

New Abstractions For Data Parallel Programming

Θαμεσ Χ. Βροδμαν
Δεπαρτμεντ οφ Χομπυτερ Σχιενχε
Υνιπερσιτυ οφ Ιλλινοισ
βροδμαν2@ιλλινοισ.εδυ

Ιν χολλαβορατιον ωιτη:
Βασιλιο Φραγουελα, Μαρτσα Γαρζαρκον, Δαβιδ Παδουα

UPCRC Illinois
Universal Parallel Computing
Research Center



Higher Level Operators

- Τηρε ισ στιλλ μυχη ροομ φορ αδωανχεσ ιν παραλλελ προγραμμαμινγ
- Ωηατ δο ωε ωαντ το χοντρολ?
 - Λοχαλιτψ
 - Γρανυλαριτψ
 - Δατα Διστριβυτιον
 - Λοαδ Βαλανχε
- Ιντροδυχε νεω δατα τψπεσ ανδ ηιγηερ λεπελ οπερατορσ το ραισε τηε λεπελ οφ αβστραχτιον
- Ωαντ τηεσε οπερατορσ το βε παραλλελ (δατα παραλλελ)
 - Αυτοματιχ δετεχτιον οφ παραλλελισμ διφφιχυλτ



Data Parallel Advantages

- Σχάλαβλε προγράμσ αρε δατα παραλλελ
- Δατα παραλλελ προγράμσ ρεσεμβλε χονπεντιοναλ, σεριαλ προγράμσ.
 - Παραλλελισμ ισ ενχαπσυλατεδ
 - Παραλλελισμ ισ στρυχυρεδ
- Πορταβλε
 - Χαν ρυν ον ανψ χλασσ οφ μαχηνε φορ ωηιχη τηε αππροπριατε οπερατορσ αρε ιμπλεμεντεδ
 - Σηαρεδ/Διστριβυτεδ Μεμορψ, ΣΙΜΔ, ΓΠΥσ, ετχ.
- Χοντρολ δετερμιναχψ
 - Ενφορχε
 - Ενχαπσυλατε νον δετερμιναχψ



Programs with Data Parallel Operators

- Προγραμμασ ωιλλ βε α σεθυενχε οφ δατα παραλλελ οπερατοροσ (πριμιτιωε οπερατιονοσ) αππλιεδ το τηεσε δατα τυπεοσ



Outline

- Ηιεραρχηιχαλλψ Τιλεδ Αρραψσ
- Νον Νυμεριχαλ Χομπυτατιονσ
- Χομπυτατιονσ ωιτη Χονφλιχτινγ Χομπυτατιονσ
- Χονχλυσιονσ



Which operators?

- Τη ερείσ αν εξτενσιώε χολλεχτιόν οφ δατα παραλλελ οπερατορσ
 - ΑΠΛ, Φ90, Ματλαβ
 - ΣΕΤΛ, ΛΙΣΠ
 - Ετχ.
- Τη εσε οπερατορσ αλλω εξπρεσσιόν οφ παραλλελισμ, βυτ αρε νοτ δεσιγνεδ το εξπλιχιτλψ χοντρολ:
 - Λοχαλιτψ
 - Γρανυλαριτψ
 - ...

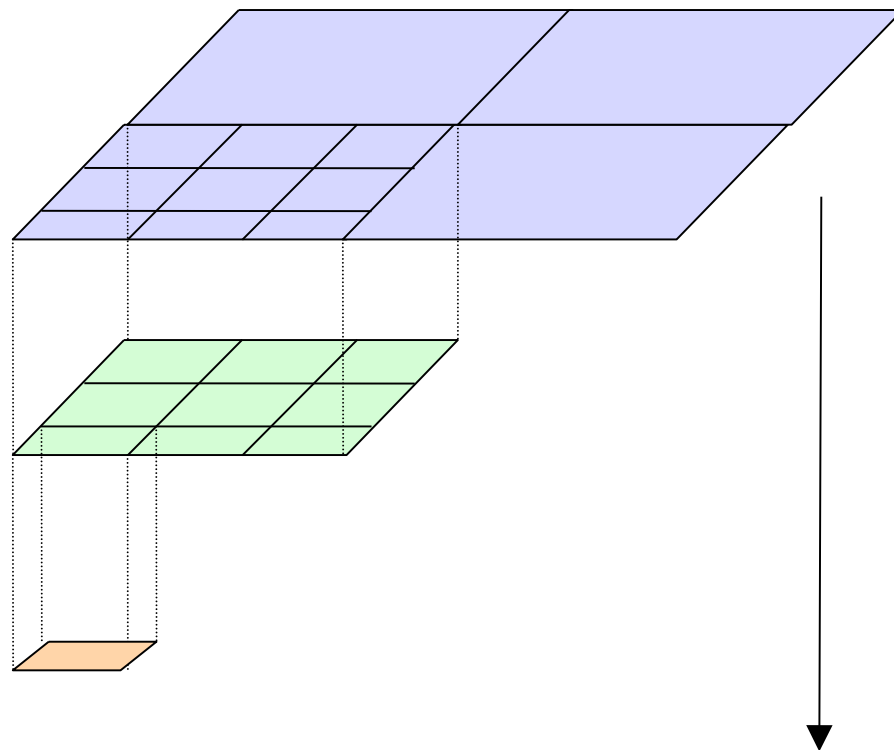


Arrays

- Φορ αρραψσ, ωε ιντροδυχεδ α νοτατιον χαλλεδ τηε Ηιεραρχηιχαλλψ Τιλεδ Αρραψ (ΗΤΑ)
 - Τραδιτιοναλ Φ90 αρραψ οπερατορσ
 - Τιλινγ
- Μακεσ τιλεσ φηρστ χλασσ οβφεχτο
 - Ρεχογνιζεσ τηε ιμπορτανχε οφ τιλινγ το χοντρολ:
 - Λοχαλιτψ
 - Δατα Διστριβυτιον
 - Γρανυλαριτψ
 - Ρεφερενχεδ εξπλιχιτλψ
 - Εξτενδεδ αρραψ οπερατιονσ το οπερατε ωιτη τιλεσ



Hierarchically Tiled Arrays



Διστριβυτεδ

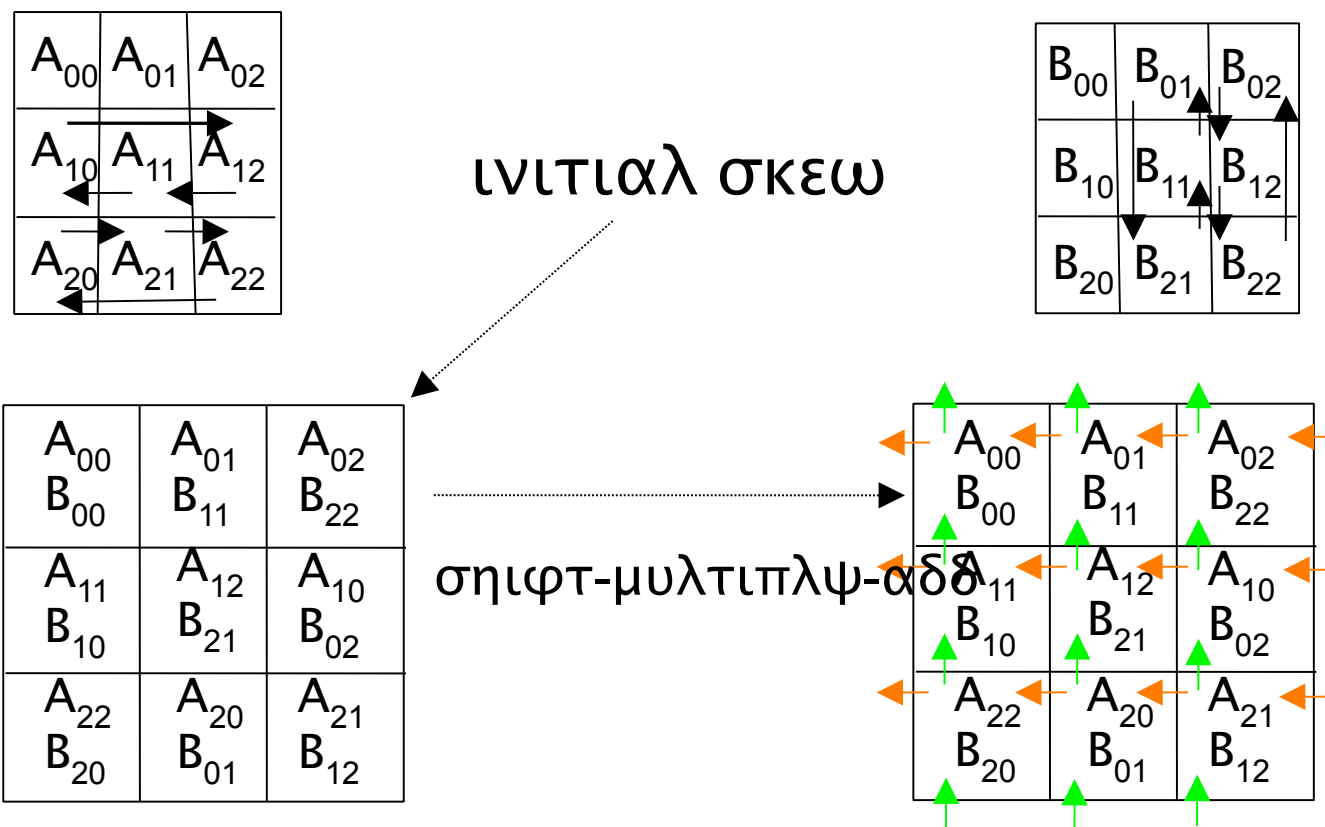
Μυλτιχορε

Λοχαλιψ

Higher Level HTA Operations

- Ελεμεντ-βψ-ελεμεντ οπερατιονσ, ρεδυχτιον, χιρχυλαρ σηιφτ, ρεπλιχατε, τρανσποσε, ΜαπΡεδυχε, ετχ
- Προγραμμαερσ χαν χρεατε νεω χομπλεξ παραλλελ οπερατορσ τηρουγη τηε πριμιτιωεσ ημαπ
 - Αππλιεσ υσερ δεφινεδ οπερατορσ το εαχη τιλε οφ τηε HTA
 - Ανδ χορρεσπονδινγ τιλεσ ιφ μυλτιπλε HTAσ αρε ινπολωεδ
 - Οπερατορ αππλιεδ ιν παραλλελ αχροσσ τιλεσ
 - Ασυμεσ οπερατιον ον τιλεσ ισ χομπλετελφ ινδεπενδεντ


Cannon's Matrix Multiplication




Cannon's Matrix Multiplication


HTA A, B, X = Χρεατε  HTA([3, 3], ...)

φορ ι = 0:μ-1

A(ι,:) = χιρχ  σηιφτ(A(ι,:), [0, -(ι-1)]) // α ρω
οφ τιλεσ

B(:,ι) = χιρχ  σηιφτ(B(:,ι), [-(ι-1), 0]) // α χολυμν
οφ τιλεσ

φορ ι = 0:ν-1

ημαπ(ΜΥΛΤ  ΑΔΔ(), X, A, B) // οπερατεσ ον αλλ
τιλεσ ιν παραλλελ

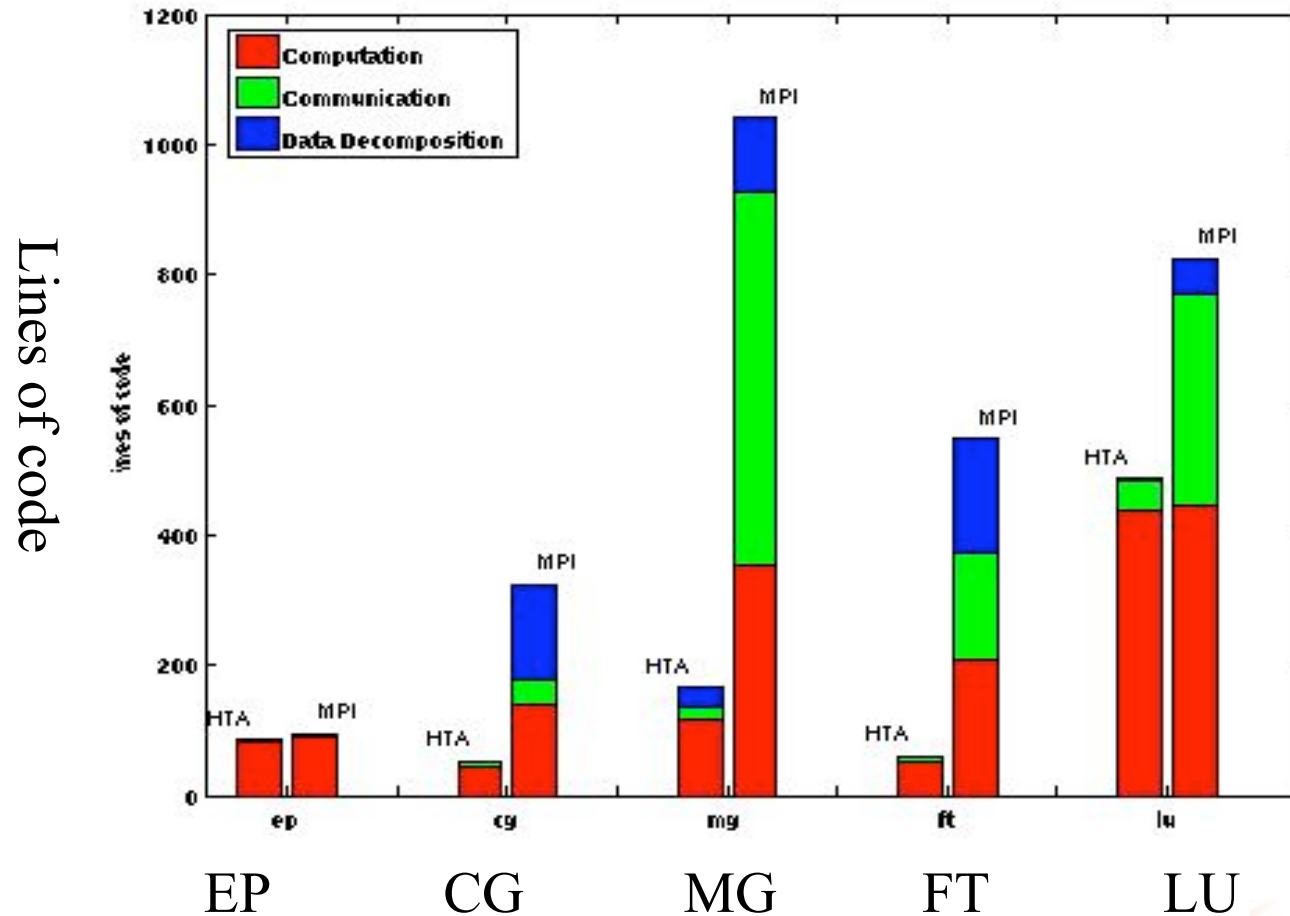
A = χιρχ  σηιφτ(A, [0 -1])

B = χιρχ  σηιφτ(B, [-1 0])

HTA Library

- ΗΤΑσ ηαπε βεεν ιμπλεμεντεδ ασ Χ++ ανδ ΜΑΤΛΑΒ λιβραριεσ
 - Σηαρεδ ανδ Διστριβυτεδ Μεμορψ
 - Α ΓΠΥ περσιον ισ πλαννεδ
- Τηε οπερατορσ ιν τηε λιβραρψ ωερε συφφιχιεντ το νατυραλλψ ιμπλεμεντ σεπεραλ βενχημαρκ σιιτεσ
 - Εξαμπλε: ΝΑΣ Παραλλελ Βενχημαρκσ
 - Περφορμανχε ισ χομπετιτιβε ωιτη χουντερπαρτσ
- Φυρτηερμορε, τηε ΗΤΑ νοτατιον προδυχεσ χοδε τηατ ισ χομπαχτ ανδ μορε ρεαδαβλε

Advantages of tiling as a first class construct



EP

CG

MG

FT

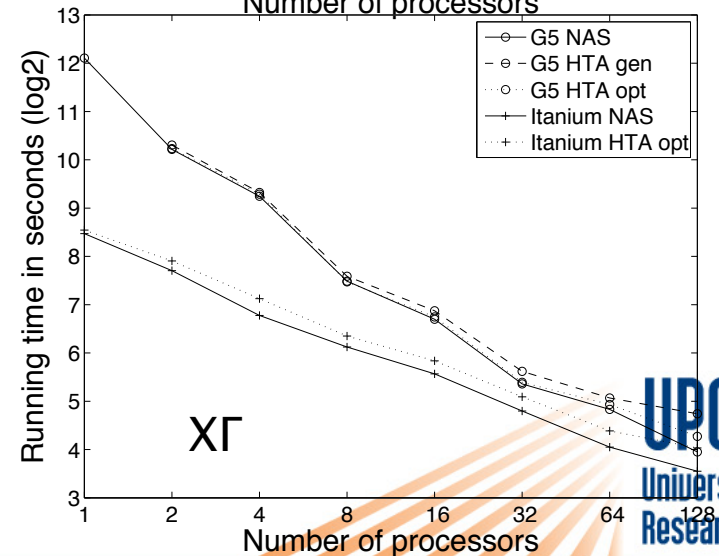
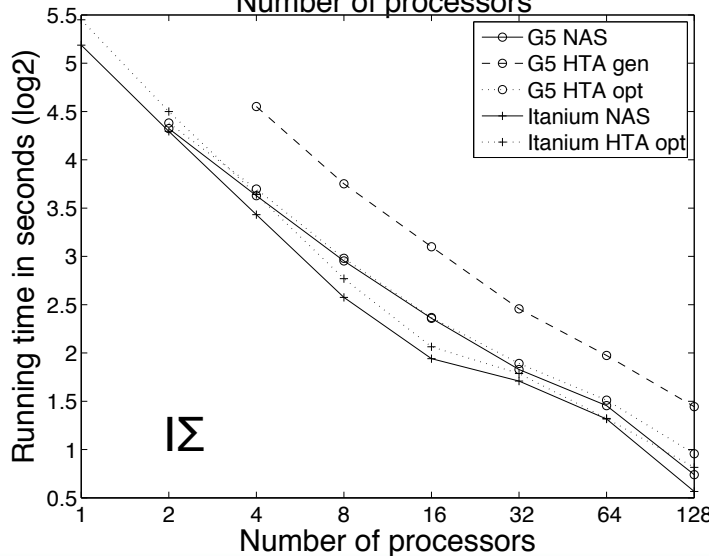
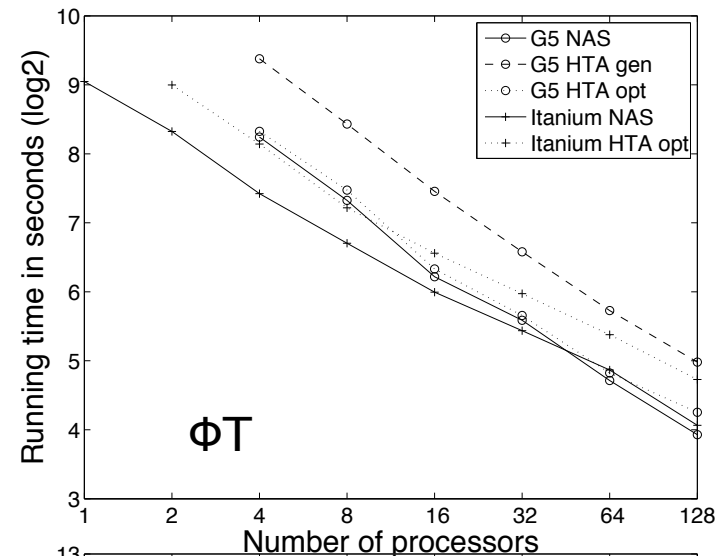
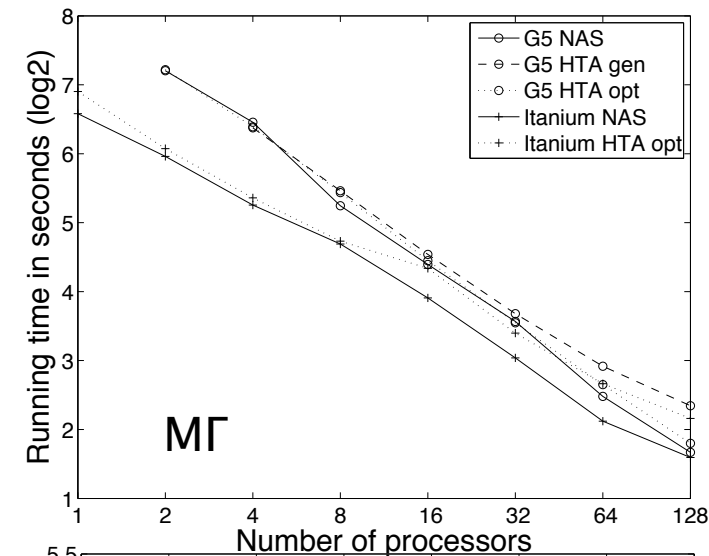
LU

Λινες οφ Χοδε. HTA πσ.
ΜΠΙ



Performance Results

Ωιτη βασιχ χομπιλερ οπτιμιζατιονσ, χαν ματχη φορτραν/ΜΠΙ



Non Numerical Programs

- ΗΤΑσ ωορκεδ ωελλ φορ νυμεριχαλ προγραμσ, βυτ μανψ προγραμσ νοτ νυμεριχαλ
- Ιδεντιψ τηε δατα παραλλελ οπερατορσ ανδ δατα στρυχτυρεσ νεεδεδ φορ τηεσε τψπεσ οφ προγραμσ
 - Τηε χομμυνιτψ δοεσ νοτ ηαωε ασ μυχη εξπεριενχε ασ φορ νυμεριχαλ προγραμσ
- Σαμε γοαλσ
 - Παραλλελισμ
 - Λοχαλιτψ
 - Προγραμμαβιλιτψ
 - Περφορμανχε

New Data Structures for Non Numerical Computations

- Χονσιδερ αγγρεγατεσ οτηερ τηαν αρραψσ ασ α ταργετ φορ δατα παραλλελισμ
 - Τρεεσ, Γραπησ, Σετσ
- Σετσ αρε ονε ποσσιβιλιτη
 - Ηαπε βεεν εξαμινεδ βεφορε (ΣΕΤΛ, Χοννεχτιον Μαχηινε)
- Ωηατ πριμιτιβεσ δο ωε νεεδ?
 - Μαπ – αππλη σομε φυνχτιον το επερψ ελεμεντ οφ α σετ. Φυλλη ινδεπενδεντ.
 - Τραδιτιοναλ σετ οπερατιονσ – Υνιον, Ιντερσεχτιον, ετχ
 - Ρεδυχε – αππλη ρεδυχτιονσ αχροσσ α σετ ορ μυλτιπλε σετσ
 - Σχαν – περφορμ α πρεφιξ οπερατιον ον σετσ
 - ΜαπΡεδυχε

What problem domains can be solved in parallel using set operations

- Ωε ηαπε στυδιεδ σεπεραλ αρεασ ινχλυδινγ
 - Σεαρχη
 - Δαταμινινγ
 - Μεση Ρεφινεμεντ
- Ιν αλλ χασεσ, ιτ ωασ ποσσιβλε το οβταιν α ηιγηλψ παραλλελ ανδ ρεαδαβλε περσιον υσινγ σετ οπερατιονσ



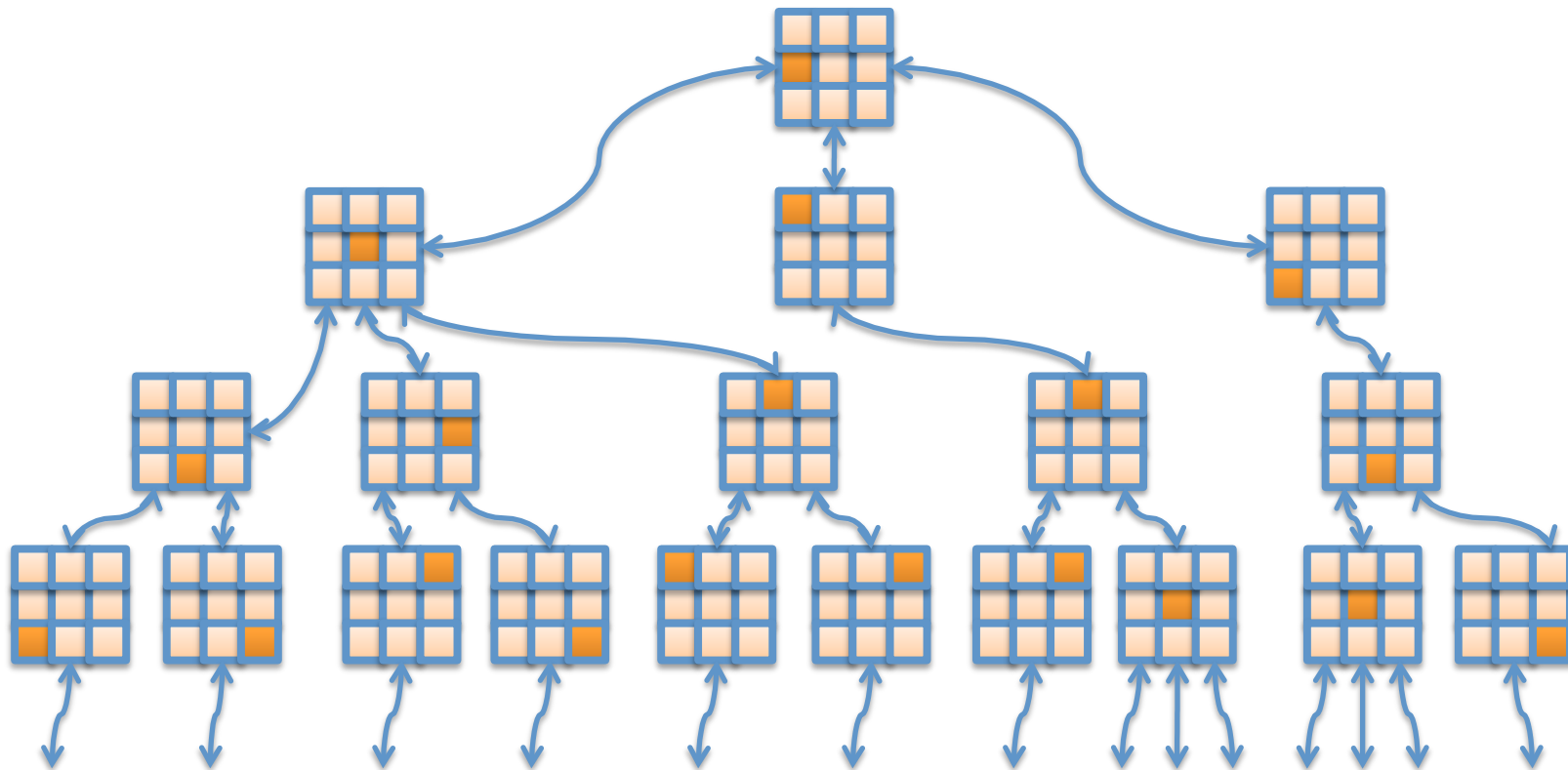
Example – Data Parallel Search 15 Puzzle

- 4x4 γριδ οφ τιλεσ ωιτη α “ηολε”
- Σλιδε τιλεσ το γο φρομ α σαρτ στατε το τηε Γοαλ
- Στατεσ (πυζζλε χονφιγυρατιονσ) ανδ τρανσιτιονσ (μοπεσ) φορμ α γραπη
- Σολπε υσινγ α Σεαρχη

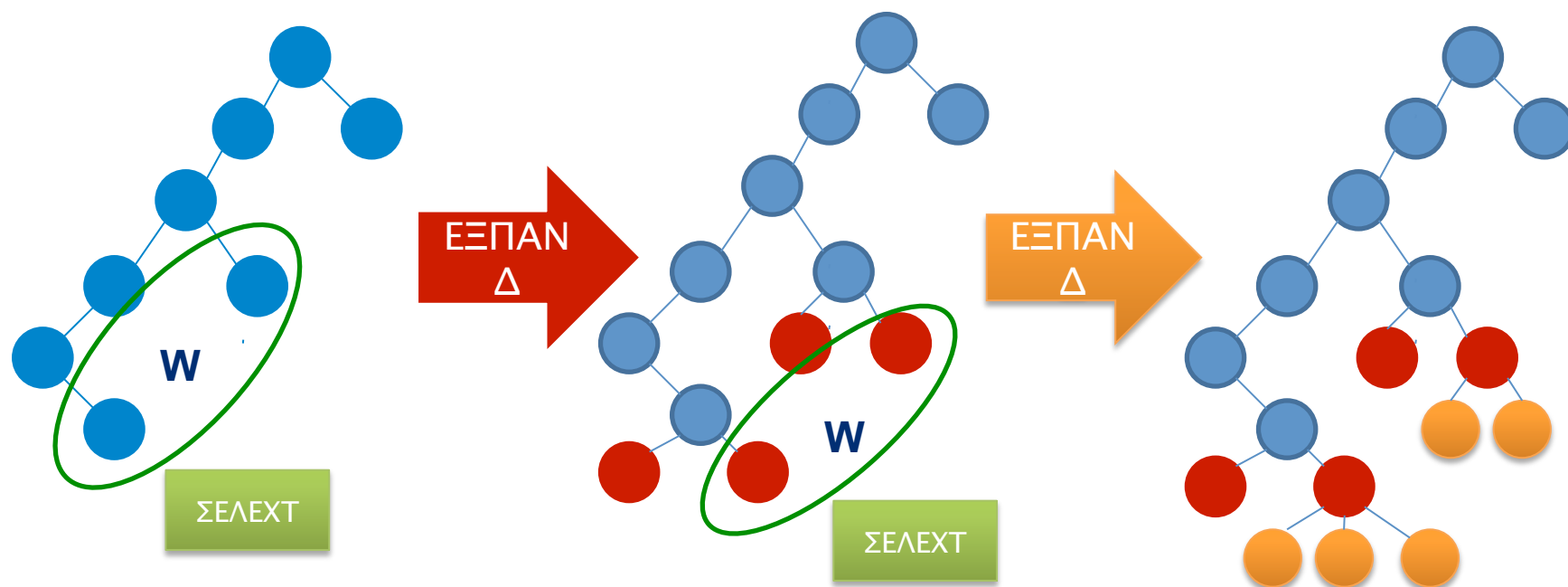
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	



Example - Search



Data Parallel Search Algorithms



Data Parallel Search Algorithms

Σετ Ψ λίστ

Σετ στατες

Σετ συχχεσσορσ

- Σεθυενχε οφ δατα παραλλελ οπερατορσ
- Παραλλελισμ ενχαπσυλατεδ
- Χοδε λοοκσ σεθυεντιαλ

Σεαρχη(ινιτιαλ Ψ στατε)

Ψ λίστ.αδδ(ινιτιαλ Ψ στατε)

ωηιλε (νοτ δονε)

$\mu\alpha\pi$ (ΣΕΛΕΧΤ(), Ψ λίστ, στατες)

ιφ (νοτ φουνδ Ψ σολυτιον(Ψ λίστ))

$\mu\alpha\pi$ (ΕΞΠΑΝΔ(), στατες, συχχεσσορσ)

$\mu\alpha\pi$ (ΥΠΔΑΤΕ(), Ψ λίστ, συχχεσσορσ)



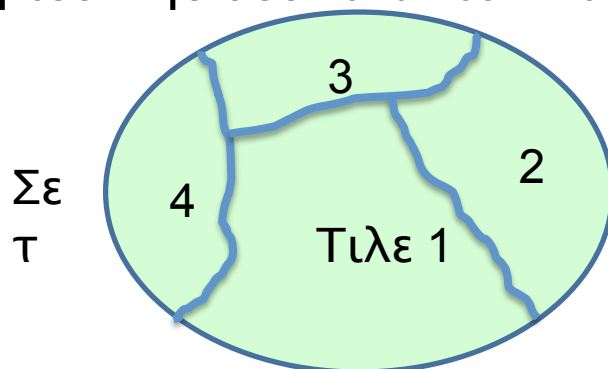
Tiled Sets

- Τηε γρεατ νυμβερ οφ αλγοριτημο τηατ υσε βοτη στατιχ ανδ δυναμιχ τιλινγ ινδιχατε τηατ τιλινγ ισ α φυνδαμενταλ οπερατιον ον χολλεχτιονσ
 - Μυστ χονσιδερ τιλινγ ασ ανοτηερ πριμιτιβε φορ οπερατιονσ ον σετσ
- Ωαντ το τιλε φορ σαμε βενεφιτσ ωε σεε φορ αρραψσ:
 - Λοχαλιτψ
 - Παραλλελισμ
 - Γρανυλαριτψ
 - Λοαδ Βαλανχιγγ



Mapping and Tiled Sets

- Χαννοτ χρεατε α τιλεδ σετ ασ εασιλψ ασ α τιλεδ αρραψ
- Σπεχιφινγ τιλινγ ισ τριωιαλ φορ Αρραψο
 - Σεθυενχεσ οφ διμενσιονσ, ετχ.
- Το σπεχιφψ τηε τιλινγ στρυχτυρε οφ α Τιλεδ Σετ ρεθυιρεσ:
 - Τηε νυμβερ οφ τιλεσ
 - Α μαππινγ φυνχτιον τηατ τακεσ αν ελεμεντ οφ τηε σετ ανδ σπεχιφιεσ τηε δεστινατιον τιλε



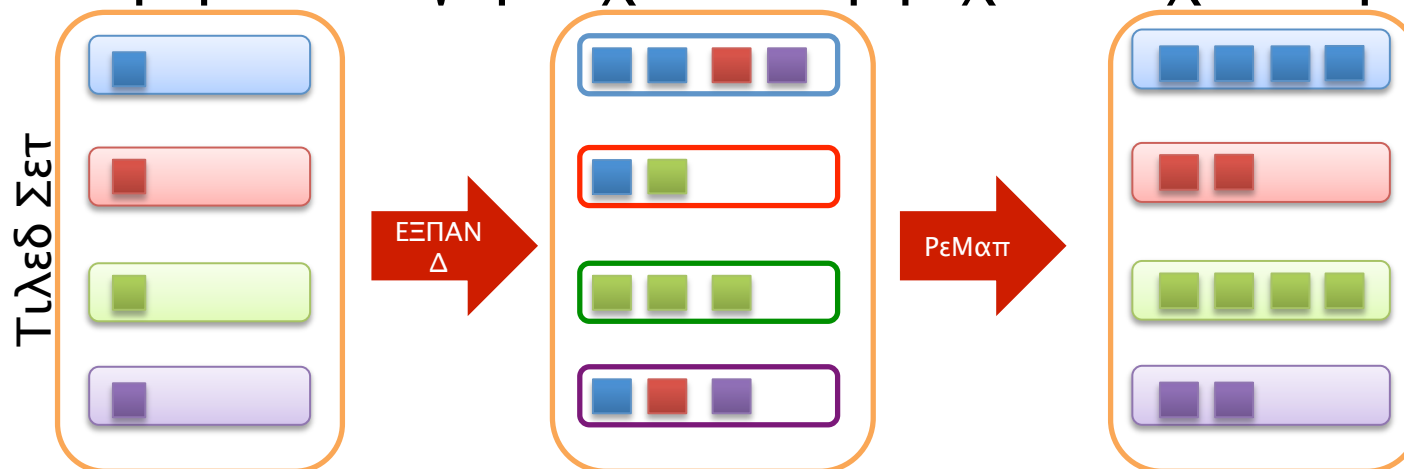
Locality vs Load Balance

- Χρησιμοποιώντας “good” mapping functions μπορούμε να αποφύγουμε:
 - Load Balancing
 - Locality
- Load balancing είναι σημαντικό όταν έχουμε data sets που επηρεάζουν το mapping
- Overhead είναι σημαντικό όταν έχουμε
 - Compromised between extra overhead and better load balancing
 - Speedup μπορεί να είναι προχρηστικός εάν έχουμε “smart” runtime (i.e. Χιλκ’ς από Intel TBB’s Task Stealing, CHARM++)



Tiled Sets and Locality

- Τη μαππινγ φυνχτιον αφρεχτοσ λοχαλιτψ



- Ιδεαλλψ, αλλ τη νεω νοδεσ ωουλδ μαπ το τη σαμε τιλε ασ τη νοδεσ τηατ χρεατε τηεμ
 - Σηαρεδ Μεμορψ – νεω ελεμεντοσ ιν χαχηε φορ τη νεξτ ιτερατιον
 - Διστριβυτεδ Μεμορψ – μινιμιζεσ χομμυνιχατιον
- Ιφ τη μαππινγ δοεσ νοτ ενφορχε λοχαλιτψ (περηαποσ το οβταιν βεττερ λοαδ βαλανχε), τηεν α νεω πριμιτιωε, ΡεΜαπ, ισ νεεδεδ

Data Parallel Search with Tiled Sets

ΤιλεδΣετ **ωορκ**λ**ιστ**[# οφ Τιλεσ]
ΤιλεδΣετ **στατεσ**[# οφ Τιλεσ]
ΤιλεδΣετ **συχχεσσορσ**[# οφ Τιλεσ]

Τιλεδ Σετσ
Πριμιτιωεσ
Οπερατορσ

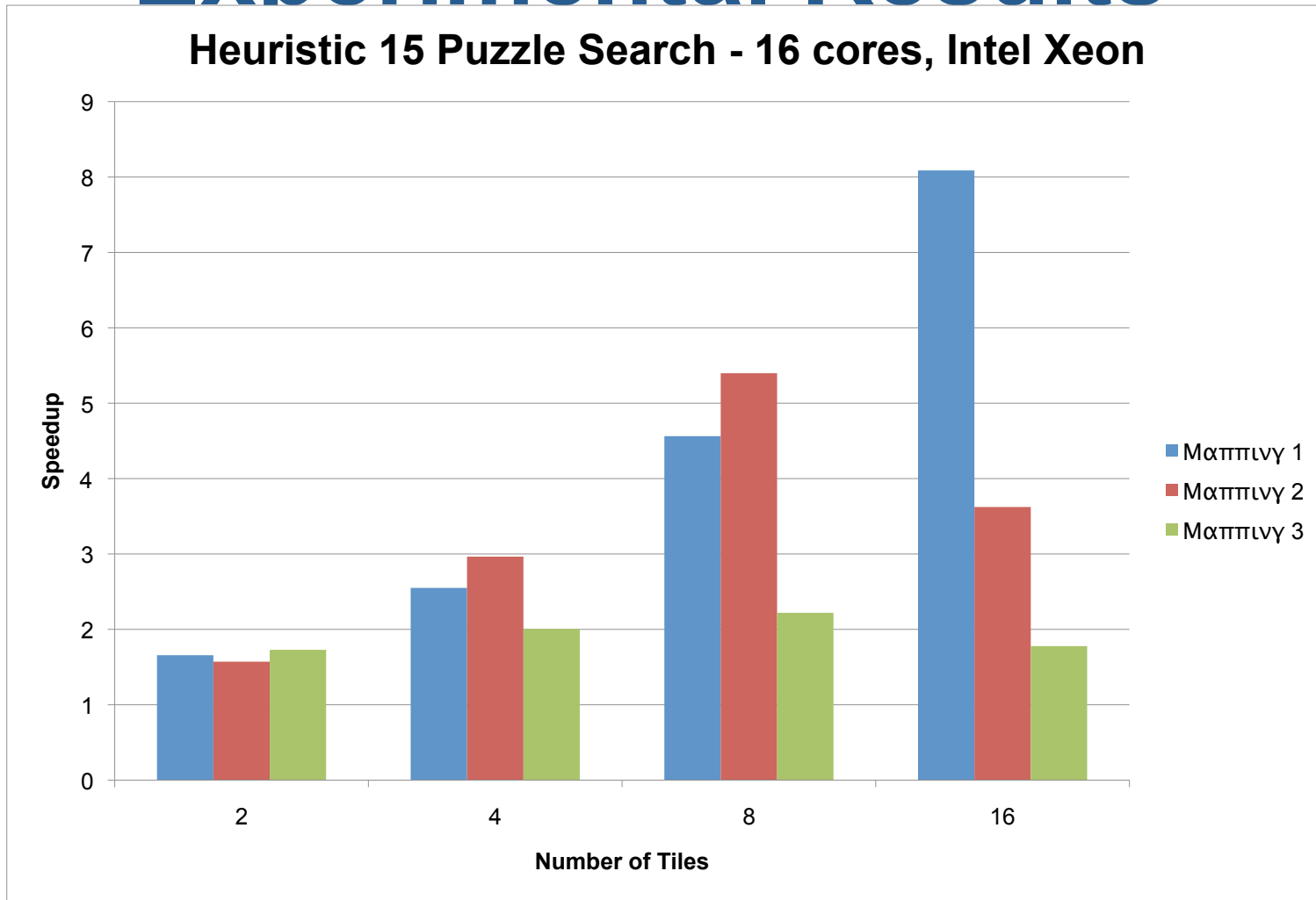
ΒΦΣ(ινιτιαλ**λ**ιστατε)
ωορκλ**ιστ**[**ΜΑΠΠΙΝΓ****λ****ΦΥΝΧ**(ινιτιαλ**λ**ιστατε)].ινσερτ(ινιτιαλ**λ**ιστατε)

ωηιλε (νοτ δονε)
μαπ(**ΣΕΛΕΧΤ**(), **ωορκ**λ**ιστ**, **στατεσ**)

ιφ (ΓΟΑΛ νοτ ιν **νοδεσ**)
μαπ(**ΕΞΠΑΝΔ**(), **στατεσ**, **συχχεσσορσ**)
ΡεΜαπ(**ΜΑΠΠΙΝΓ****λ****ΦΥΝΧ**(), **ΥΝΙΟΝ**(), **συχχεσσορσ**)
μαπ(**ΥΠΔΑΤΕ**(), **συχχεσσορσ**, **ωορκ**λ**ιστ**)

Experimental Results

Heuristic 15 Puzzle Search - 16 cores, Intel Xeon



Computations with Conflicting Operations

- Σο φαρ, ωε'πε βεεν εξαμινινγ
χομπυτατιονσ ωηερε τηε οπερατιονσ
αρε φυλλψ ινδεπενδεντ
- Χομπυτατιονσ ωιτη χονφλιχτσ χουλδ
στιλλ βενεφιτ φρομ δατα
παρραλλελισμ ωιτη αππροπριατε
εξτενσιονσ
 - Ενφορχε δετερμιναχψ
 - Ενχαπσυλατε νον δετερμιναχψ

Computations with Conflicting Operations

- Χονσιδερ:
φορ $i=0:v-1$
 $A(K(i)) += \zeta(i)$
 $M(K(i)) = \text{μαξ}(M(K(i)), A(K(i)))$
- Χονφλιχτσ ιφ Κ ηασ ρεπεατεδ παλυεσ
- Χαν βε συχχεσσυφυλλησ παραλλελιζεδ ιφ τηε προγραμμερ χαν σπεχιφψ τηατ ορδερ ματτερσ ωηνεν χολλισιονσ οχχυρ
 - Αλλω τηε παραλλελ υπδατε οφ διφφερεντ λοχατιονσ, βυτ σεριαλιζε υπδατεσ το τηε σαμε λοχατιον
 - Ινσπεχτορ/Εξεχυτορ
 - Φινδ α σχεδυλε οφ ινδεπενδεντ υπδατεσ τηατ χαν οχχυρ ιν παραλλελ εαχη ιτερατιον



Computations with Conflicting Operations

- Χονσιδε ρ α συμπλε ρ εξαμπλε:
φο ρ $i=0:n-1$
 $A(K(i)) += z(i)$
 - Ο ρδε ρ ηε ρε ισ “λεσσ” ιμπο ρταντ
- Χουλδ ενφο ρχε δετε ρμ ινα χψ α σ βε φο ρε βψ υ σ ιν γ α μα π π ρ ιμι τι ωε τη α τ ενφο ρχε σ τη ε σε θυ εν τι α λ ο ρδε ρ ιν γ
- Ανο τη ε ρ πο σσι β ιλι τψ ι σ το αν νο τα τε τη α τ α λ λ υ π δ α τε σ το Α μ υ σ τ β ε α το μι χ
 - Τη ε φο νη χ τι ο ν πα σσε δ το τη ε μα π π ρ ιμι τι ωε χ αν χ ο ν τ αι ν χ ρ ιτι χ α λ σε χ τι ο ν σ
 - Εν χ α π συ λα τε ν ο ν δε τε ρ μ ι να χ ψ
- Ο τη ε ρ σ α ρε ω ο ρ κ ιν γ ο ν εν χ α π συ λα τι ν γ ν ο ν - δε τε ρ μ ι να χ ψ
 - Α δ ω ε / Β ο χ χ η ν ο – Δ Π Θ, Ι λ λ ι ν ο ι σ

Conclusions

- Ωε ωαντ το υσε ηιγηερ λεωελ, δατα τυππεσ ανδ δατα παραλλελ οπερατοροσ το ινχρεασε:
 - Προγραμμαβιλιτυ
 - Πορταβιλιτυ
 - Παραλλελισμ
- Ωορκεδ φορ Αρραψο
 - Ηιεραρχηχαλλψ Τιλεδ Αρραψο
- Νεεδ το ιδεντιφψ τηε νεω πριμιτιωεσ νεεδεδ το δο οτηερ χομπυτατιονο
 - Νον νυμεριχαλ
 - Χομπυτατιονο ωιτη χονφλιχτινγ οπερατιονο



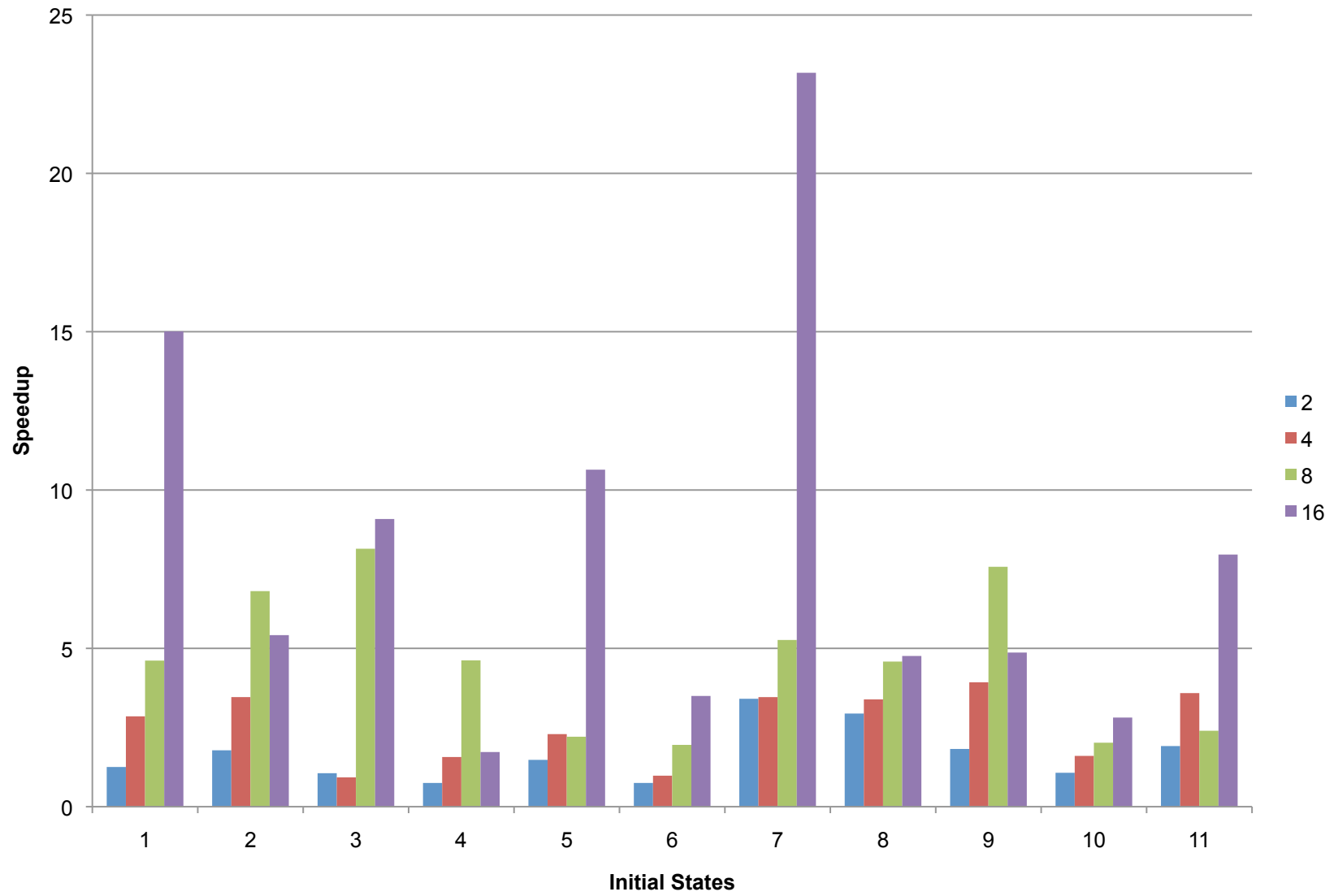
Conclusions

- Σετ αρε α προμισινγ δατα τψπε
 - Ρεσυλτινγ προγραμσ ηιγηλψ ρεαδαβλε
 - Λαργε ποολ οφ οπερατορσ
 - Χαν βενεφιτ φρομ τιλινγ ωην εξτενδεδ αππροπριατελψ
 - How do we help programmer find good mapping function for irregular data structure?
- Χομπυτατιονσ ωιτη χονφλιχτινγ οπερατιονσ χαν βενεφιτ φρομ δατα παραλληλισμ ωιτη τηε ριγητ εξτενσιονσ
 - Ενφορχε δετερμιναχψ
 - Ενχαψυλατε νον δετερμιναχψ
- Χηαλλενγεσ
 - Περφορμανχε
 - How much compiler support do we need?
 - Μορε αππλιχατιονσ το ιδεντιφψ νεω πριμιτιβεσ



# Tiles/Tasks	2	4	6	8
No Τιλε	0.78	0.89	0.85	0.71
Τιλεδ	1.66	2.55	4.56	8.09





Data Parallel vs Task Parallel

- Ονε χουλδ ιμπλεμεντ α τασκ παραλληλ περσιον οφ τηισ σεαρχη ιν σεπεραλ ωαψσ:
 - Α τασκ ισ τηε εξπανσιον οφ ονε νοδε, χρεατινγ α νεω τασκ φορ εαχη χηιλδ ανδ λεττινγ α ρυντιμε μαναγε εξεχυτιον
 - Α τασκ ισ τηε ωηολε σεαρχη. Προγραμμερ ισ ρεσπονσιβλε φορ λοαδ βαλανχινγ.
- Εαχη χηοιχε ηασ τραδε-οφφσ:
 - Τηε φορμερ συππορτσ βεττερ λοαδ βαλανχε ατ τηε χοστ οφ χοντρολ οπερ λοχαλιτψ
 - Τηε λαττερ συππορτσ βεττερ λοχαλιτψ ατ τηε χοστ οφ ινχρεασεδ χομπλεξιτψ. (Λογκσ, Μανυαλ ωορκ στεαλινγ, ετχ)
- Τηε δατα παραλληλ περσιον γιωεσ τηε προγραμμερ εξπλιχιτ χοντρολ οπερ λοχαλιτψ, διστριβυτιον, ανδ λοαδ βαλανχε