

# Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

(Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

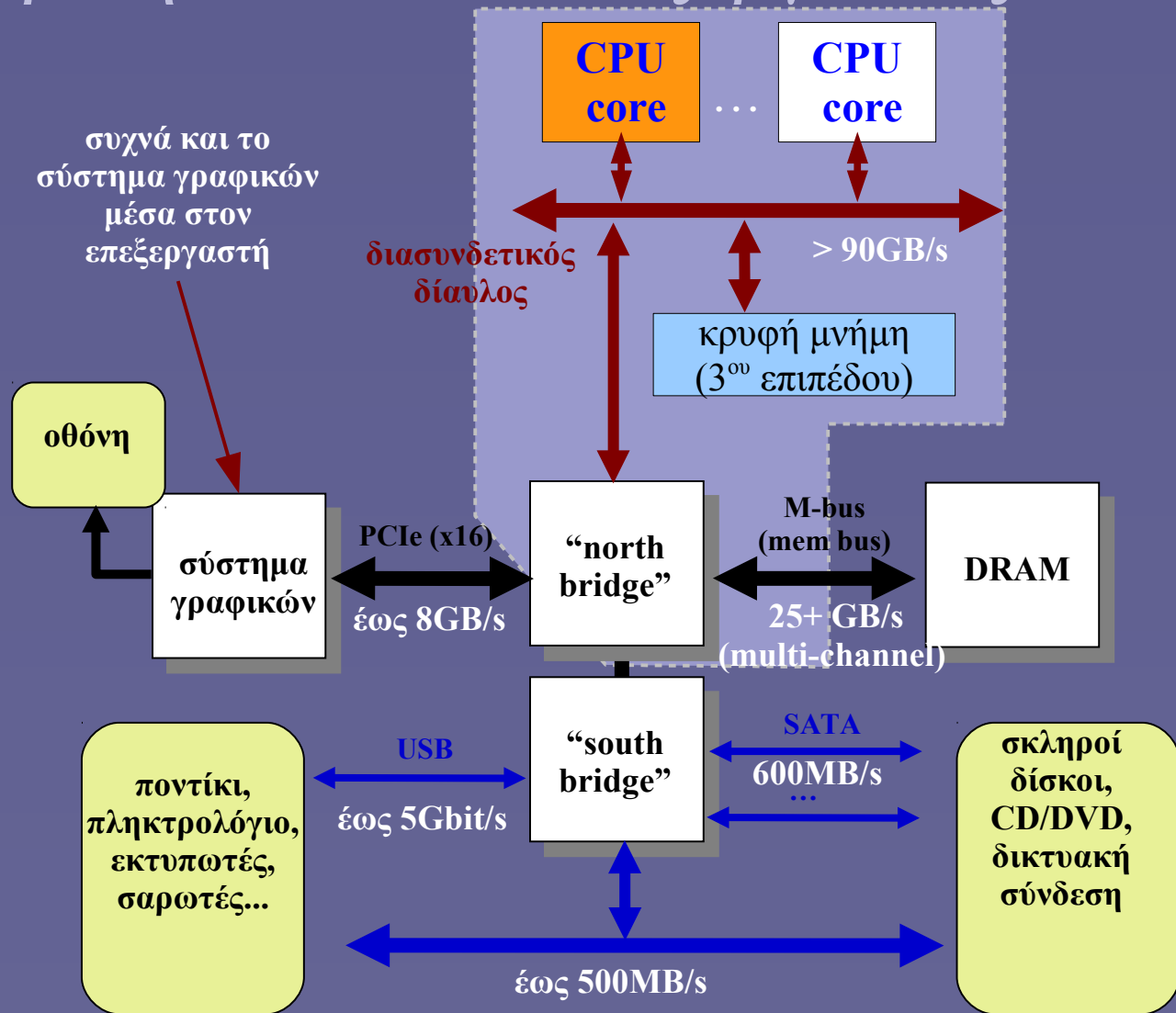
<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

Μ.Στεφανιδάκης



# Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

- Απόδοση ΚΜΕ



οι ρυθμοί μεταφοράς που δίνονται είναι οι θεωρητικά μέγιστοι!

# Επανάληψη: Απόδοση ΚΜΕ

- Απόδοση ΚΜΕ

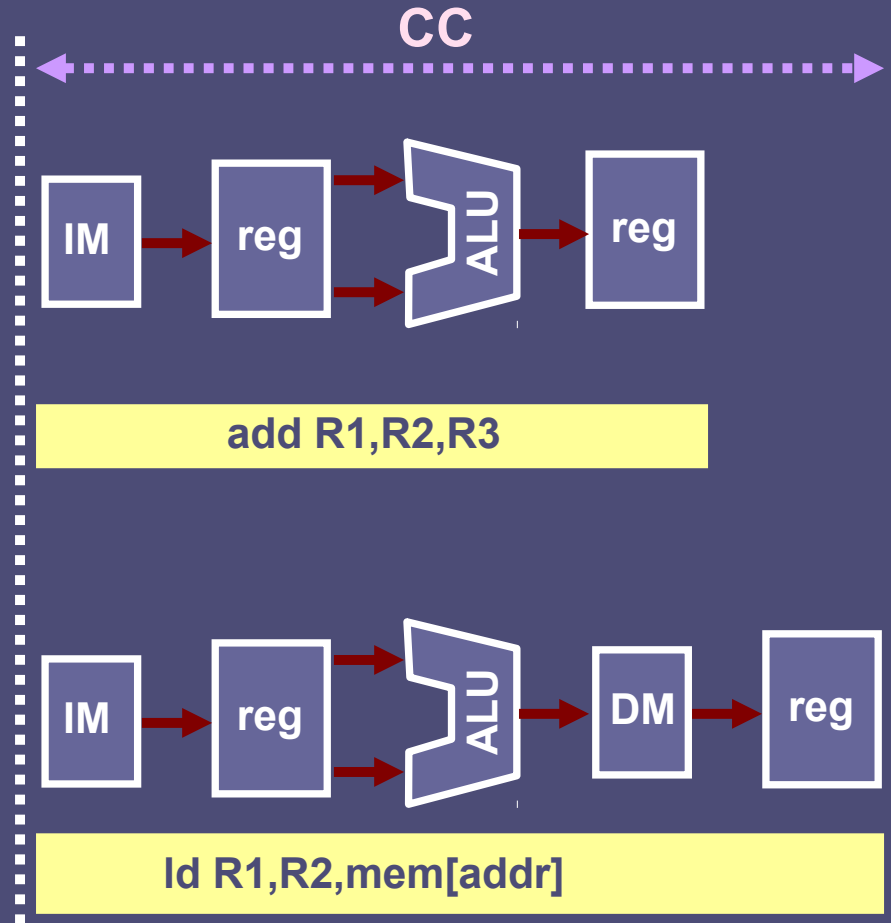
- Υπολογιστικό σύστημα
  - Η απόδοση εξαρτάται από **όλα** τα επιμέρους τμήματά του
    - Υλικό και λογισμικό
- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
  - Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;

$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

# ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου

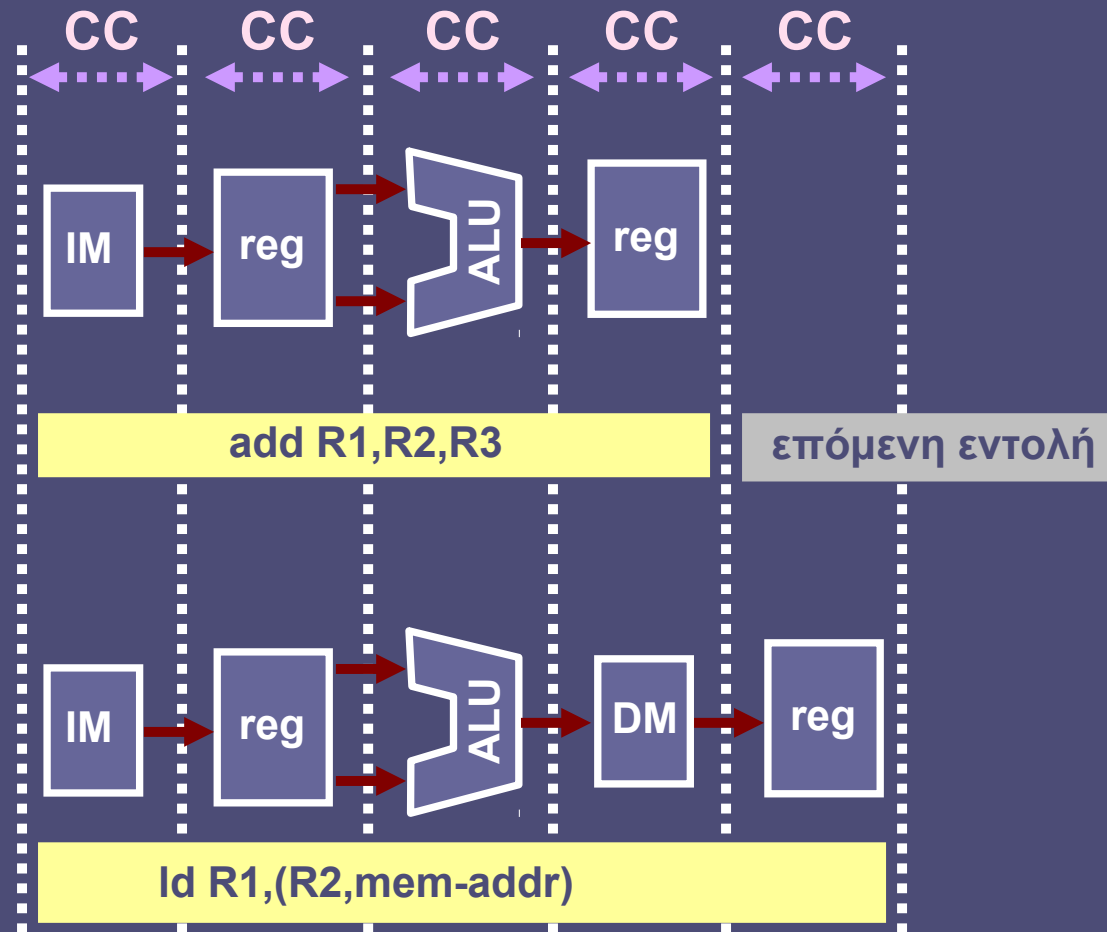
Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού  
 $CPI = 1$   
 $CC =$  διάρκεια αργότερης εντολής



# ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

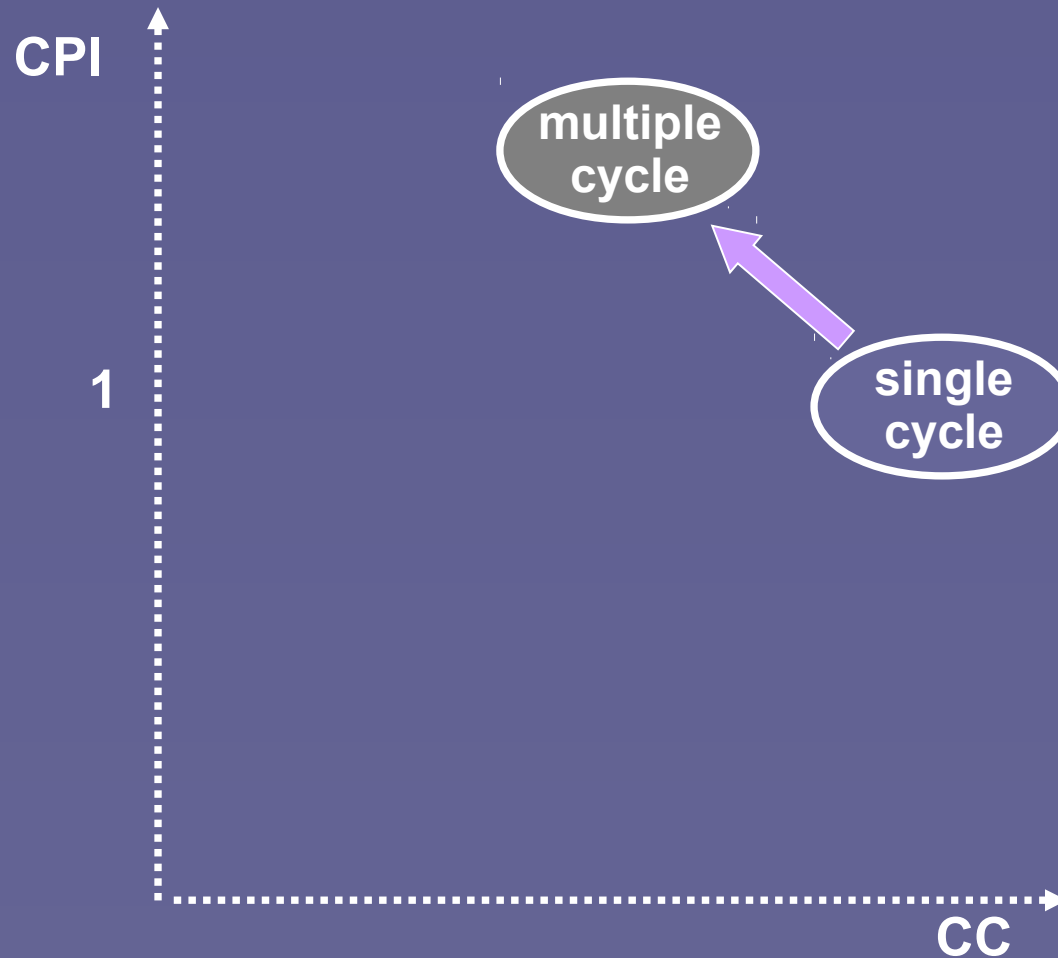
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό κύκλων ρολογιού  
 $CPI > 1$   
CC = διάρκεια αργότερου σταδίου



# Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

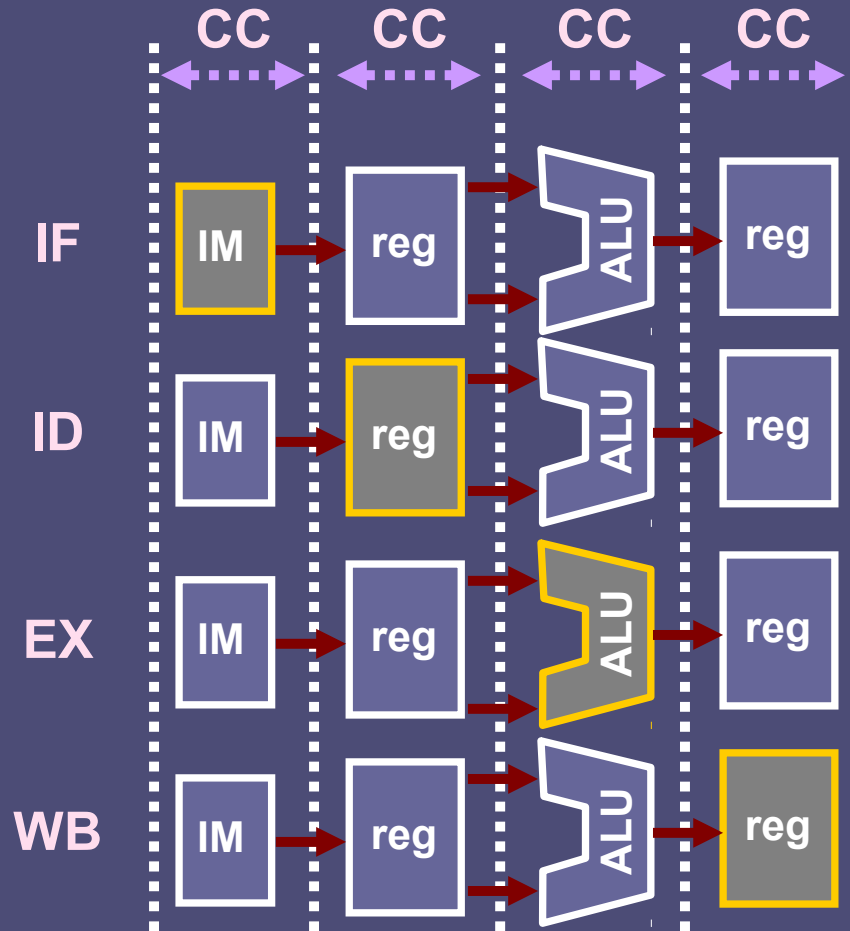
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



# Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Σε κάθε κύκλο, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!



# Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

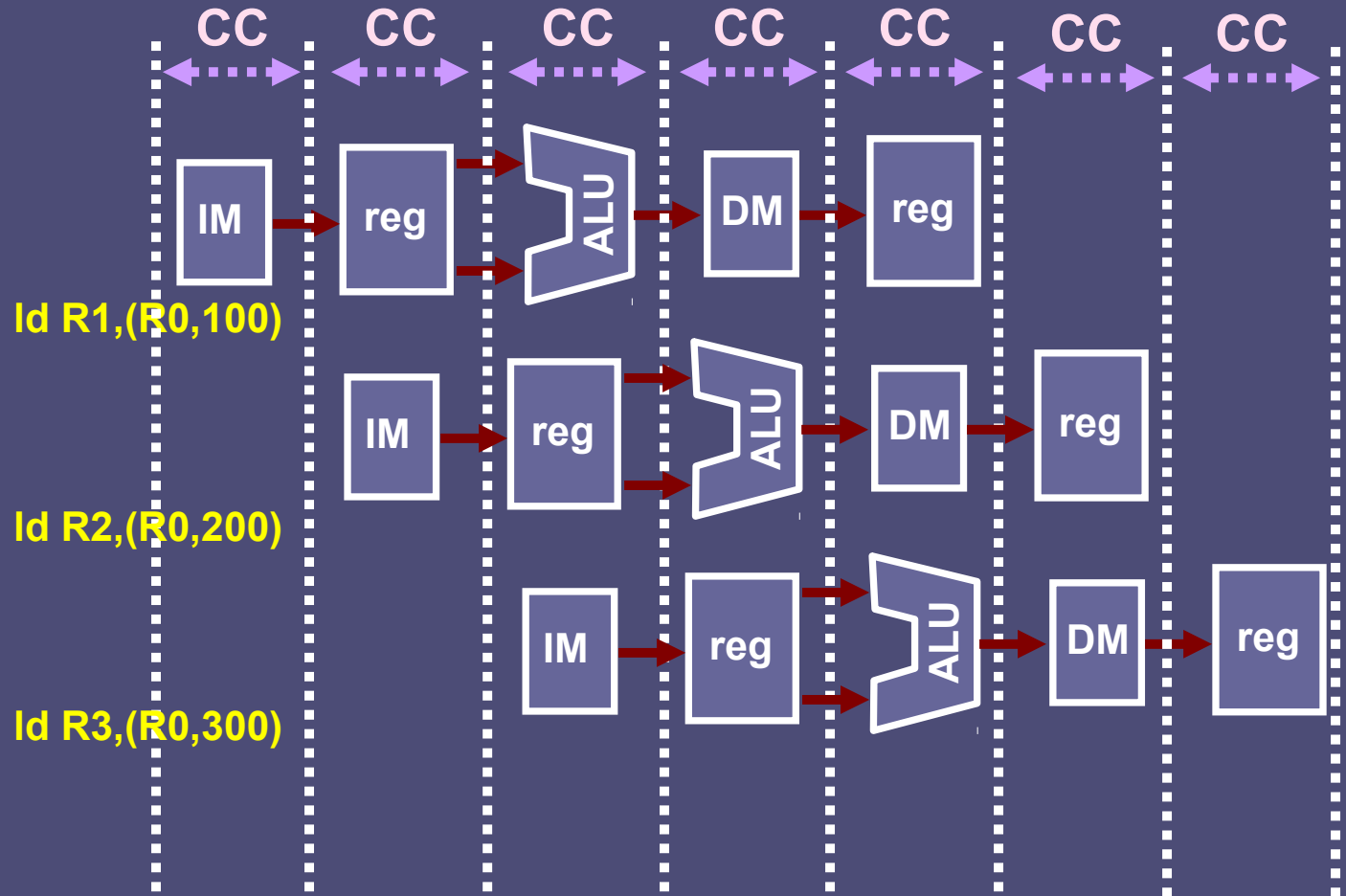
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- **ILP**

- **Instruction Level Parallelism (ILP)**
  - Παράλληλη (ταυτόχρονη) εκτέλεση μεταξύ εντολών
- **Pipelining**
  - Επικάλυψη εκτέλεσης πολλαπλών εντολών
    - Την ίδια στιγμή
    - Βαθμίδες pipeline (μία ανά CC)
  - Βασικό στοιχείο αύξησης απόδοσης σύγχρονων επεξεργαστών
  - Στόχος
    - Να μειωθεί το CC, αλλά ταυτόχρονα
    - το CPI να παραμείνει 1



# Αρχές τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



•  
;

Ποιος ο χρόνος  
εκτέλεσης μιας  
εντολής;  
Κάθε πότε  
ολοκληρώνεται  
μια εντολή;

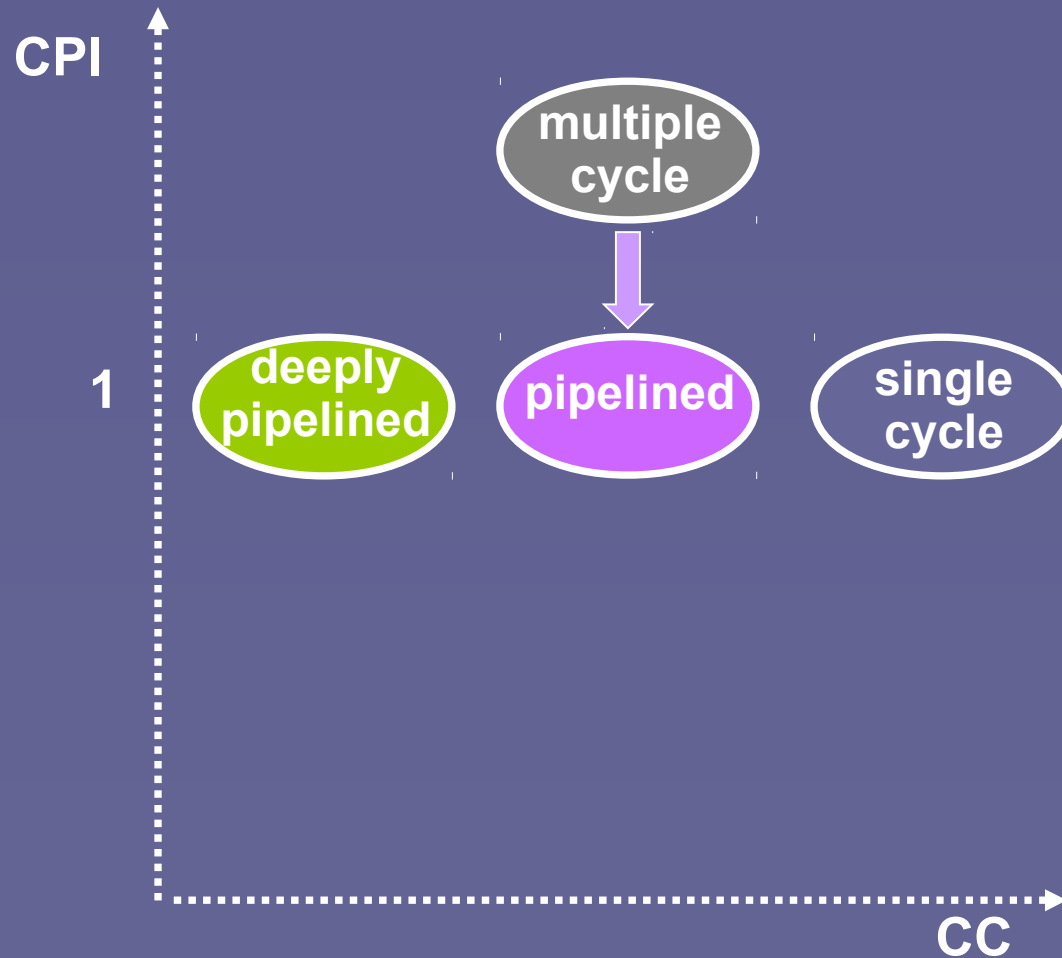
# Απόδοση τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εντολής
  - “latency”
  - Δεν αλλάζει! (διάσχιση pipeline)
- Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών
  - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού
    - Ολοκληρώνεται μια εντολή
    - Μια νέα ξεκινά την εκτέλεσή της
  - Η ιδανική περίπτωση...αλλά
    - Απόδοση συστήματος μνήμης - αποκωδικοποίηση εντολών;
    - Ανάγκη ταυτόχρονης χρήσης ίδιων βαθμίδων pipeline;
    - Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων εντολών;
    - Διακλαδώσεις;

# Απόδοση ιδανικού pipeline

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**



# Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- **Αδυναμία χρήσης μιας βαθμίδας**
  - Structural hazard
  - Η βαθμίδα χρησιμοποιείται από άλλη εντολή
  - Αποφεύγεται με σωστή σχεδίαση
- **Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων**
  - Data hazard
  - Τα αναγκαία δεδομένα για την εκτέλεση μιας εντολής δεν είναι διαθέσιμα
    - Υπολογίζονται από προηγούμενη εντολή
  - Αντιμετωπίζεται (εν μέρει) με πρόσθετο υλικό
    - Μηχανισμός forwarding - bypassing

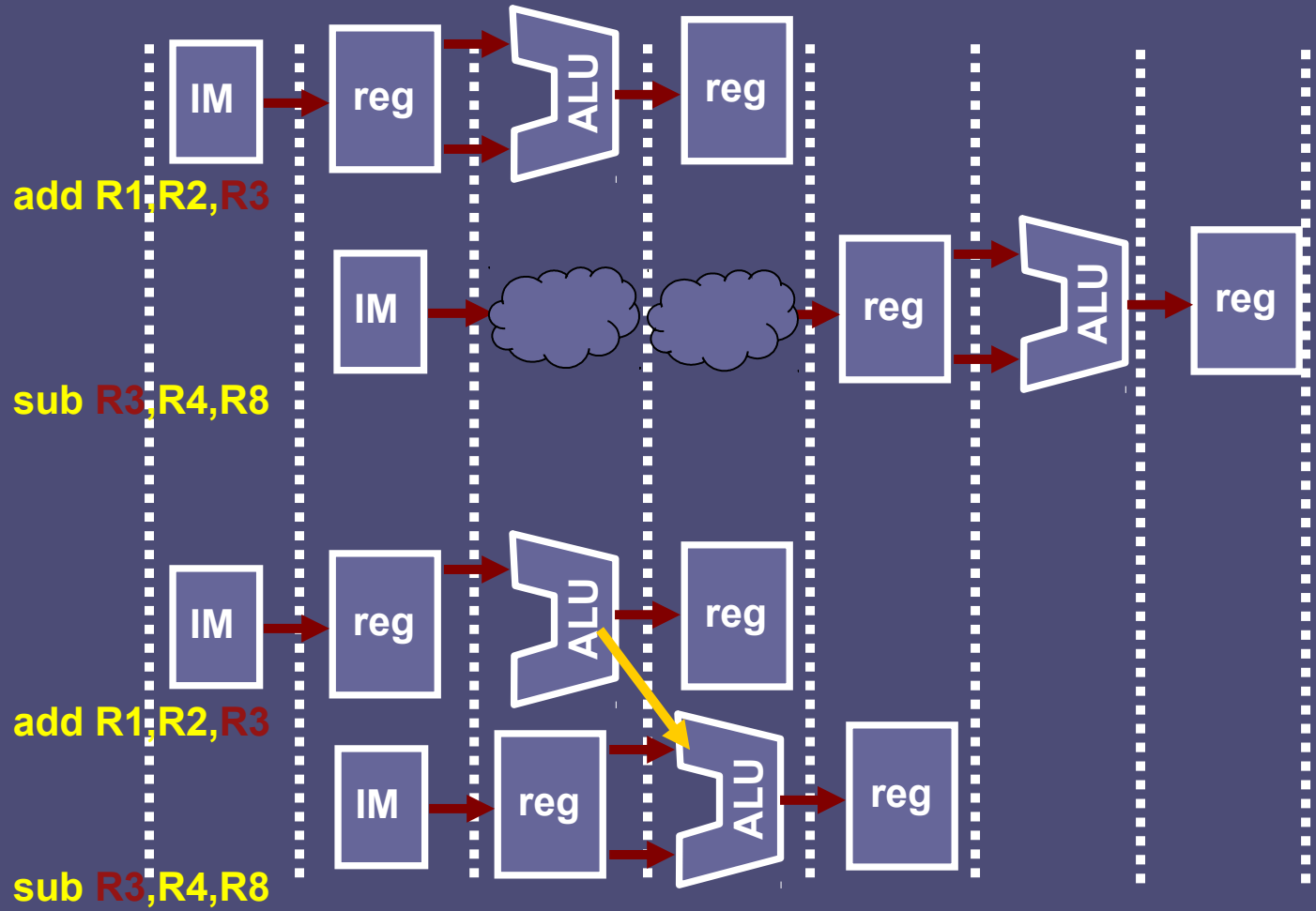
# Forwarding - bypassing

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



## Pipeline bubbles

Δεν αποφεύγονται  
πάντοτε!



# Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**

- **Διακλαδώσεις**
  - Control (branch) hazard
  - Η ροή της εκτέλεσης αλλάζει
    - Οι εντολές που έχουν μπει στο pipeline δεν είναι οι σωστές!
  - Πρόβλεψη διακλαδώσεων
    - Δυναμικές μέθοδοι στο υλικό του επεξεργαστή (διατήρηση ιστορίας προηγούμενων διακλαδώσεων)
    - Συσχέτιση με αποφάσεις για άλλες διακλαδώσεις
    - σήμερα: >90% σωστές προβλέψεις
  - Σε περίπτωση λάθους πρόβλεψης
    - Απόρριψη όλων των εντολών στο pipeline
    - Χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψη τα αποτελέσματά τους

# Pipelining και διακοπές-σφάλματα

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**

- **Interrupts - Exceptions**

- Ποια εντολή στο pipeline προκάλεσε τη διακοπή;

- **Διαδικασία**

- Διακοπή εκτέλεσης εντολής
  - Ολοκλήρωση προηγούμενων εντολών στο pipeline
  - Άδειασμα pipeline (flush) από τυχόν επόμενες εντολές
  - Μετάβαση σε προκαθορισμένη διεύθυνση
    - Καθορίζεται από το Λειτουργικό Σύστημα

# Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός ILP

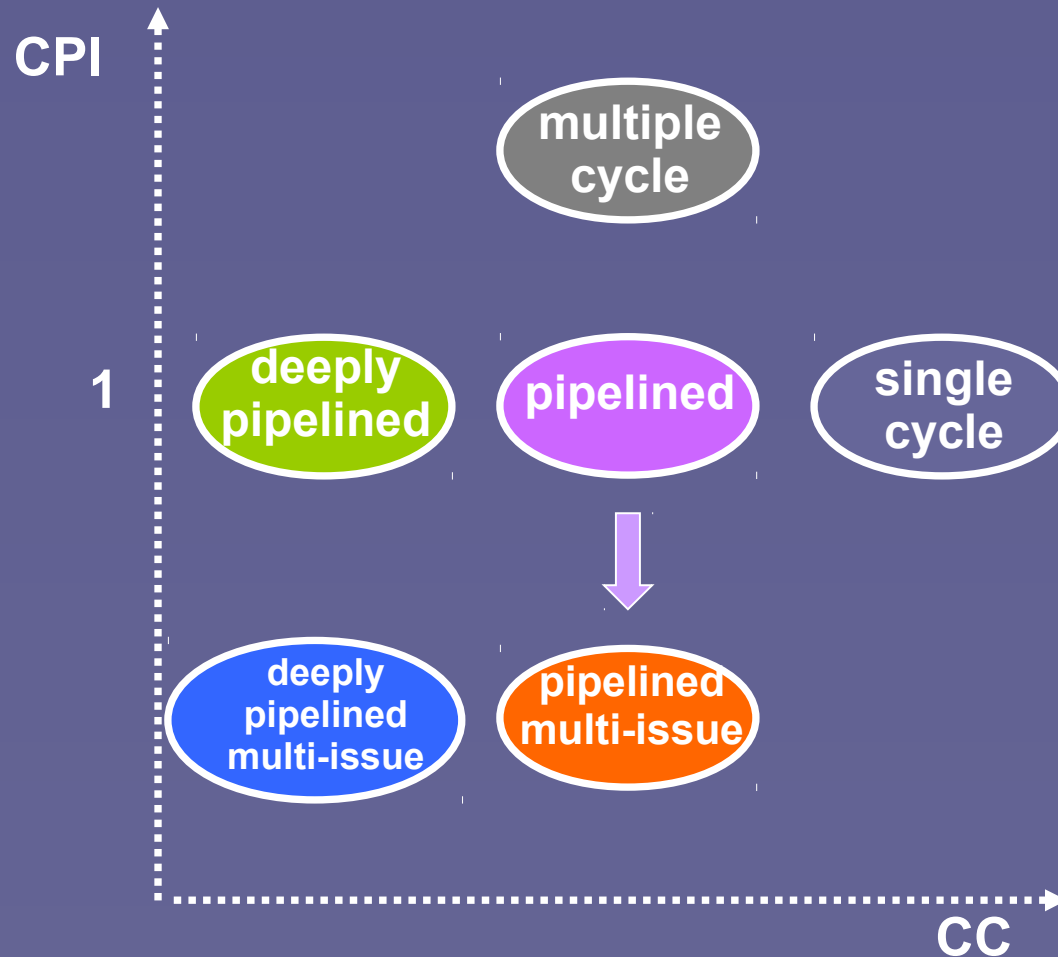
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Ο στόχος:  $CPI < 1$** 
  - Η αλλιώς: ολοκλήρωση πολλών εντολών ανά κύκλο ρολογιού
    - Πολλαπλές βαθμίδες εκτέλεσης
    - Σε κάθε κύκλο ξεκινά η εκτέλεση **πολλαπλών** νέων εντολών
- **Πολλαπλή εκτέλεση (multiple-issue)**
  - Στατική πολλαπλή εκτέλεση
    - Ο μεταγλωττιστής αποφασίζει κατά κύριο λόγο ποιες εντολές θα εκτελεστούν ταυτόχρονα
  - Δυναμική πολλαπλή εκτέλεση
    - Οι αποφάσεις εκτέλεσης λαμβάνονται από την ΚΜΕ



# Απόδοση multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP



# Εικαζόμενη εκτέλεση

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Speculative Execution**
  - Κλειδί για την αύξηση του βαθμού παραλληλίας σε επίπεδο εντολών
    - Όταν προβλέπεται πολλαπλή εκτέλεση εντολών
  - Πρόβλεψη ροής εκτέλεσης και αποτελεσμάτων
    - Για την επίτρεψη εκτέλεσης επόμενων εντολών που (ίσως) εξαρτώνται από την τρέχουσα εντολή
    - Προσωρινή αποθήκευση έως ότου τα δεδομένα να μην είναι πλέον εικαζόμενα
    - Διόρθωση λάθους πρόβλεψης

# Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Επεξεργαστές VLIW**

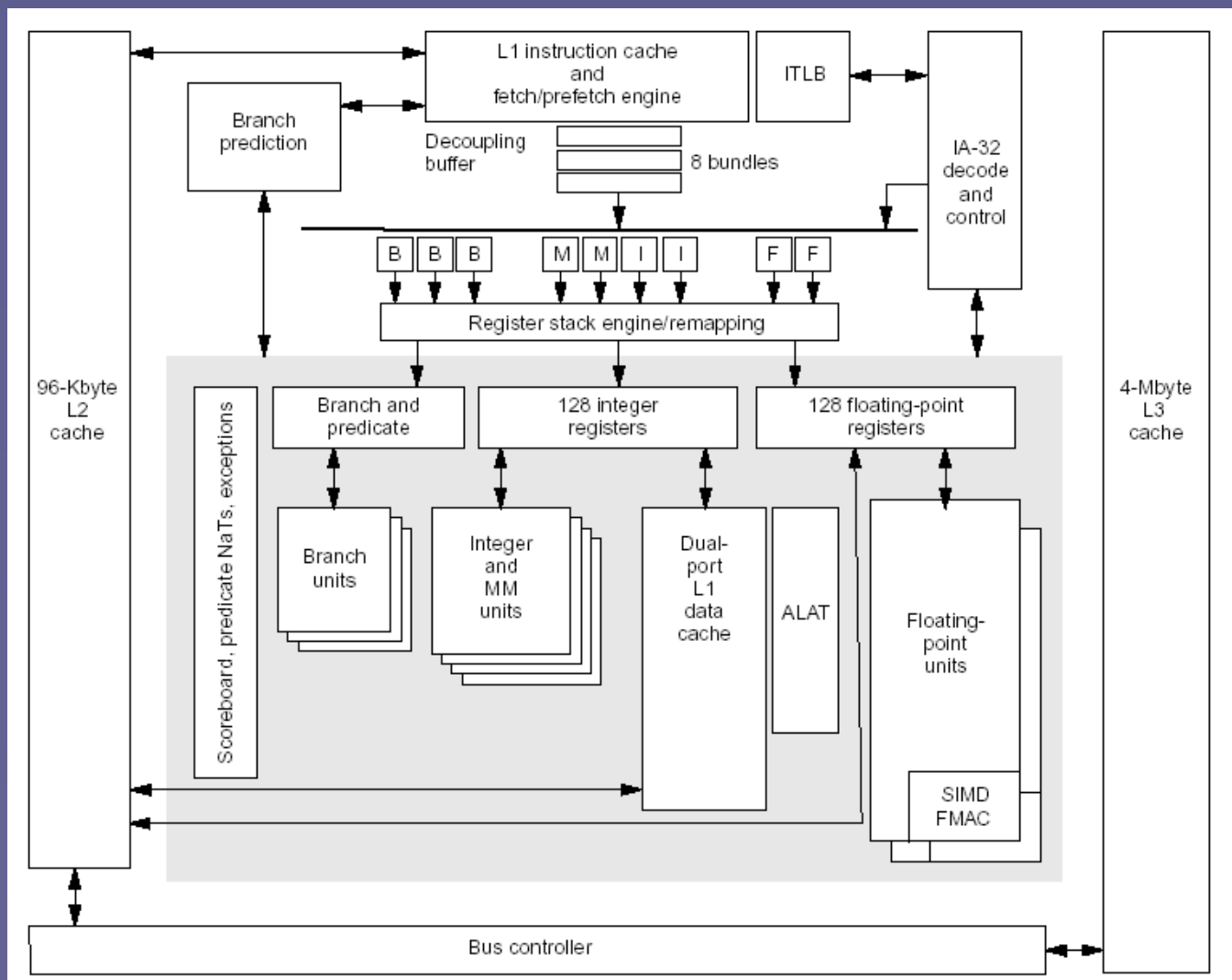
- Very Long Instruction Word
- Πακέτα πολλαπλών εντολών
  - Παράλληλη εκτέλεση
  - Δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί εντολών στο ίδιο πακέτο
- Ο μεταγλωττιστής συγκροτεί τα πακέτα εντολών
- Ελέγχει σε (μεγάλο βαθμό)
  - Αλληλεξαρτήσεις – αλληλουχίες εντολών
  - Πρόβλεψη διακλαδώσεων

# Intel Itanium processor

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

**i**

Η Intel είχε ονομάσει την αρχιτεκτονική αυτή **EPIC** (explicitly parallel instruction computer)



# Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Επεξεργαστές superscalar**
  - Ο επεξεργαστής ελέγχει σε κάθε κύκλο αν μπορεί να ξεκινήσει την εκτέλεση μιας ή περισσότερων εντολών
    - Πολλαπλές μονάδες εκτέλεσης
    - Δυναμική απόφαση ανάθεσης εντολών σε μονάδες
    - **Εκτέλεση εκτός σειράς (out-of-order execution)**
  - Ο κώδικας εκτελείται πάντα σωστά
    - Ανεξάρτητα από μεταγλώττιση
  - Intel IA-32/64 (Pentium και μετά), PowerPC...

# IBM Power4 processor

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

