Cosmogrid Project

牧野淳一郎

国立天文台

天文シミュレーションプロジェクト プロジェクト長/教授

with: 平木敬、稲葉真理 (東大情報理工)、石山智明 (東大総合文化)、似鳥啓吾 (理研)、S. Portegies Zwart, Derek Groen, Stefan Harfst (Leiden University), Cees de Laat (University of Amsterdam), S. L. W. McMillan (Drexel University)、

他、 Cosmogrid project members

Center for Computational Astrophysics

概要

- 国立天文台の紹介
- 天文シミュレーションプロジェクトの紹介
- Cosmogrid Project
- 背景
- やったこと
- できたこと
- 今後の方向

国立天文台の紹介

- 日本の天文学のナショナルセンター
- 地上観測施設
  - すばる望遠鏡
  - 野辺山宇宙電波観測所
  - その他、岡山観測所等
- JAXA と共同で宇宙からの観測も
- 暦、理科年表等の歴史的な機能
- 理論研究・シミュレーション研究による天文学

国立天文台の研究施設

国立天文台の研究・観測施設は日本各地にとどまらず、すばる望遠鏡や建設中のALMA（アルマ）のように海外にも進出しています。天文学の観測では、可視光、赤外線、電波、重力波などの観測手段と、太陽とそれ以外の宇宙などの観測対象に応じて、最適の観測条件と環境とが必要とされるからです。

野辺山エリア

野辺山宇宙電波観測所
Nobeyama Radio Observatory

日本の電波天文学を世界のトップレベルに押し上げた観測施設です。写真の45m電波望遠鏡（右）は、ミリ波で世界最大の望遠鏡で、新たな星間分子の発見や原始惑星系の回転ガス円盤の発見など、数々の画期的な成果を挙げています。

野辺山太陽電波観測所
Nobeyama Solar Radio Observatory

太陽面爆発を高精度で観測する干渉計システム「電波ヘリオグラフ」（写真下）で、太陽活動のモニターを行っています。

乗鞍岳エリア

太陽観測所・乗鞍コロナ観測所
Solar Observatory:Norikura Solar Observatory

北アルプス・乗鞍山系摩利支天岳（海抜2876m）の頂上に位置する太陽観測所です。太陽物理現象の精密な観測を行うために3台のコロナグラフが設置されています。

岡山エリア

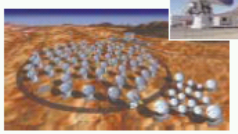
岡山天体物理観測所
Okayama Astrophysical Observatory

国内最大級の口径188cmの反射望遠鏡を中心に、銀河・恒星・太陽系天体などの光学赤外線観測研究の国内の拠点となっています。また、赤外線分光装置や赤外線超広視野カメラなど、宇宙を見る新しい目を次々と開発しています。

チリ・エリア

ALMA（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）
ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) Project

ALMA（アルマ）は、日米欧が共同でチリの標高5000mの高原に建設中の巨大な電波望遠鏡群（イラスト）で、国立天文台が現在総力を挙げて取り組む大型プロジェクトです。



水沢エリア

水沢観測所
Mizusawa Astrogeodynamic Observatory

旧緯度観測所として長い歴史をもつ施設です。位置天文学・測地学の研究が続んで、日本の標準時を決める天文保時室などがあります。

江刺地球潮汐観測施設
レーザー光線を利用して地面の伸縮の変化を測るレーザー歪計です。潮汐による地球の微細な変形をモニターします。

VERA観測所・水沢観測局
VERA Observatory：Mizusawa station

銀河系の3次元地図を作成するVERA観測網のひとつです。

三鷹エリア（本部）

三鷹キャンパス

三鷹キャンパスは、国立天文台の本部が置かれ、さまざまなプロジェクト、センター、研究部、事務部が集まっています。

VERA観測所・入来観測局
VERA Observatory
：Iriki station

VERA・4局
（水沢局を含む）
銀河系の3次元地図を作成します。

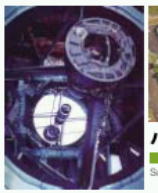
VERA観測所・石垣島観測局
VERA Observatory
：Ishigakizima station

VERA観測所・小笠原観測局
VERA Observatory
：Ogasawara station

銀河系の3次元地図を作成するVERA観測局のひとつです。

ハワイ・エリア

ハワイ観測所
Subaru Telescope



すばる望遠鏡
ハワイ島のマウナケア山頂（標高4200m）に設置された口径8.2mの世界最大級の可視・赤外線望遠鏡です。平成12年度から本格的な観測を始め、現在、世界最先端の研究成果を挙げつづけています。

ヒロ・オフィス（写真右上）
ハワイ島ヒロ市にあるハワイ観測所の本部です。「すばる望遠鏡」による観測研究の拠点となっています。

すばる望遠鏡

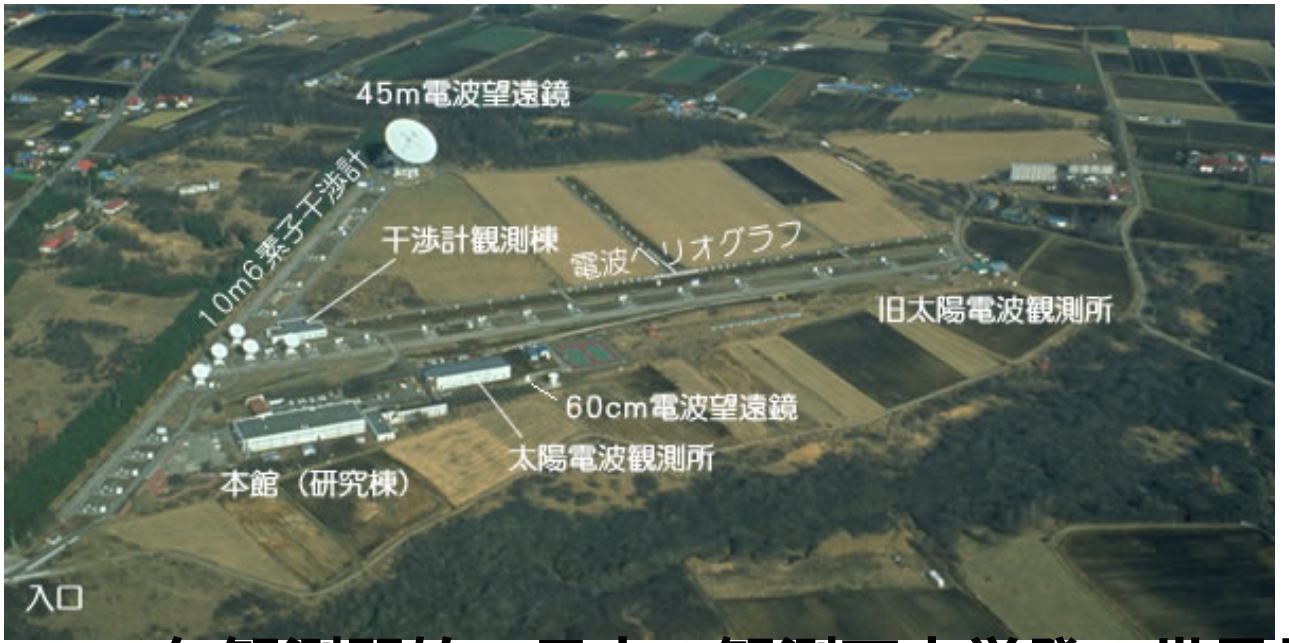
ハワイ・マウナケア山頂

主鏡直径 8.2m，世界最大級

大視野の主焦点カメラ (30 分角)、ハッブル望遠鏡の 100 倍の視野

現在のところ、最遠方の銀河 (QSO) の 10 個のうち 9 個を発見

野辺山宇宙電波観測所



1982 年観測開始。日本の観測天文学発の世界最先端装置
後継:日米欧共同プロジェクト ALMA 望遠鏡
(2010 観測開始？)

その他主要プロジェクト

- ひので衛星
- 重力波観測装置 TAMA300
- VERA VLBI(超長基線電波干渉計) による銀河の構造・運動の観測
  - 光回線によるリアルタイム信号処理
- VSOP-2 衛星による VLBI

天文シミュレーションプロジェクト

2 つの役割:

- 国立天文台の中の、理論・シミュレーション天文学研究グループ
- 国内外の天文学研究者のための計算機センター

歴史

1965年　人工衛星国内計算施設 発足

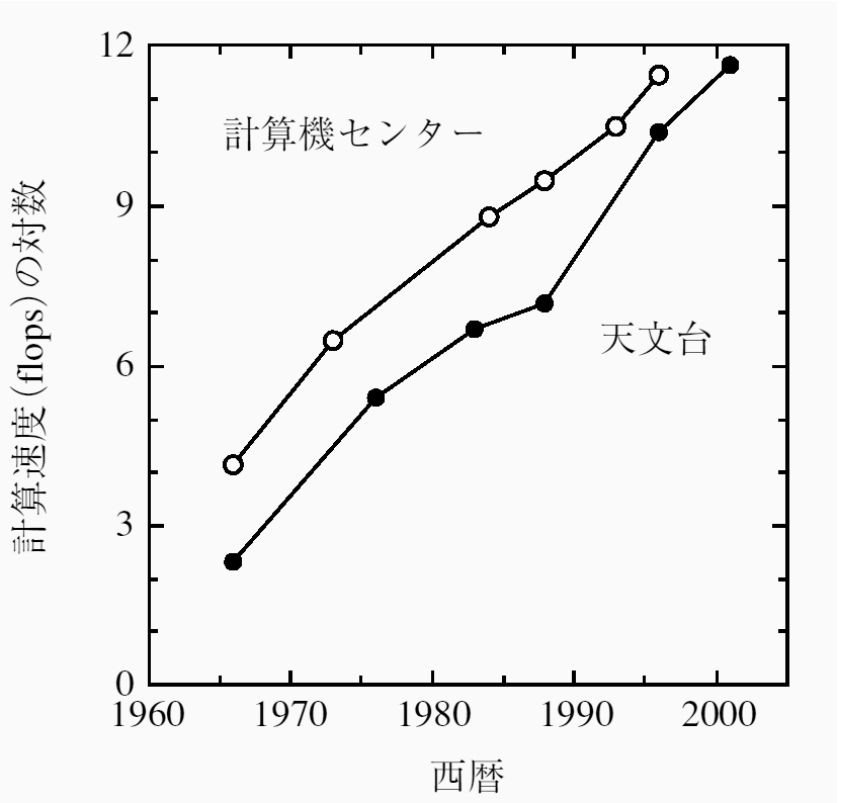
1988年　天文学データ解析計算センター 発足

　　同年　理論天文学研究系 発足

2006年　天文学データ解析計算センターを天文シミュレーション
　　プロジェクトと天文データセンターに分離

「天文学理論・シミュレーションのための計算センター」として世界的にもユニークな位置を占める。

計算速度の進化



計算速度の対数

$(12 = 1\ \mathrm{Tflops})$

白○: 東大センター

黒●: 国立天文台

大体東大の $1/10$ — $1/100$

OKITAC, UNIVAC **の他は**

富士通

現行システム

- **ベクトル部分:** NEC SX-9 16CPU+4CPU
- **スカラー部分:** Cray XT4 9**キャビネット** (812**演算ノード、**28.6TF)

国立天文台の Cray XT4

フロントパネル CG とデータ提供者

シミュレーション:斎藤貴之
可視化:武田隆顕 (4D2U プロジェクト)

天文台以前と天文台以後

以前

以後

CosmoGrid Project

- 背景
- やったこと
- できたこと
- 今後の方向

背景

- 建前
  - 遠隔地の計算機をネットワークでつないで、1つの大規模シミュレーションを分担、並列化することで単体の計算機ではできない規模の計算をしたい
- 本音
  - Grid というのは上のようなことをするのが建前だけど、上手くいっている例を殆どみたことがない。
  - 上手くいく例を示すことができれば
    - 計算機時間が沢山使えるかもしれない (共同研究者の都合)
    - 論文も書ける (こっちも共同研究者の都合)

Grid での大規模並列計算？

- 「やりました」という論文は一杯ある
- 中身を読んで見ると、ほとんどはジョブ並列、パラメータサーチ。1 つのシステムの時間進化を並列計算しました、というのは？

理由は簡単:

グリッド環境は、「並列計算機」として見ると最低

- ネットワークバンド幅が小さい
- ネットワークレイテンシがめちゃくちゃに大きい

Grid での大規模並列計算？(続き)

最低な環境で計算する意味

- **シミュレーションアルゴリズムの改良**

  ネットワークバンド幅をあまり要求しない、
  レイテンシにも寛容なアルゴリズム

  ↓

  高効率、高スケーラビリティの実現

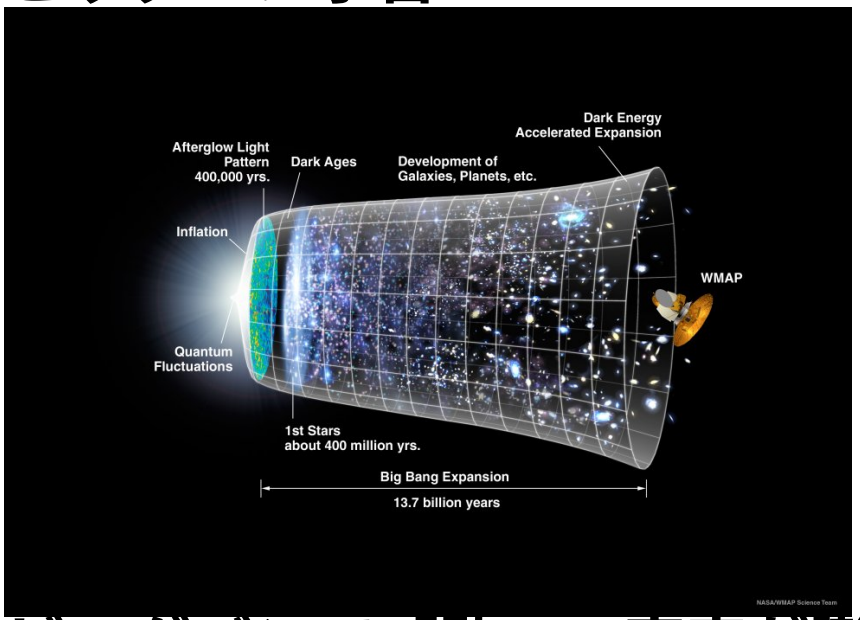
- **マシンタイムの有効利用**

やったこと

- シミュレーションは「宇宙論的 N 体計算」
- 国立天文台の Cray XT4 と、アムステルダム大学の IBM p575 (Power6) クラスタを 10GbE ネットワークで接続
- 256^3 粒子でのテスト計算は終了。
- 2048^3 粒子での大規模シミュレーション: 少し進んだ。
- 天文台の Cray が非常に混んできたので、、、

宇宙論的 N 体計算とは？

ビッグバン宇宙



ビッグバンで「熱い」宇宙が膨張を始める
膨張するに従って温度が下がる
重力の効果で構造形成 ← この過程をシミュレーション
アニメーション (a)(b)

やるとどんな楽しいことがわかるか

- 銀河 (の質量の殆どを担うダークマターハロー) がどうやってできたか
- 理論から予想される銀河の数、質量、空間分布

これを観測と比べると、、、ダークマターの性質、例えば

- 粒子一つの質量、トータルの質量
- 重力以外の相互作用がどんなものか
- その他色々なこと

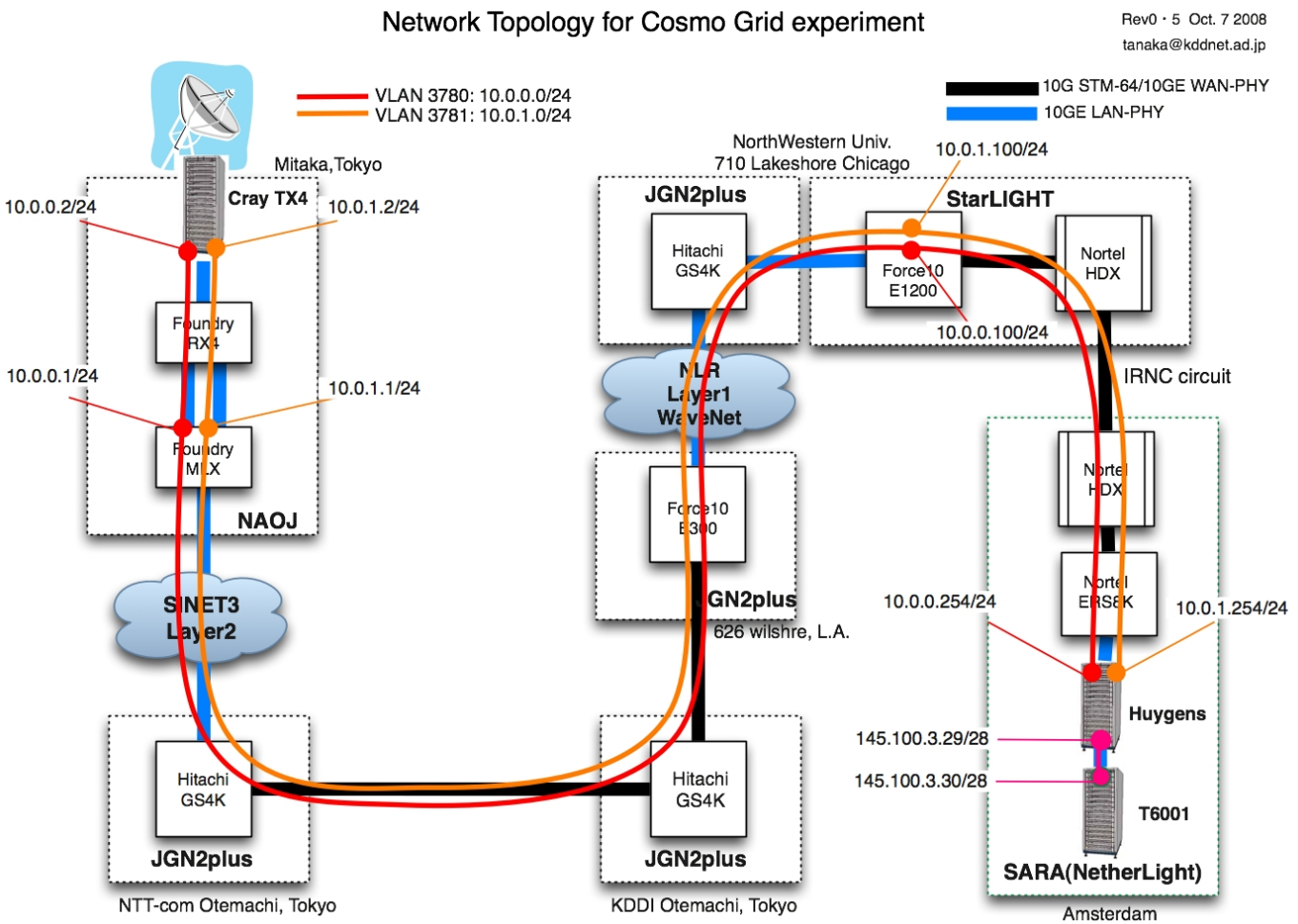
Grid で宇宙論的 N 体計算をする理由

- 最先端の計算は非常に大規模 (粒子数 10^{10})
- そのかわりタイムステップ数はあんまり多くない (数万)
- 計算サイズは CPU タイムでリミットされている。1 タイムステップ数分。
- 並列化は良く研究されていて、必要な通信量その他も良くわかっている

つまり

- 1 タイムステップに時間かかるので、レイテンシが長くても OK
- 通信量が割合少ないので、ネットワーク遅くても OK
- でも、大きな計算したい。 Grid は有効

Grid 構成



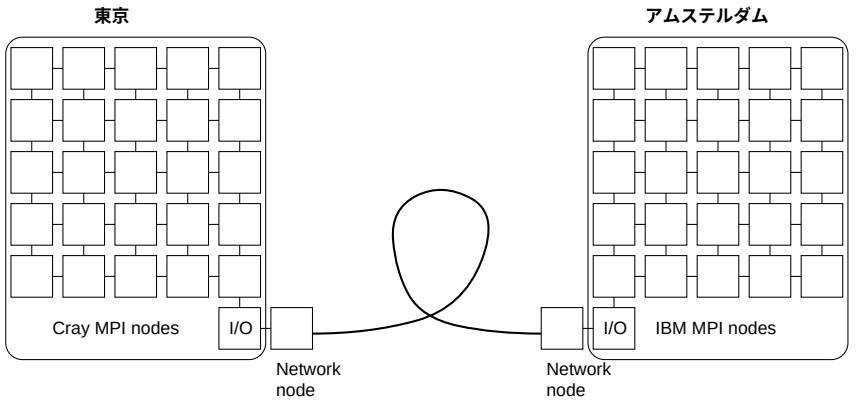
東大のアムステルダム拠点を利用
東大-アムステルダム大学のネットワーク実験環境の構成の両端にスパコンをつないだ感じ。

ネットワーク性能

- レイテンシ (ping rtt) 280ms
- バンド幅: Cray XT4 の 10G カードがボトルネック (PCI-X インターフェースの S2IO Xframe)
- Cray-Cray の折り返し実験 (シカゴとかアムステルダムで折り返し) だと 6Gbps くらいまで。

計算コードの実現

- サイト内は MPI で並列化
- MPI ノードのうちの 1 つを通信処理専用にする。他サイトとの通信はここで集約
- 計算機ネットワークの構成上、 Cray でも IBM でも、さらにこれがネットワーク通信専用ノードと TCP/IP で通信
- ネットワーク通信専用ノード同士も TCP/IP で通信



計算コードの開発、チューニング

- サイト内並列化: 元からあるコードを利用
- サイト内での通信集約: 難しいことはない
- ネットワークノード間通信: ソケットパラメータ等色々面倒。とはいえ、普通にやればよい
- 計算時間が両側で均等になるように動的に空間分割を変更

面倒だけど、難しいところはない

実際の実験

- 2 週間くらい、ネットワークをこれ用にセットアップしてもらって実験
- 何故か ping が通るまでに xx 日くらいかかる
- 実際に計算を始めると、主にオランダ側で色々なことが起きる

国際共同研究は大変難しい

シミュレーションの例

256^3 粒子計算

通信性能 (1024^3 粒子、両側 1024 コアの時)

	転送量	転送時間
FFT 用格子交換	70MB	5.8 秒
粒子交換	770MB	51 秒
(計算	—	350 秒)

- 通信速度はもうちょっとなんとかできるはず (1 秒はきらないけど)
- が、実は通信にかかっている時間は既に十分少ない
- 粒子数を増やすと相対的に通信量は減る ($N^{2/3}$ でしか増えない)

大規模な宇宙論的 N 体計算では、遠隔地の計算機をつなげた Grid 計算も十分実用的

Caveats

実際的な困難

- **両側の計算機はバッチベースのシステム。どうやって同時に計算始めるのか？**
- **そもそも、速いネットワークを占有するのは実験はともかく実用的なのか？**

最初の問題は結構計算機センターにとっては本質的。Grid ジョブをどうやって他のユーザーの邪魔にならないでスケジュールするべきか？

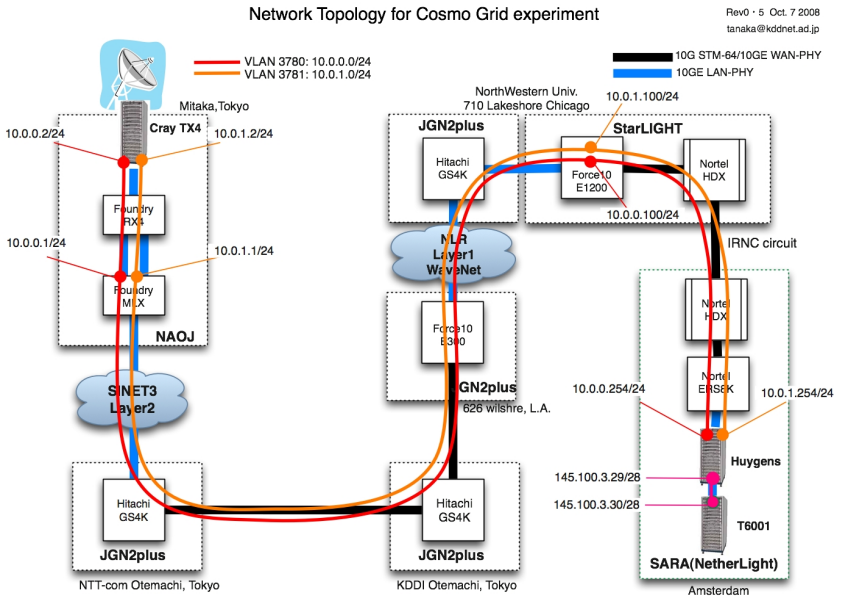
スケジューリングに対する対応

(アイディアのみ)

- 2つの計算機センターでバラバラにジョブスケジュールする
- 同時にとれた時には Grid 計算
- 一方だけの時には片方
- 途中で状態が変わったら、そこで計算を migration する

理屈は簡単だけど、、、というわけでまだコードできてない

まとめ



- NAOJ XT4 とアムステルダム大学の Power6 システムを 10G でつないで並列計算
- そのための異機種並列コード開発

を行った。

- 遠距離の TCP/IP 通信は、色々すればバンド幅はでる。
- 実計算ではそれほどバンド幅はでていないが、計算の実行効率という面では十分。
- 技術的可能性は実証出来た。
- 計算機センター運用としてこういうのをするか？は別問題。