理系研究者の日常と非日常

牧野淳一郎
東京工業大学理工学研究科
理学研究流動機構

科学者とは何かーその過去と現在 2012/1/6 ゲスト講義

スライド: jun.artcompsci.org/talks/index-j.html にあるはず

どういう話をするか

梶さんからの依頼メイル:

> 理論系の研究者がどんなことをしているか（どんな研究をするものなのか、どんな日常を送っているのか、理論系の研究者をめざすにはどうしたらよいのかなど、ご自身の経歴をにも触れれば学生にもわかりやすいと思います。抽象的な議論よりもより具体的な話の方がよいと思います。

なので、まあそういうふうな話を。

大体の話の順番

- 簡単な自己紹介
- 理論・シミュレーションによる天文学研究
- シミュレーション方法の研究
- 計算機の研究開発
- 天文学は何か社会の役に立つのか

はじめに: 牧野って誰？

- 職歴

  2011/4- 東工大理学研究流動機構 教授

  2006/6- 国立天文台理論研究部 教授

  1999/4- 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 助教授

  1994/4- 東京大学教養学部情報図形科学教室 助教授

  1990/4- 東京大学教養学部情報図形科学教室 助手

  天文 (天体物理) 学者？

- 学歴

  1990/3 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了

  1987/3 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻修士課程修了

  1985/3 東京大学教養学部基礎科学科第二卒業

  (学科名からはなんだか全然わからない)

牧野って誰？(続き)

研究はどんなことをやってきたか

- 主に理論・シミュレーションによる天体形成・進化の研究
  - 大規模構造の形成・銀河形成
  - 銀河中心・球状星団の力学進化
  - 惑星形成
- シミュレーションのための計算アルゴリズムの研究
- シミュレーションのための計算機の開発

銀河合体

理論・シミュレーションによる天文学って？

対外的説明

色々な天体、あるいは宇宙全体が、どのようにして生まれ、現在の形になっているか、さらにこれからどうなるのかを知りたい

もうちょっと実際のところ

観測が進んで見つかる色々なものを「理解」したい

本当のところ、どんなことをやっているか？

例

- 球状星団とブラックホール

(2003 年の講演資料からあまりいじってないので中身はちょっと古いところあり)

初めに — 2種類のブラックホール(BH)

「知られている」ブラックホールのギャップ

- 恒星質量 ブラックホール $\sim 10M_\odot$ (太陽質量)
  - 大質量星の重力崩壊 (II型超新星) でできる
  - X 線での観測が主な根拠
- 巨大ブラックホール $> 10^6 M_\odot$
  - 円盤銀河 — 楕円銀河の中心に存在
  - クェーサー、活動銀河核の「セントラルエンジン」
  - 観測的根拠は多様

その中間は ???

中間質量ブラックホール

Intermediate-mass blackhole を発見した!!!
という報告

- **700 $M_\odot$ in M82?**
  Matsumoto *et al.* **ApJL 547, L25, Chandra**
- **4000 $M_\odot$ in M15?**
  Gerssen *et al.* **AJ, in press (astro-ph/0209315), HST**

Globular Cluster M15
HST • WFPC2
PRC95-06 • ST ScI OPO • November 1995 • P. Guhathakurta (UC Santa Cruz), NASA

M15 — Claims

STScI Press release (Sept 18, 2002)

Van Der Marel led a team that uncovered a black hole in the center of the globular star cluster M15, 32,000 light-years away in the constellation Pegasus. His collaborator Joris Gerssen, also of the Space Telescope Science Institute, pinned down the black hole's mass at 4,000 times that of our Sun.

Previously, X-ray observations ..... have identified ultra-bright X-ray sources that could also be interpreted as intermediate-mass black holes in star-forming galaxies. However, alternative interpretations for these X-ray sources continue to exist. By contrast, Hubble's measurements are based on the velocities of stars .....which yield a direct measurement of the black hole masses.

M15 — 適当な訳

宇宙望遠鏡科学研究所プレスリリース (2002/9/18)
STScI Press release (Sept 18, 2002)

宇宙望遠鏡科学研究所のファン・デア・マレル博士が率いるチームは、ペガサス座の方向、*3*万 *2*千光年の彼方にある球状星団 *M15* にブラックホールを発見しました。彼の協力者で、やはり宇宙望遠鏡科学研究所のゲルセンは、ブラックホールの質量が太陽の *4000*倍だということを突き止めました。

これまで、 *X*線での観測で .... 星形成銀河に非常に明るい *X* 線源が見つかっていました。これは中間質量ブラックホールとも解釈できるものでしたが、他の解釈もできるものでした。これに対し、ハッブル *(*宇宙望遠鏡*)* による測定は、個々の星の速度に基づくもので、直接ブラックホールの質量を与えるものです。

M15 — 観測

RMS velocity profile by Gerssen *et al.* (astro-ph/02090315).

HST STIS, CFHT and other data combined.

何故ブラックホールがあると主張するか?
— モデル

3000 $M_\odot$ black hole!

モデルの作り方 — Jeans equation

球状星団の星の分布関数は力学平衡、つまり無衝突ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = 0, \tag{1}$$

の定常解になっている。で、これに対して星団が球対称で、平均の流れがない (どこで積分しても平均速度は 0) と仮定すると

$$\frac{d(\nu \overline{v_r^2})}{dr} + \frac{\nu}{r}\left[2\overline{v_r^2} - \left(\overline{v_\theta^2} + \overline{v_\phi^2}\right)\right] = -\nu \frac{d\Phi}{dr} \tag{2}$$

但し、$\nu = \int f d^3v$ (空間密度)

Jeans equation (等方)

速度分布が等方的とすれば、結局

$$\frac{1}{\nu}\frac{d(\nu\overline{v_r^2})}{dr} = -\frac{d\Phi}{dr} \tag{3}$$

すなわち

$$M(r) = -\frac{r\overline{v_r^2}}{G}\left(\frac{d\ln\nu}{d\ln r} + \frac{d\ln\overline{v_r^2}}{d\ln r}\right) \tag{4}$$

これは、ポテンシャルを作るものの質量密度と、そのなかで動いているものの密度、速度の間の関係を与える。

観測の解釈

いいかえると、Jeans 方程式を使うと

- (見えないものも含めた) 質量分布
- (見えるものの) 密度分布
- (見えるものの) 速度分布

のうち 2 つがわかればもうひとつがわかる。

Gerssen et al. のやったこと

1. “ Mass follows Light” を仮定して、(見えるものの) 密度分布に何か定数 γ を掛けると (見えないものの) 質量分布が求められると信じる。
2. 質量分布から速度分布を求めてみる。
3. これは、定数をふってみても速度分布の観測結果とあわない
4. 中心にいろいろな質量のブラックホールを仮定して、速度分布を計算しなおす
5. χ^2 残差が最小になったところで、「ブラックホール発見!」

表面輝度

Left: Sosin & King 1997, Right: Guhathakurta *et al.* 1996.

ブラックホールありモデルの速度分布

3000 $M_\odot$ black hole!

何故ブラックホール?

実際に観測された速度分散は、中心 5 秒角の範囲で (わずかではあるが) 中心にいくに従って増加

中心 5 秒角内の表面輝度はスロープ -0.8 のべき (カスプ)

$\downarrow$

質量と光が比例してれば、速度分散も弱いべきではあるが中心に向かって下がるはず

なので、ブラックホールがある

いいなおすと

- 明るさから星の空間分布を推測、それから質量分布がわかる
- 星の速度分布の観測からも質量分布がわかる
- この 2 つがあわなくて星だけでは中心で質量が足りない

ブラックホール発見!

この論文がでた時に私が考えたこと

- これは楕円銀河でのブラックホール質量推定としては標準的方法
- だけど、楕円銀河ではそれでよくても球状星団では駄目なはず
- わかりやすく示すにはどうするのがいい？
- 「普通の球状星団」の計算機モデルを同じような解析できないか？

やったこと

- 当時いたドイツ人ポスドク (Baumgardt) の計算結果の一つにちょうど使えるのがあった。
- 球状星団の、できてから現在までの力学進化を計算したものから。ちょうど M15 と同じように中心が明るいフェーズにきているのを選んだ
- 観測の論文と同じように解析してブラックホール質量推定

結果

astro-ph/0210133, ApJ accepted. (アメリカ天文学会の学会誌に投稿、受理された)

左:速度分散、右:表面輝度(明るさ)

「ブラックホール発見」

星だけでは速度分散が説明できない。中心近くでの速度分散を合わせるにはブラックホール必要

ブラックホールの質量は、M15 のものとすると 3000 太陽質量

(Gerssen *et al.*:

$\sim 3 \times 10^3 M_\odot$)

もちろん、モデルにはブラックホールない

論文出版までのドタバタ

- 2002/9/18 STScI プレスリリース
- 2002/9/28 我々の論文 first draft
  論文書いた時には実際に計算した Baumgardt は日本、私はイギリス、後 2 人の共著者はアメリカにいて、図ができる → 原稿書く → 英語とロジック整理を 3 交代でやってた
- 10/7 投稿と同時にプレプリントサーバーにも投稿、さらに元論文の著者に連絡
- その数時間後に元論文の著者らは「論文補遺」(Addendum) をプレプリントサーバーに載せ、同時に投稿
- 10/8 NASA ヘッドクォーターから共有プレスリリースについてコンタクト。但し、「論文が受理されてから」ということで先送り。
- 12 月論文改訂、受理、2003/1/10 NASA その他同時プレスリリース

プレスリリース(1)

Donald Savage

Headquarters, Washington Jan. 10, 2003

RELEASE: 03-009

RESEARCHERS SEEK ”HEART” OF BLACK HOLE MYSTERY

New research, funded by NASA and the University of Tokyo, has shown astronomers may not yet have uncovered the mystery at the heart of one of the Galaxy’s oldest star systems, the globular cluster M15.

(中略)

プレスリリース(2)

A team of astronomers used the HST for several years to probe M15's secrets. A few months ago, the answer to the decades-long question of the possible black hole in M15 seemed to be at hand. After a painstaking analysis of HST data, using earlier model calculations by Indiana University researchers, the team reported evidence for a central black hole. (中略)

プレスリリース(3)

Within hours of the team's announcement, astronomers around the world were carefully studying the paper and its exciting conclusions, which were also rather surprising, since the Indiana group had previously published models that produced high velocities near the center of M15 without the need for a black hole. (中略)

プレスリリース(4)

When the GRAPE researchers notified the HST team of their results, they learned the Hubble team, along with members of the Indiana University group, had reached a similar conclusion. All three groups agreed that a black hole, if present, had to be significantly smaller than originally reported. One of the figures in the original paper, published by the Indiana group, had been labeled incorrectly, throwing off the later analysis of the Hubble observations.

何が間違っていたか

- 観測のグループの論文でも、実はちゃんとシミュレーションモデルを使っていた。
- 我々のと方法は違うが、シミュレーション結果はほぼ同じもの。
- 但し、「出版されたグラフの横軸の単位が間違っていた」ため、解析結果は完全に間違いになった
- 修正後も、論文の著者たちは、「ブラックホールの可能性が完全に否定されたわけではない」と主張
  (これは論理的にはそうだけど意味がない主張)

Addendum :(論文補遺)

Gerssen et al. astro-ph/0210158 (Oct 8, 2002).

"After the completion of our paper, the authors of the D97 paper discovered an unfortunate error in their Figures 9 and 12. The labeling along the abscissa of these figures is incorrect due to a coding error in supermongo plotting routines (H. Cohn and B. Murphy, private communication, 2002). The units along the top axis should have read 'arcmin' instead of 'pc', and the labeling in arcmin along the bottom axis is incorrect. The net result is that the radial scale of these figures in the D97 paper is too compressed by a factor 2.82.

「プログラムミスのために図のグラフの横軸が間違っていた」

(パーセクと度分の間違い)

この後の研究の発展

- ブラックホールがある球状星団はではどういうものか、のシミュレーション
- 観測可能性の検討

といったことをかなり色々やった

ここまでのまとめ

- 理論・シミュレーションによる天文学研究の一つの目的は、観測結果を「正しく」理解すること
- 元々の観測結果自体、実は様々な理論やモデルを使って結果がでてきていることもある
- 専門家のはずでも、信じられないような間違いをすることがある。
- 間違いがわかったら間違ってた、とちゃんと発表するところも世の中にはある
- 但し、研究者個人はなかなかそうはいかないこともある

これはただの間違い捜しでは？

- まあ、そういうところもある。
- そうはいっても、科学においては「正しい」ということも大事。というか、正しい結果でなければそれを使って議論したらやはり間違える。
- 天体物理では、大抵のことに既に「理論的説明」が一応はある。
- そのなかには全然間違ってるのもある。
- なので、間違ってるのを直す、ってのも割合大事。

間違ってることがあるのは天体物理だけというわけでもない

理論研究のやり方

色々なスタイルがある。

- 新しい観測結果に対して説明する理論モデルを作る
- 昔からある大問題に取り組む
- 統一的な理解を構築していく
- その他

どれが良い、というものでもない(ノーベル賞狙いなら最初の)。

シミュレーション研究

シミュレーション: 数学モデルの方程式に対して、数値解を与えること

- 利点: 解析的に解けない方程式でも答はでる
- 問題点: なんでも解けるほど計算機は速くない。そのために答が間違ってる (信用してはいけないところの答を使ってしまっている) ことも多い。

なので、「より信用できる答を出す方法の研究」は極めて重要なテーマになる。

- 研究者個人にとって: 他の人と戦うための強力な武器
- 分野全体にとって: 確実にできることが広がる有用な成果

というわけで、個人的には、方法の研究に結構集中してきたと思う。他の人より良い道具をもってるとできる研究はいくらでもある。

方法の研究等

1. シミュレーション用のプログラムを書く (デバッグする)
2. シミュレーション用の新しい計算方法を研究する
3. シミュレーション用の計算機を作る
4. シミュレーション用の計算機のための予算をなんとかする

プログラムの開発

- 最近どんどん計算機が使いにくくなってきているので大変
  - 沢山の計算機の上での並列プログラム
  - GPGPU の利用、CPU 内複数コアの利用、キャッシュの有効利用、、、その他もろもろ
- 分野によっては、多数の研究者からなるチームでプログラム開発
- 方法やできる研究が制限される危険性がある。あんまり良い方向ではない

新しい計算方法の研究

- 計算機シミュレーションはそんなに長い歴史はない (せいぜい 70 年)。
- なので、方法はまだまだ未熟。改良の余地はいくらでもある
- 数学的な定式化、、物理的モデル、計算アルゴリズム、と様々なレベルでの研究がある。

これは普通の理論研究に近い進めかた。解決したい問題があって、色々考えてアイディアをだして、それが実際に上手くいくかどうかさらに検討、という感じ。
アイディアはあとから見ると当たり前に見えるので、どういうふうに思い付いたのかよくわからない。

計算機を作る話

基本的アイディア—近田提案

1988年、天文・天体物理夏の学校

88/11/2

「計算機を使う，計算機の技術を使う」

近田義広（国立天文台・野辺山）

観山さんは理論の立場から見ると，現在の日本ではスーパコンがどんどん使えるからイニシアチブをとる良い機会だと話されました．私は，その素晴らしい計算機を作り出す技術をうまく使いこなし，天文に応用すれば，計算機の利用者に止まる場合よりもっと大きな成果を期待できるぞ！ということをお話しします．

- 計算機買うんでなくて作れ!
- 近田さんは電波天文学の専門家。データ処理用の計算機を開発した。

〔昨日，今日，明日〕

先ず，Ｍ１，Ｍ２の若い人達に話す時の定石の昔話から始めます．約２０年前の１９６０年代の末，三鷹の天文台に口径６ｍのミリ波望遠鏡が作られ，後の野辺山の望遠鏡の雛形が生まれた時，その制御とデータ収集はOKITAC4300と言うミニコンが受け持ちました．そして今，６ｍ鏡は水沢に運ばれてＶＬＢＩに使うために化粧直し中．今度の制御用計算機は日電のパソコンPC9801VMです．表１に見るように，この２０年間に記憶容量も演算速度も約４桁良くなっています．つまり，同じ予算でも１０年たてば１００倍の仕事をさせられるようになったと言うことです．これは天文台と言うローカルな世界だけのことではありません．事実，図１〔１〕の並列計算機の並列度の推移にみるように１０年で１００倍というのはかなりよいestimateです．但し，これは重要なことなのですが，同一の構造，同一の使われ方，つまり同一の製品系列の中での進展はこんなに早くありません．例えば野辺山の汎用計算機についてこの４年間の価格／性能比を見るとせいぜい２倍しか良くなっていません．つまり計算機（の技術）の使い方を常に見直して，自分の問題に適した構造の機械を使う（作る）ようにし，かつその上で解き易いように問題を立て直すことがないと「１０年で１００倍」を生かした人に比べ１０倍分は立ち遅れることになります．

- **計算機は10年で100倍速くなる**
- **同じ製品系列だと10倍しか速くならない**

全体の値段 ∝ 性能 ∝ 装置の大きさ

でもあります．表２に見るように上記３者の比例関係は大体成り立っているように見えます．しかし本当に価格／性能比は一定なのだろうか？　もしそうなら利用者は利用者に徹し，計算機システムの構成に気を使ったり，自分で情報処理機を作ったりしようとなどせずに，与えられたお金でＣＰＵ時間を買っていれば良いことになります．誰もが平等にお金の額に相当する「性能」を手にするのだから，残された仕事は金を取ってくることだけです．

そうではありません．汎用の大きな計算機は，出来るだけ広い範囲の利用者の平均的な要求を同時に満足させる「性能」を考えて作ってあります．ですから汎用「性能」を考えた場合は上の比例式は成り立っていますが，特定の範疇の性能を取り出すと比例関係は成り立ちません．だから，問題は自分の課題に対する「性能」とは何か？それを一番安く（容易に）手に入れるにはどうしたらいいか？です．例えば野辺山クラスの計算機１台とＥＷＳ(engineering work station)４００台とどちらがいいか？　もし演算速度だけを問題にするなら，ＥＷＳを４００台の方が良いでしょう．またＦＦＴの速さだけなら野辺山のＦＸはスーパコンピュータに比べて２桁以上速くて（表３）値段は１桁安いのだから，その方がいいに決まっています．汎用か専用かでこんなに性能／価格にひらきがでるのは一体どうしてなのでしょうか．

- **専用化すれば２ー３桁価格性能比をあげられる**

具体的イメージをつかんでもらうために，例として図２にパソコンにつないでN体問題の重力を計算する回路の概念を示します．１０ＭＨｚクロックで間口がパラレルのパイプライン式で３２ｂｉｔ固定小数点で計算させるとすると，市販のＩＣで２００個　０．１立方米位の高で，２５０ＭＯＰＳ位のスーパコンピュータ並みの性能が得られるでしょう．大体，１万体問題を１万ステップ１日に計算できる勘定です．値段としては自作で４００万円位でしょう．もし億円オーダーの金をかけて，大型計算機につなぐようなバンとしたものを作る場合は，高性能をねらって専用ＩＣを作り，ＩＣ５０００個　４ｂｙｔｅ浮動小数点演算，２０ＭＨｚクロック，２０立方米，１００ＧＦＬＯＰＳ，１０万体問題を４万ステップ１日に計算できる．（但し，近田電子製作所の見積もりは甘いと言う声もあることを付け加えます）．

- **多体問題なら 400万円 250 Mflops**
- **数億円なら 100 Gflops**
- **「但し、近田電子製作所の見積もりは甘いという声もあることを付け加えます」**

近田さんによるパイプライン概略図

$$\ddot{\mathbf{r}}_j = G\sum_i \frac{M_i}{r_{ij}^3}\mathbf{r}_{ij} \qquad (\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$$

+, −, ×, 2乗は1 operation, -1.5乗は多項式近似でやるとして10operation 位に相当する.
総計24operation.
各operation の後にはレジスタがあって, 全体がpipelineになっているものとする.
「待ち合わせ」は2乗してMと掛け算する間の時間ズレを補正するためのFIFO(First-In First-Out memory).
「Σ」は足し込み用のレジスタ. N回足した後結果を右のレジスタに転送する.

図2. N体問題のj-体に働く重力加速度を計算する回路の概念図.

近田さんによる見積もり

- 32 ビット固定小数点
- IC 200 個
- 体積 $0.1\mathrm{m}^3$
- コスト 400万

杉本さん(私のボス)の反応

- 11月に近田さんの話を聞きに野辺山に
- 川合先生(慶応)、牧野、伊藤君が同行
- 近田さん、奥村さん他で話を。

「近田さんが色々教えてくれそうだから、やってみよう」

当初私が考えたこと

- 実は近田提案のままでは実用にはならない
- Barnes-Hut ツリー法、独立時間刻み法といった高速アルゴリズムに対応する必要あり
- どちらも対応可能
  - ツリー法: アルゴリズムの変更と、通信の高速化
  - 独立時間刻み: アルゴリズムの変更と、パイプライン構成の変更

88年秋時点での杉本プラン

- 戎崎 (杉本研出身、当時神戸大助手) を回収して実行隊長にする
- 最初のハードウェア開発は伊藤に (当時大学院に合格したばかり)
- 牧野 (この時D3) に何かやらせるつもりがあったのかどうか不明 (聞いたことがないので)

89年春時点でのハードウェア開発プラン

GRAPE-1 (最初はこういう名前ではなかったけど):

- とにかく、可能な限り簡単なハードウェアで重力計算パイプライン的なものを実際に作る
- 実用になるかどうかは気にしない。なので、語長短くしてハードウェア簡単に
- これは伊藤担当

GRAPE-2

- 本格計算用
- 座標・積算倍精度浮動小数点、中間結果単精度
- 市販の浮動小数点演算 LSI を使う
- 予算: 天文台の共同開発研究に応募
- 戎崎担当

杉本の神の声で決定

GRAPE-1(1989)

GRAPE-1 当初プランとの違い

全部短い語長ではなく、座標表現、加速度の積分は固定小数点でそれぞれ 16, 48 ビットにした

- 掛け算しないところは語長長くてもハードウェアは (それほど) 大きくならない
- 2 粒子間の力の必要な精度は低い。多数の粒子があることで統計的に高い精度が出れば十分 (な場合がある、ということを理論的・実験的に示せた)。

ということで、(ツリー法には対応しないが) ある程度サイエンスに使えた。

- 銀河合体による楕円銀河の形成 (奥村ら)
- 「激しい緩和」(船渡ら)

伊藤君の本

- 伊藤君はコミック「栄光なき天才たち」の原作をやってた
- 数年前に本出した
- どんなふうに開発進んだか、は本を参照

GRAPE-2(1990)

GRAPE-2 開発の進め方

- 当初戎崎・牧野で検討進めた。使うチップ等の選定・購入は秋頃にはおわっていたはず
- 並行して概要設計も大体出来ていた
- 冬には GRAPE-1 が完成して経験を積み時間もできた伊藤が詳細設計以降を引き取った (伊藤の提案)
- 90 年春には完成

GRAPE-2 は多様なサイエンスに使われた。例:

- ブラックホールを持つ銀河同士の合体 (戎崎ら)
- 微惑星系の緩和・暴走的成長 (井田)

90年始め頃の将来構想

- GRAPE-2 を LSI 化し、1000個以上並べてテラフロップスシステムを作る
- これで球状星団の進化計算。重力熱力学的振動を実証する

(杉本・牧野には強い思い入れがあった、、、)

まあ、できれば他にするサイエンスも沢山あるだろう、的なノリ。

90年度初めの人事

- 何をどうしたのか知らないが助手ポストが宇宙地球科学教室で1、基礎科学科第二で2、図学教室で2 空いた。
- 牧野は色々考えて図学教室にいれてもらった。
- 宇宙地球には奥村、基礎二の1つに井田
- 卒研生が 2(基礎二)+1(天文教室)

90年度初めのプラン

- 科研費 (一般Bだったはず)+もうちょっとで計算精度低い LSI 作る
- 特別推進申請。あたったら衝突系用テラフロップス
- 学生プロジェクト: ツリー法ができる GRAPE-1 改良

GRAPE-3 — 低精度計算用 LSI

- 大雑把には GRAPE-1 パイプライン (但し、大きなROM は使えないので対数での加算の実装は全く違う)
- 仕様決定、シミュレータ (C で記述) は牧野
- 論理設計以降は富士ゼロックス (橋本、富田)
- SCS Genesil で設計
- ファブは NS. 1μm
- ボードは奥村
- 1 千万ちょっとの予算で 20Gflops を実現。

色々

- こう話してくるとそんなに難しいことはなかったように聞こえるかも
- 実際には、計算機設計、という以前に電子回路にも殆ど素人な人が数人集まってやった、参考にしたのはCQ出版等からでている技術書や雑誌、というような感じ
- 「計算機」というのはこういうもの、という先入観なしで設計したのが良かった面もあると思う

この後

- 1992-1995 GRAPE-4
- 1997-2001 GRAPE-6
- 2004-2008 GRAPE-DR
- 2009-2011 GRAPE-8

結構常時なんか作っている。

GRAPE-DR

- 開発費の問題
- 解決の方向
- 現状

開発費の問題

- 半導体の進歩に比例して開発費用も増大

年	計算機	チップ初期コスト	設計ルール
1992	GRAPE-4	200K$	1μm
1997	GRAPE-6	1M$	250nm
2004	GRAPE-DR	4M$	90nm
2010?	GDR2?	$>$ 10M$	45nm?

全体予算は初期コストの 4 倍程度必要。
15 億の予算は天文専用ではとれない。

GRAPE-DR

- プログラム可能アーキテクチャ — GRAPE より広い応用範囲
- SIMD 並列計算機を 1 チップに。
- チップ性能: 単精度 512, 倍精度 256Gflops (500MHz で、、、)

予算獲得

- 牧野が代表で色々アプライしたけど全部落ちた (ヒアリングまではいくけど、的な)
- 東大情報の平木さんと組んで (平木さん代表で) アプライしたら採択された (2004 年度)
- 世の中そういうものである

開発体制

- チップは牧野
- ボードは福重+小池 (大学院生)
- ドライバソフトウェアは当初小池

途中で福重がベンチャー企業を始めて、さらに牧野が天文台に異動したので色々人手的には破綻した。

とはいえ、一応計画年度内にチップ・ボード完成。

できたもの — GRAPE-DR クラスタシステム

GRAPE-DR クラスタシステム

- 128-ノード，128-カード システム (105TF 理論ピーク @ 400MHz)
- Linpack 実測性能(2010/11): 35 Tflops@400MHz (81 ノードで測定)
- ホスト計算機: Intel Core i7+X58, 24GB メモリ
- 今年度拡張予定だったけど牧野の異動+地震で色々未定に。

Green500

Listed below are the Little Green500's Top 10 most energy-efficient supercomputers in the world as of June 2010.

Green500 Rank	MFLOPS/W	Site*	Computer*	Total Power (kW)
1	815.43	National Astronomical Observatory of Japan	GRAPE-DR accelerator Cluster, Infiniband	28.67
2	773.38	Forschungszentrum Juelich (FZJ)	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
2	773.38	Universitaet Regensburg	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
2	773.38	Universitaet Wuppertal	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
5	536.24	Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modelling, University of Warsaw	BladeCenter QS22 Cluster, PowerXCell 8i 4.0 Ghz, Infiniband	34.63
6	530.33	Repsol YPF	BladeCenter QS22 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 Ghz, Infiniband	26.38

- ベンチマークは Top500 と同じ
- 消費電力当りの性能でランキング
- ちょっと小さいめのシステムまであり、のリストで 1 位
- 何故か NHK まで取材にきた。

GRAPE-DR は上手くいったか？

- 言い訳: 牧野が天文台に移ってやたら忙しく、、、
- 技術的には、完全に専用化した GRAPE に比べて汎用計算機に対するメリット小さい
- 結構似たアーキテクチャの GPGPU がほぼ同時期に発生した
  - トランジスタ効率で 10 倍しかよくない

GRAPE のような大成功では今のところはない。まあ中成功くらい？

とはいっても、電力効率世界一は自慢できると思う

GRAPE, GRAPE-DR まとめ

- (少なくとも GRAPE は) 極めて高い価格及び電力あたり性能を実現し、サイエンスをかなり進めた
- GRAPE-DR についても (開発に時間かかったけどそれなりに) 成果がでている
- 特に、 Top500 にのったものでアカデミックで開発された唯一のプロセッサ。で、 2010/6 には電力効率トップを達成

こういう研究は何か社会の役に立つのか？

- シミュレーション技術から計算機開発までの話
- 自然現象の理解自体の話

シミュレーション技術から計算機開発までの話

- 天文分野で開発された方法が他の分野でも広く使われるようになった例は色々ある。
  - ツリー法
  - シンプレクティック法
  - SPH 法
- 初めからその「他の分野」でやったら良かったのではと言われたら？
  - 多分、天文分野には新しい手法が生まれやすい土壌がある？

天文学でのシミュレーションの特徴

- 扱う物理は比較的単純。殆ど重力相互作用だけの場合も
- しかし、計算時間的にできない問題が一杯ある。計算方法・速度を改良できればできる研究がいくらでもある。
- 物理が単純なので、プログラム開発・実験が比較的容易 (プログラムの規模が小さい)
- 最近そうでもなくなってきているが、、、計算機が複雑になったので

自然現象の理解自体の話

役に立ったのかもしれない例: 核の冬

核戦争によって発生し、成層圏まで巻き上げられる大量のエアロゾルが、太陽光をさえぎることで極端な気候変化を起こし、生態系、社会に壊滅的な打撃を与える、というシミュレーション予測

- **提唱者:** Carl Sagan (**「コスモス」の**) **他、惑星科学者。元々、火星や金星大気の研究をしていた。火星のダストストームとかを研究していた。**
- **惑星大気の研究で得られた、非常に広い範囲での気候モデル (例えばエアロゾル量が現在の大気より何桁も大きいとか) を、地球の気候に適用**
- **「限定」核戦争でも、全地球的・壊滅的な影響をもちえることを指摘**

自然現象の理解自体の話

役に立ったのかもしれない例: 核の冬

核戦争によって発生し、成層圏まで巻き上げられる大量のエアロゾルが、太陽光をさえぎることで極端な気候変化を起こし、生態系、社会に壊滅的な打撃を与える、というシミュレーション予測

- **提唱者:** Carl Sagan (**「コスモス」の**) **他、惑星科学者。元々、火星や金星大気の研究をしていた。火星のダストストームとかを研究していた。**
- **惑星大気の研究で得られた、非常に広い範囲での気候モデル (例えばエアロゾル量が現在の大気より何桁も大きいとか) を、地球の気候に適用**
- **「限定」核戦争でも、全地球的・壊滅的な影響をもちえることを指摘**

ひょっとすると、人類を救ったのかもしれない

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。
- 色々やってないと人類が滅亡するかも。
- (基礎科学やってなければ核爆弾もなかったかも、、、)

役に立ったのかどうかよくわからない例

3.11 地震に伴う福島原発の事故については

- 3/11-18 における (当時の報道・発表資料による) 事故の進展
- 「現時点」での「事実」と思われる事故の進展
- 「科学者からの情報発信」

3/11-18 における(当時の報道・発表資料による)事故の進展(1) 3/11

3/11 18:28 時事通信

経済産業省原子力安全・保安院によると、１１日午後の地震の影響で、福島第一原発の原子炉を冷却するための機能が作動していないという。

3/12 1:52 朝日

東日本大震災で、炉心を冷やす緊急炉心冷却システム（ＥＣＣＳ）が動かなくなった福島第一原子力発電所の１号機について、東京電力は１２日未明、原子炉格納容器の圧力が高まっているため、容器内の放射能を含む蒸気を放出する作業を検討していることを明らかにした。

3/12 以降

3/12 セシウム137を建屋の外で検出、1号機爆発

15:30 1号機の爆発

朝日 3/12 19:11

一方、保安院によると、爆発音のあった後に、１号機の原子炉格納容器の圧力が急激に下がってきたという。格納容器の破損を防ぐため、弁を開けて内部の空気を抜く作業が効果を上げたのか、他の要因かは不明だ。

以下読売の見出しだけ

- 福島第一原発事故、深刻度「レベル４」以上か （3月13日 01:51）
- 福島第一３号機、冷却水位下がり燃料棒が露出 （3月13日 12:57）
- 福島第二原発１・２号機、冷却システム回復 （3月14日 10:36）
- 福島第一原発の半径２０ｋｍ住民に屋内退避指示 （3月14日 11:45）

- 爆発の３号機、格納容器は健全…枝野官房長官 （3月14日 11:51）
- 爆発３号機、放射性物質拡散の恐れも （3月14日 11:55）
- 爆発した３号機、放射線量は小さな程度 （3月14日 12:24）
- 福島第一２号機も冷却機能が停止 （3月14日 15:24）
- 福島第一２号機、燃料棒すべて露出…冷却水消失 （3月15日 02:38）
- 福島第一原発２号機で水位回復、露出２・８ｍ （3月15日 08:52）
- 爆発の２号機、燃料棒が２度にわたり完全露出 （3月15日 14:02）
- 福島第一１号機、核燃料の７割破損…東電試算 （3月16日 03:09）
- 第一原発事故はレベル６または７…米機関が見解 （3月16日 09:56）
- 福島第一原発の深刻度「レベル５」に引き上げ （3月18日 18:01）

最初の一週間の発表・報道 と「事実」

発表・報道	「事実」(現在の時点での)
INES レベル 5	INES レベル 7
1000 テラベクレル程度	77 万テラベクレル (3/18 までだと半分程度？)
圧力容器・格納容器はどれも健全	1-3 号機でメルトダウン、圧力容器・格納容器破損
放射性物質の深刻な放出はない	関東北部から岩手県にいたる広汎な汚染

- 放射性物質の放出量について 1000 倍程度嘘をいっていた
- このため、なんらかの対策がとられるべきであった地域が放置された
- 放出量の見積もりができていなかったとは考えられない

何故か不明だが、すぐにバレる嘘をいった。

当時私が思ったこと

3/11: ECCS が動作しなくなった → 炉心溶融は避けられないのではないか？
3/12: 1号機水素爆発「格納容器は爆発していない」→ ？
3/13: 3号機「水素爆発」「格納容器は爆発していない」→ ???

- 原子炉は本当はどうなってるんだろう？(本当は壊れてんじゃないのか？)
- 一体どれだけの放射性物質がどんなふうにでたんだろう？(すごい量の放射性物質がでてんじゃないか？)

放出された放射性物質の量

- 3/13 INES レベル4(数百テラベクレル以下)
- 3/18 INES レベル5(数百—数千テラベクレル)
- 4/12 INES レベル7(数万テラベクレル以上)
- 6月現在:「(ヨウ素換算)77万テラベクレル」(主にセシウムで 2万テラベクレル)、チェルノブイリの約 1/7

保安院の計算にはいっている放出のほとんどは 3/15-16 と 3/20-21 に起きているので、実際には 3/15-16 の時点でレベル7だったということ。

これは実は簡単な計算で当時容易に見積もることができた。

牧野の 3/18の見積り

放出量と汚染度分布がわかっているウィンズケール事故と比較した。

- ウィンズケール事故では、原子炉から50kmのところの汚染は典型的には$10^4\mathrm{Bq/m^2}$、総放出量は1000テラベクレル。
- 3/19における福島県での原発から50kmのところでの典型的な測定値は2-3μSv/h
- ヨウ素に対する換算係数を使うと $1\mu\mathrm{Sv/h} = 4\times10^5\mathrm{Bq/m^2}$(正しい数字は7。4は牧野の概算)
- なので、福島の汚染は $10^6\mathrm{Bq/m^2}$ となり、ウィンズケールの100倍
- 従って大体 1000 テラベクレルのウィンズケール事故の100倍、10万テラベクレル

ウィンズケール事故とは？

- 1957年10月にイギリス、ウィンズケールのプルトニウム生産専用原子炉で起こった。
- 原子炉は黒鉛減速炭酸ガス冷却炉。日本だと東海1号炉(既に停止・廃炉)
- 停止・点検中に黒鉛から発熱、火災に。消火まで16時間
- 約 1,000 テラベクレルのヨウ素が放出された

日本への輸出が決まった直後。イギリスが「事故の時の補償はしない」と通告してきたきっかけになった？→ 原子力損害賠償法

安全委員会の 4/12 日発表

- 3/16 までの放出はヨウ素で大体8万テラベクレル
- セシウムはその1/10

ということで、牧野の概算は2倍は違っていない。

但し、これは総放出量とは全く違う、ということに注意。爆発のあった3/12-14 にはより大量の放出があったはずだが、これはその3日間の強い西風のため全て太平洋にいったと思われる。 3/15 は事故後初めて北東からの風になった。

というわけで、見積もりは正しかったんだけど

- 何故か？(物理学者も含めて) あまり信用されなかった？
- (信用した (あるいは自分で計算して正しいと確認した) 人結構いたんだけど、情報発信していた人の中にはあまり、、、)

ということでなにか役に立ったかどうかは疑問。

他の物理学者からの情報発信はどういう感じだったか？

- 特に事故直後の1週間程度、原発事故の影響がどれほどのものか、は国・東京電力の公式発表やメディア報道からはよくわからなかった(例の「ただちに健康に影響はない」しか情報がなかった)
- ここまででみたように、国・東京電力の3月頃の発表と、現在わかっている当時の原子炉の実際の状況、放射性物質の放出状況には大きなずれがあった。

このギャップを埋めるのは「客観的で中立」な情報を提供する科学者の役割、とかいう議論もできないわけではない。実際はどうだったか？

天文学会MLに3/19に流れたメイルから

「福島原発の放射能を理解する」スライド公開
http://ribf.riken.jp/～koji/jishin/
素粒子実験分野の研究者／院生の皆さん
今回の震災に起因した福島原発の事故について国民の不安が高まっています。チェルノブイリのようになってしまうと思っている人も多いです。放射線を学び、利用し、国のお金で物理を研究させてもらっている我々が、持っている知識を周りの人々に伝えるべき時です。
アメリカのBen Monreal教授が非常に良い解説を作ってくれました。
もちろん個人的な見解ですが、我々ツイッター物理クラスタの有志はこれに賛同し、このスライドの日本語訳を作りました。能力不足から至らない点もあると思いますが、皆さん、これを利用して自分の周り（家族、近所、学校など）で国民の不安を少しでも取り除くための「街角紙芝居」に出て頂けませんでしょうか。
(以下略)

物理学者の活動の方向

先に紹介したメッセージは典型的

- 「チェルノブイリのようになってしまうと思っている人も多いです」(放射性物質放出量は実際なっていた)
- 「国民の不安を少しでも取り除く」(取り除くのは自明に正しいのか?)

つまり:ネット上でみられた科学者の活動の多くは、事故の規模を過小評価した上で「安全」を強調するものになってしまっていた。

何故か？はともかく前例はチェルノブイリでもあった
(ソ連だけでなくイギリス・フランスでも)。

科学者・国民の結構な部分は国の嘘に騙された

以下、あんまり天文学と関係ないが、シミュレーションはではどれくらい役に立ちえたか、という話を少し。

原子力安全基盤機構の
シミュレーション結果

10 原 シ 報 － 0003
JNES/NSAG10 － 0003

平成２１年度
地震時レベル２ＰＳＡの解析（ＢＷＲ）

平成 22 年 10 月

独立行政法人　原子力安全基盤機構

3/13 に BWR の構造、事故のモデルとかの資料がないかと調べていたら、原子力安全基盤機構の報告書というのを見つけた。

解析対象になっていた原子炉

- BWR-3
- BWR-4 (50万kW電気出力) (1号機？)
- BWR-4 Mark-I (福島第一 2-4 号機)
- BWR-5 Mark-II (福島第一 5,6 号機?)
- ABWR RCCV(浜岡5号機)

BWR-4 (50万kW電気出力) の代表的事故シーケンス

- 電源喪失 (TBU)
- インターフェースLOCA(V)
- 大LOCA時未臨界確保失敗 (AC)
- 小LOCA時未臨界確保失敗 (S2C)

LOCA: Loss of Coolant Accident, 原子炉冷却材喪失事故

原子炉の構造

図 2.6　BWR-4 MarkI 型の原子炉建屋概要図

電源喪失のシミュレーション結果詳細
(BWR-4の場合)

1時間で炉心露出

3時間で圧力容器破壊

炉心温度

炉心露出
炉心支持板破損
(リング1)
炉心支持板破損
(リング2)
炉心最高温度(K)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
時間（分）

環境放出量割合

環境放出量割合
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
時間（分）
Xeグループ
Csグループ
Baグループ
Teグループ
Ruグループ
Moグループ
Ceグループ
Laグループ
Uグループ
Cdグループ
Snグループ
CsIグループ

放射性物質分布

1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
割合
(-)
希ガス
CsI
CsOH
Te
Sr
Ce
FP グループ
炉心
サプレッション
ドライウェル
原子炉建屋
環境

シミュレーションでわかっていたこと

- 電源喪失事故の進展は速い。
  1 時間後炉心露出、3 時間後圧力容器破壊、7 時間後格納容器破壊、20 時間後建屋基礎貫通
- 格納容器破壊後環境への放出始まる。放出はシミュレーション時間範囲 (50 時間) でだらだら続く。
- 環境にでるのは主に稀ガス、ヨウ素、セシウム、テルル。ヨウ素で 10%程度、セシウムはその数分の一。

「現時点」での「事実」と思われるもの

- 1号機についてはほぼシミュレーション通りで手も足も出ないままに格納容器破壊にいたった。(東電 5/15 発表資料)
- 2、3 号機は1-2日遅れだけど基本的には同じ。

東電が発表したのは5月だけど、シミュレーション結果、事故に関する報道、発表資料、環境放射線レベルから推定した放出量からは 3/15 くらいにはほぼシミュレーション通りにものが動いていたことはわかっていた

原発事故シミュレーションについてのまとめ

- 福島原発で起きたタイプの事故 (電源喪失) については詳細なシミュレーションが昔から行われていた
- 結果は、基本的に数時間後 (非常用電源が何かあればそれがなくなって数時間後) にメルトダウン、稀ガス、ヨウ素、セシウムが大量放出される、というもの
- 5 月以降の東京電力発表では、ほぼシミュレーション通りになっていたとしている
- 但し、地震で壊れてたのではないかとか色々意見はある

シミュレーションがこんなに上手くいくのは何故？

例えば地震予知とか天気予報は難しいのに、原発事故ってそんなに簡単に計算できるのか？

これは実はできる。電源喪失から炉心溶融までは、圧力容器の圧力は (弁の作用で) 一定に保たれる。また、放射性物質の崩壊熱の大きさは正確にわかっている。このため、どれだけの率で水が蒸発していき、何時間後に炉心損傷するかはかなり正確にわかる。

圧力容器は燃料棒落下後そんなにもたない。格納容器は破壊にいたる圧力は正確にはわからないが、時間はそんなにずれない。

津波については？

これもシミュレーションあり。「地震に係る確率論的安全評価手法の改良 ＝ＢＷＲの事故シーケンスの試解析」
仮定:

- 海水ポンプは波高 7m 以上、復水貯蔵タンク/起動変圧器等の屋外設置機器は 15m で機能喪失
- 建屋への海水侵入は 13m、15m で機能喪失

結論:

- 7m 以上で炉心損傷確率が「1」。つまり、他が無傷でも海水ポンプ機能喪失だけで自動的に炉心損傷となる。

要するに

7m の津波でメルトダウンすると以前からわかっていた

但し、これは仮定＝結論みたいな話でシミュレーションしたからどうというものではない

「想定外」の 14m の津波が事故の原因、というのは嘘、とはいわないが、予測の範囲の津波でもどうせ事故になっていたはず

国会での議論

2006/12/13 巨大地震の発生に伴う安全機能の喪失など原発の危険から国民の安全を守ることに関する質問主意書
これの要点は地震、津波の時に

- ディーゼルは動かないのではないか？
- 燃料棒バーンアウトは起きないのか？

というもの。
答弁

- 我が国において、非常用ディーゼル発電機のトラブルにより原子炉が停止した事例はなく、また、必要な電源が確保できずに冷却機能が失われた事例はない。
- 経済産業省としては、お尋ねの評価は行っておらず、原子炉の冷却ができない事態が生じないように安全の確保に万全を期しているところである。

国の答弁の意味

この答弁を素直に読むと

起こったことがない事故のことなんか知らん
今まで事故起きてないんだから大丈夫だ

と書いてある。予想されていてもまだ起こってない事故には対策しない、といってる

つまり: 「想定外」＝まだ起こってなかったので対策しませんでした

どうしてそんな馬鹿なことになったか？

人間の特性７箇条（高橋秀俊）

- 人間は気まぐれである
- 人間は怠け者である
- 人間は不注意である
- 人間は根気が無い
- 人間は単調を嫌う
- 人間は理論的思考力に弱い
- 人間は何をするかわからない

事故が起きてないと段々さぼる。

というだけかも。

まとめ

- 研究のやり方は色々
- 私の場合はシミュレーションが道具。そのための計算方法・計算機を作ることも研究の重要な一部
- 計算方法とかの研究は普通の意味での理論研究に近いところも。
- シミュレーション天文学の方法は他の分野でも実際に役に立っている
- 理論天文学的アプローチは役に立つ (こともあるかもしれない)