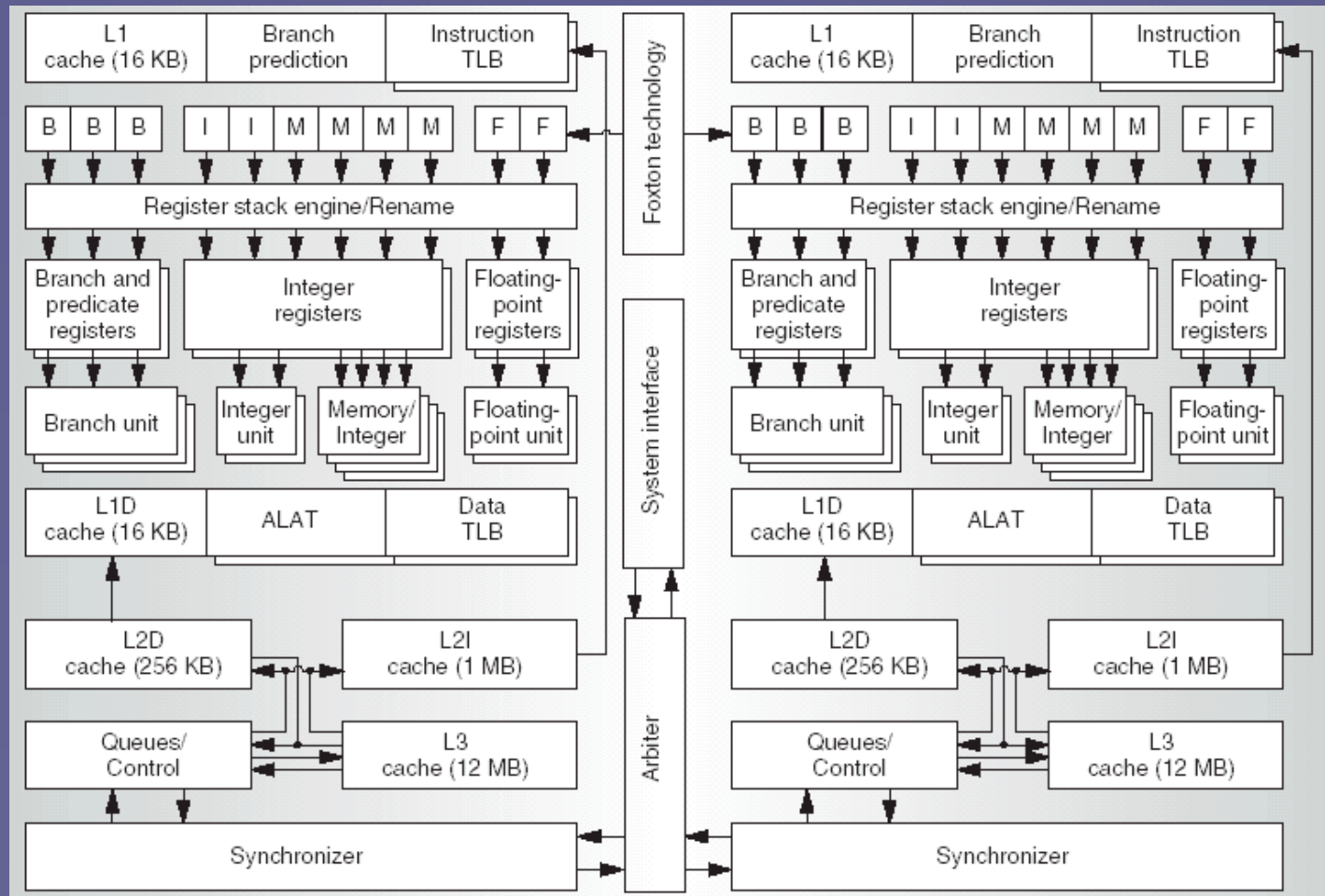


# Intel “Montecito”: Επίπεδα κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

## Intel Montecito:

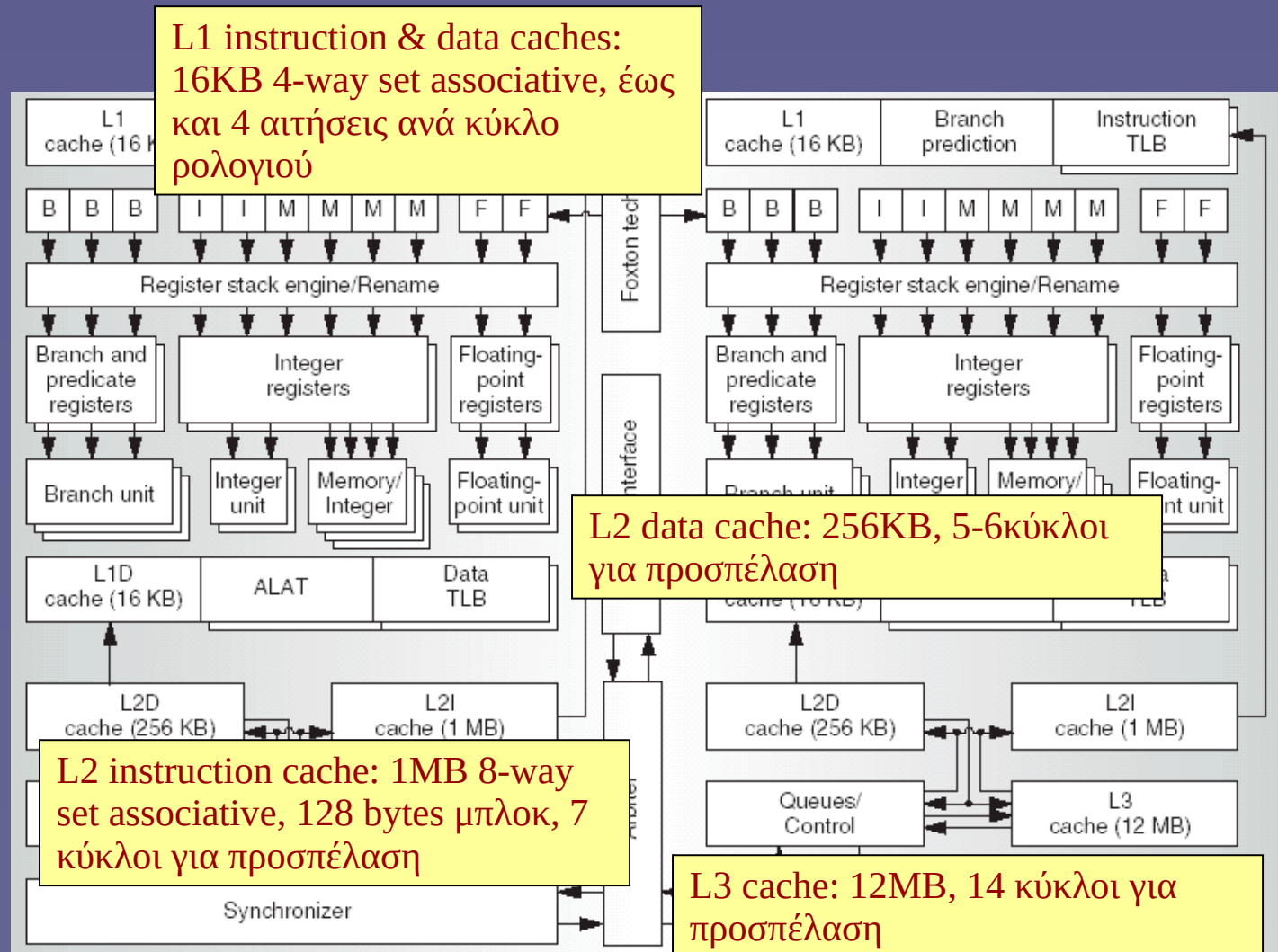
1,72 δις  
τρανζίστορ  
2 επεξεργαστές  
Itanium2  
1.8GHz @ 100W



# Intel “Montecito”: Επίπεδα κρυφής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Κρυφή Μνήμη
- Απόδοση κρυφής μνήμης

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



# 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

# 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