

スタートアップセミナー (理学部物理学科)

現代の宇宙物理学 (2010.5.20)

滝沢元和
(宇宙物理学グループ)

レポート問題

[設問0] 名前と学生番号

[設問1] 今日の講義の内容について要約しなさい。

[設問2] 質問、感想などご自由に。

- 全体で1ページ程度に。
- 紙がたりなければ裏も使ってください。
- 5/21(金)17:00までに滝沢研究室のポストに提出してください。

お品書き

- 宇宙物理学とはどういう学問か？
- 宇宙の階層構造
- 宇宙を研究する手段
- 山形大学での研究の紹介

宇宙物理学とはどういう
学問か？

宇宙物理学とはどういう学問か？(1)

- 「物理学」を道具として「宇宙」を理解する。
 - 物理法則(自然のルール)は地球上でも遠い宇宙でも同じ(はず)。
 - 身の回りの現象(放物運動、電磁石)と同じように宇宙での現象(銀河や星の性質)も理解できる。
 - 星や銀河はどうやってできたのか？宇宙の未来は？
- 「宇宙」を使って「物理学」を調べる。
 - 地球上の実験室では再現不可能な極限状況(強重力、超高温、超希薄、、)が宇宙には存在。
 - 天然の実験室(コントロールはなかなかきかないが、、、)
- ただし、この二つの側面は必ずしも明確に分かれるものではない。

宇宙物理学とはどういう学問か？(2)

■ 研究対象

- 星、銀河、ブラックホール、宇宙そのものなど
- どうやってできたか？
- その性質は？
- 将来どうなるか？



■ 研究手法

- 理論計算(紙と鉛筆)
- 観測(光、電波、X線 etc)
- コンピューターシミュレーション



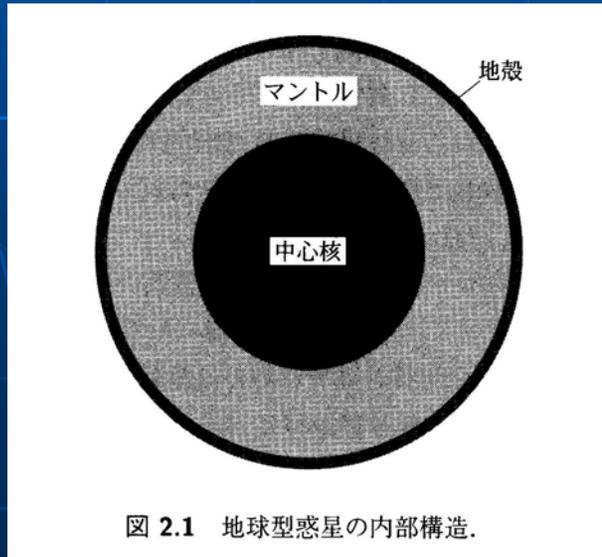
宇宙の階層構造

宇宙の階層構造

- 宇宙では物は必ずしも一様には分布していない。
- スケール毎に特徴的な構造が見られる。
——>宇宙の階層構造
- 小さい——>大きい \equiv 近い——>遠い
- 地球からスタートしてより大きな(遠くの)構造を俯瞰してみる。

地球

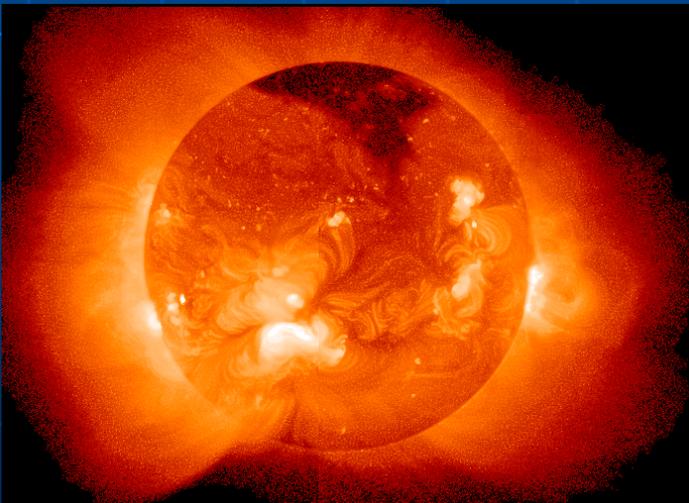
- 質量 $5.97 \times 10^{24} \text{kg}$
- 半径 6375 km
- 中心に金属核(主に鉄とニッケル)
- そのまわりを岩石
- 表面に薄い大気(酸素、窒素、)



太陽



- 質量 $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$
(地球の33万倍)
- 半径 $6.96 \times 10^8 \text{m}$
(地球の110倍)
- 地球から一番近い恒星
(普通の星)
- 水素からヘリウムへの核融合をエネルギー源にして自ら光り輝く。

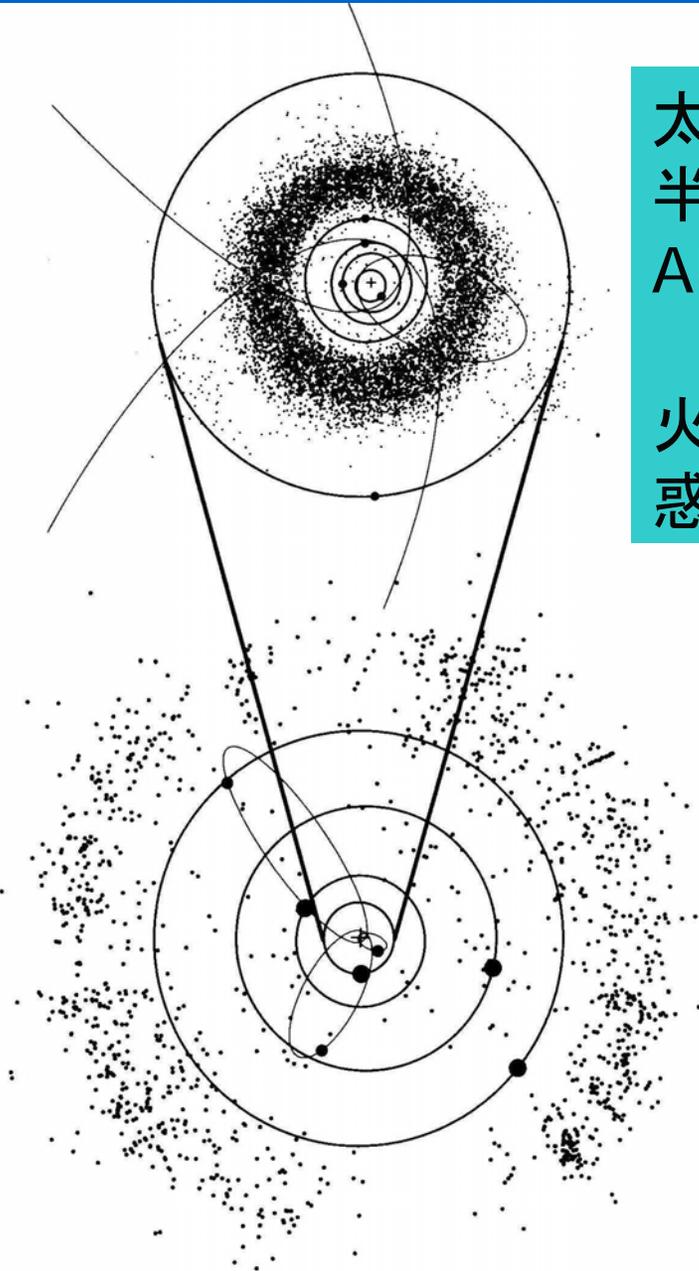


太陽系(1)



- 太陽を中心にして、その周囲を様々な小天体が運動
- 惑星(水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星)とそれらの衛星(月など)
- 小惑星
- 彗星
- 太陽系外縁天体(冥王星など)

太陽系(2)



太陽系の概観: 木星より内側
半径 5.2AU

AU: 地球と太陽の距離

火星と木星の間には無数の小惑星が分布している

太陽系の概観: 木星より外側
海王星軌道で半径 30.1AU

AU: 地球と太陽の距離

海王星の外側に太陽系外縁天体が多数存在。冥王星はこの種の物のなかで大きめの物

恒星の世界



うまれてまもない星。
(プレアデス星団)



太陽は大人の星。
遠くから太陽を見れば
夜空に見える普通の星々
のようにみえるはず。

宇宙にはガスやチリがあつまっているところがあります。そのなかでさらにガスやチリがあつまって星は生まれます。

銀河系

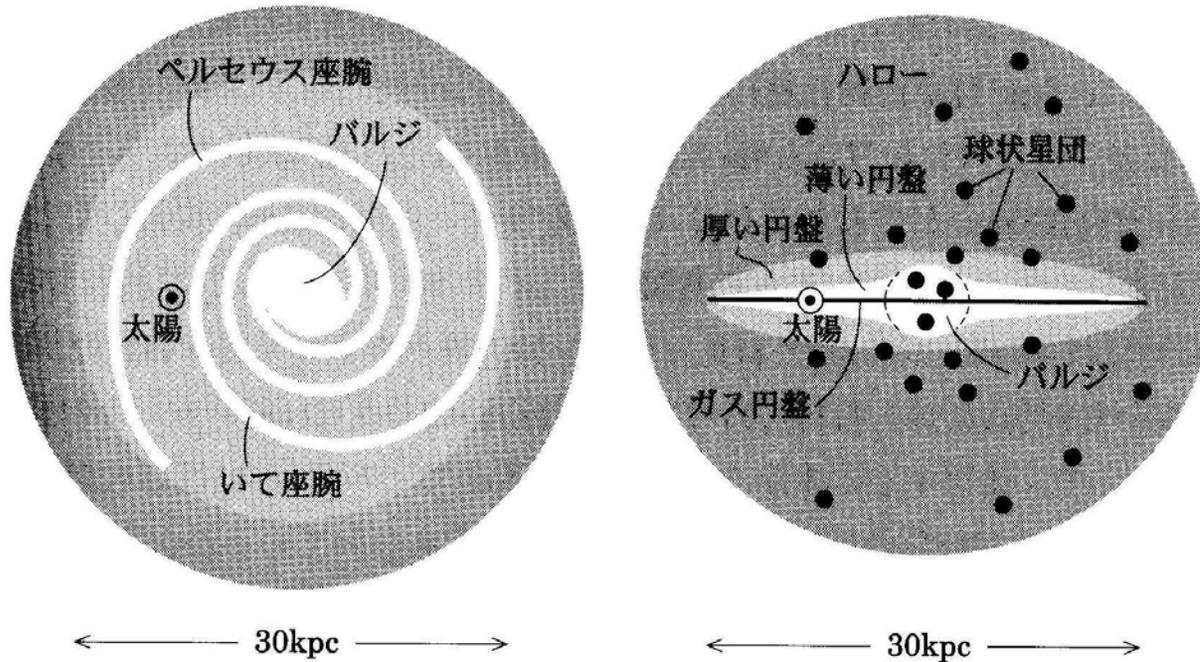


図 1.24 現代の銀河系像の概略. (左) 円盤正面から見た構造, (右) 円盤側面から見た構造.



銀河系を外から見たら
たぶんこう見える

- 太陽系は「銀河系」という星の集団の一員。
- 銀河系は円盤状で直径おおよそ98000光年
- 太陽系は中心から26000光年離れた“田舎”にある。
- 1光年= 9.4×10^{12} km (光が1年間にすすむ距離)



楕円銀河

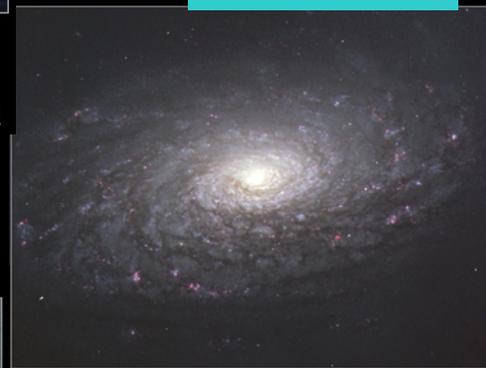
銀河

渦巻き銀河

- 太陽のような星が数千億個ぐらい集まった天体。
- 何種類かの特徴的な形態を持つ
 - 楕円銀河
 - 渦巻き銀河
 - 棒渦巻き銀河
 - 不規則銀河
- 恒星、ガス雲、正体不明の暗黒物質etc

口径60cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12→F7.31, レデューサー使用)
冷却CCDカメラ (Ultima 01-16)
露出時間: 10分×5, フィルタ: R-60, 疑似カラー処理, 画像範囲: 12.63×8.51'
観測場所: 国立天文台 (三鷹)

H. Fukushima and Y. Ishibashi 国立天文台 広報普及室



M 63 (NGC 5055) Suprime-Cam (B, V, H α)
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan June 22, 2000
Copyright © 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

NGC4548 [M91?] (かみのけ座にある棒渦巻き銀河)



棒渦巻き銀河

M91は、メシエのカタログの位置には存在が確認されていない。いくつかの候補、説があるが、NGC4548はそのうちのひとつである。

口径60cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astroned 3000SP-2)
露出時間: 6分×6, フィルタ: 1バンド, 疑似カラー処理, 画像範囲: 12.80×8.71'

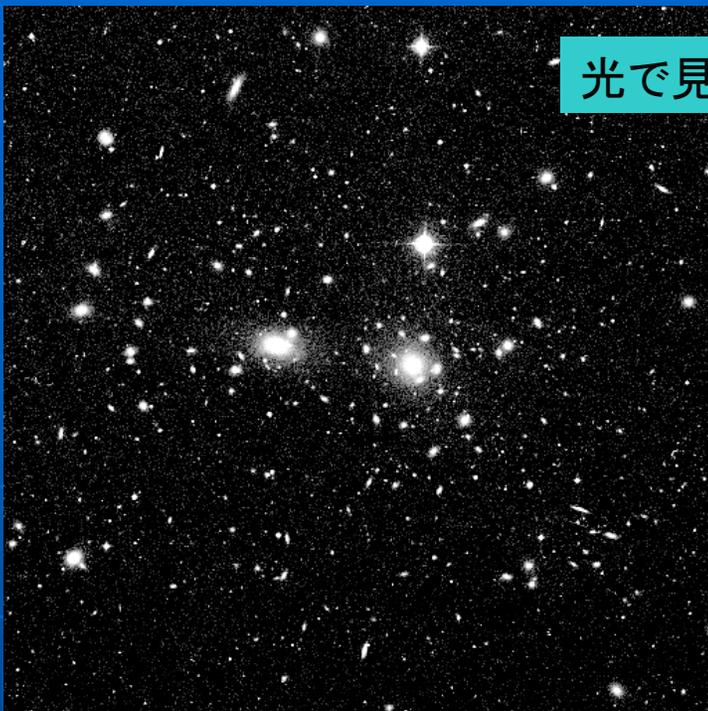
H. Fukushima and T. Sekiguchi 国立天文台 広報普及室



Dwarf Irregular Galaxy Leo A Suprime-Cam (B, R)
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan August 5, 2004
Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

不規則銀河

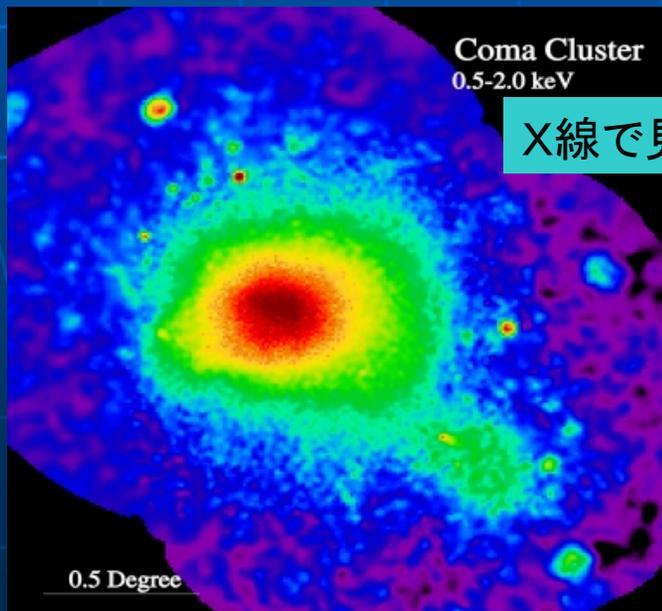
光で見た銀河団



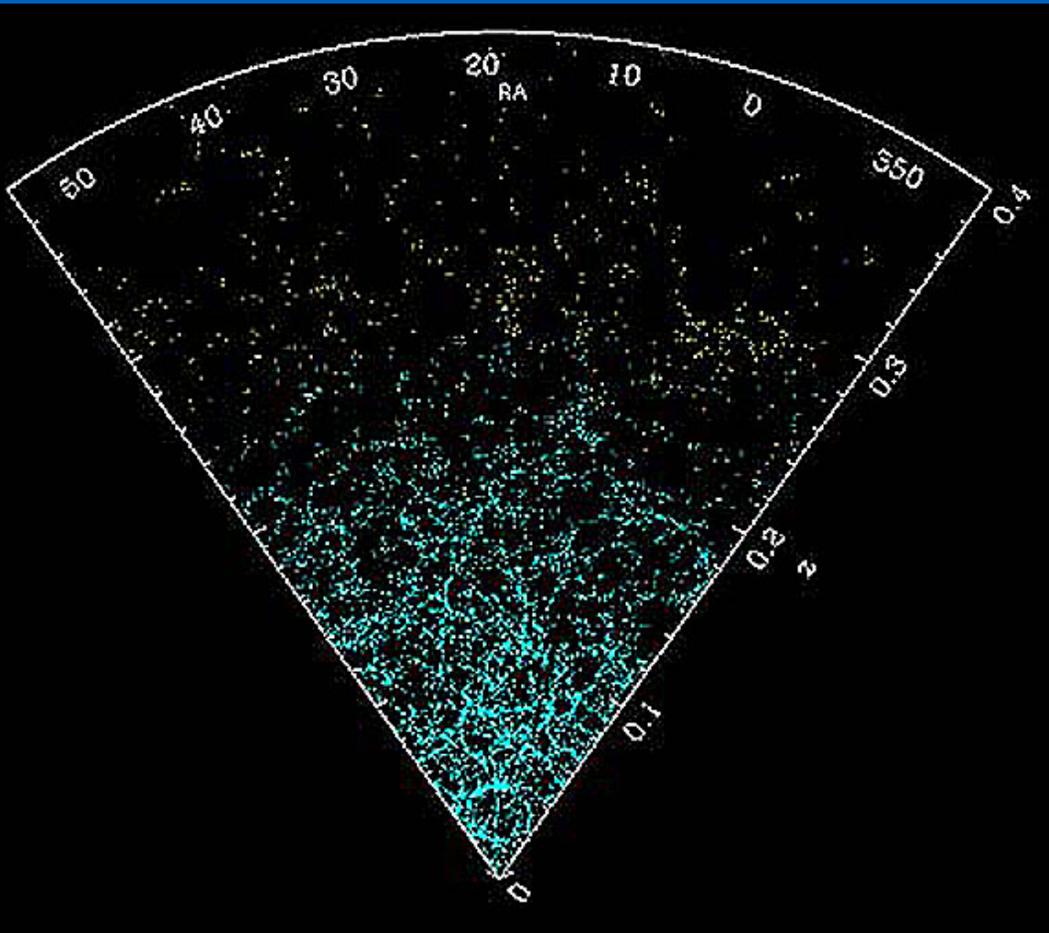
銀河団

- 銀河も集団をつくっている。
- 数10—1000個程度の銀河
- 高温ガス
- 正体不明の暗黒物質

X線で見た銀河団

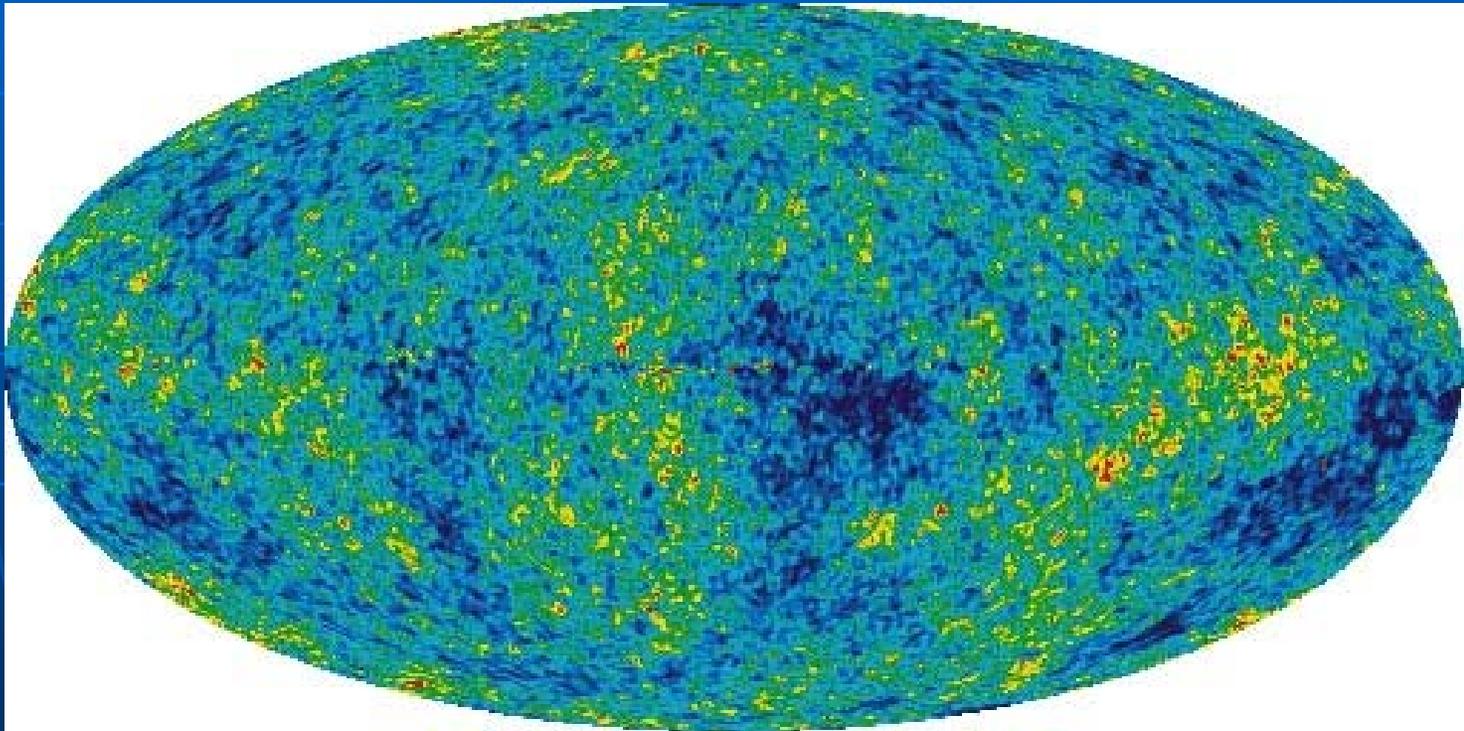


宇宙の大規模構造



- 銀河の空間分布を調べてみた。
- 宇宙の中で銀河は一樣に分布しているわけではない。
- 網目状の構造

マイクロ波背景放射： 宇宙がかつて熱かったときの名残



宇宙の階層構造：おさらい

地球



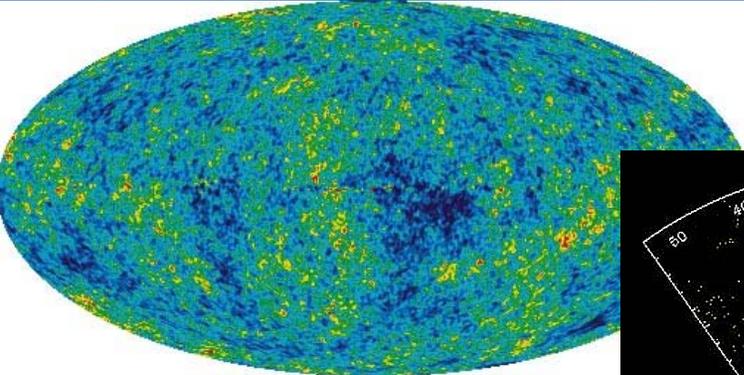
太陽系



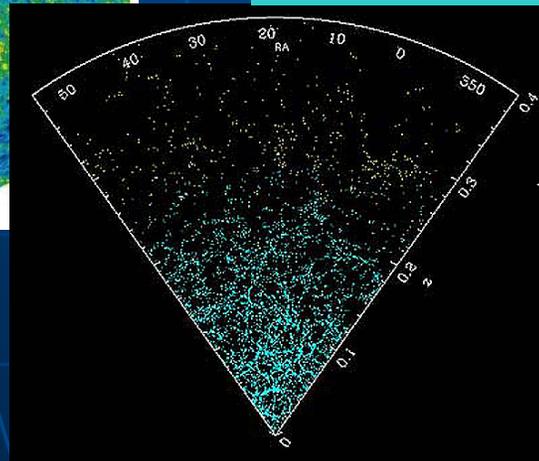
銀河



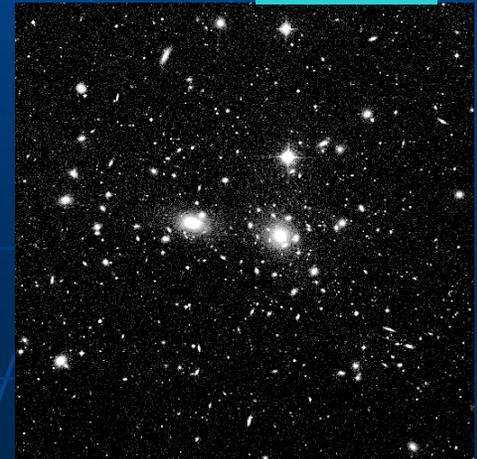
宇宙マイクロ波背景放射



宇宙の大規模構造



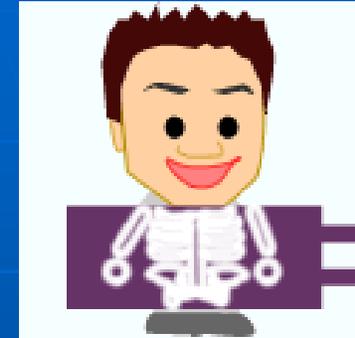
銀河団



宇宙を研究する手段

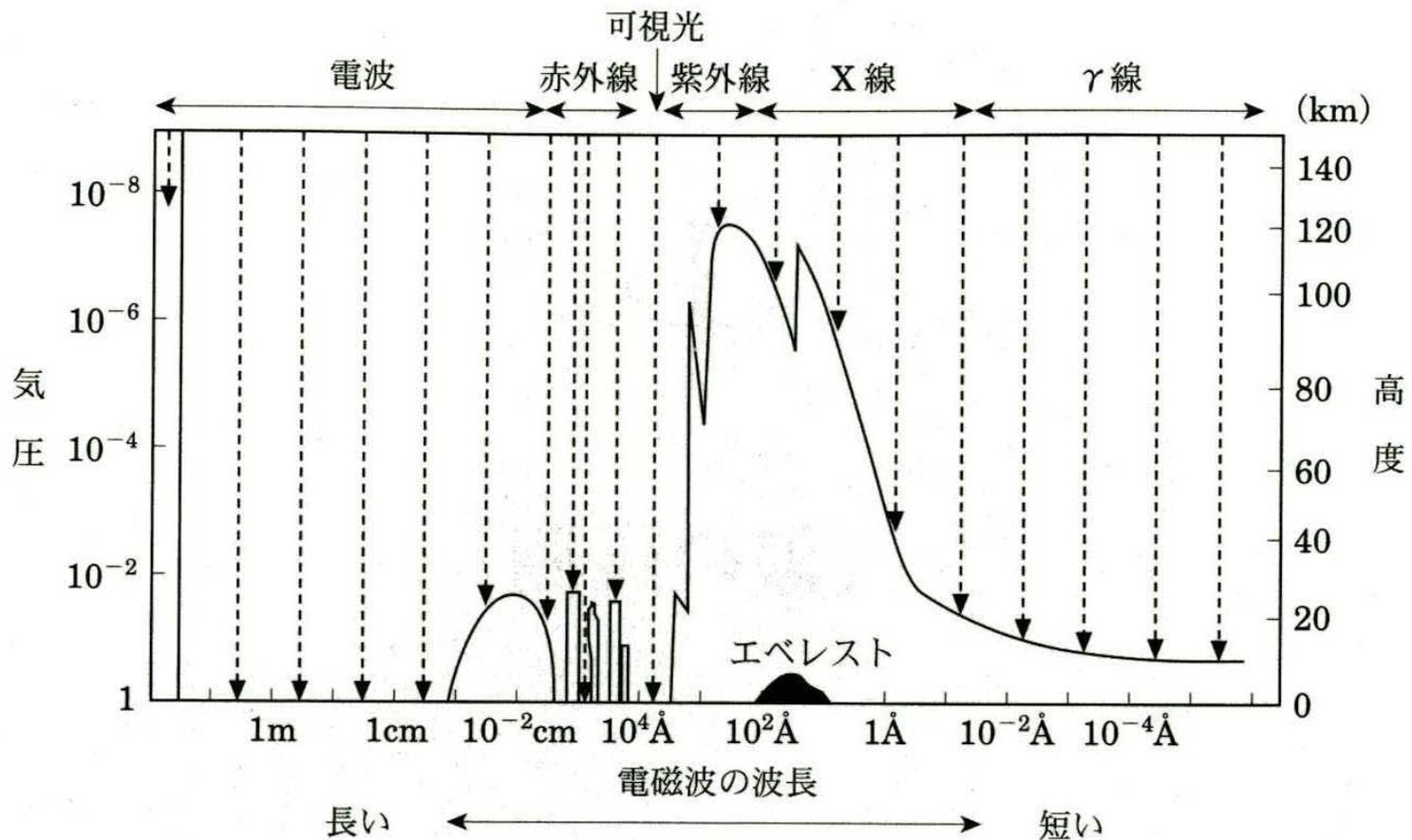
観測

宇宙をみる手段：電磁波



電波、赤外線、光、紫外線、X線：みな同じ電磁波の仲間
ただし、波長(エネルギー)が違う====>違う温度の世界が見える。

大気之窗



大気圏外から入った電磁波が到達できる高度

電波、可視光、赤外線の一部は地上まで到達できる。が他の波長では地上までは届かない。

光で見る宇宙



- 人類が宇宙を見る最古の手段。
- 数千度—1万度くらいの世界がよくみえる。
 - 太陽
 - 普通の星



M 63 (NGC 5055) Suprime-Cam (B, V, H α)
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan June 22, 2000
Copyright © 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

太陽のような星が数千億個ぐらい集まってできた銀河



Galaxy Cluster RX J0152.7-1357
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
Copyright © 2003, National Astronomical Observatory of Japan, All rights reserved.

銀河が数百個集まってできた銀河団

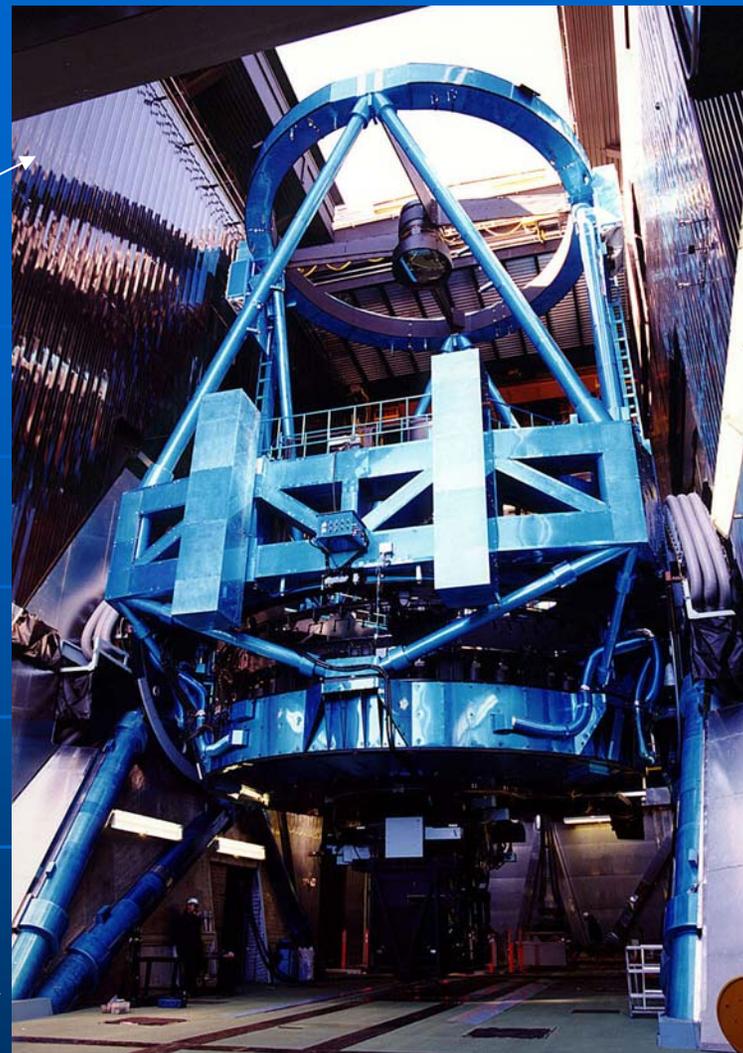
光で宇宙を見る目



ハワイ島マウナケア山頂の巨大望遠鏡群
世界の天文学の最前線基地の一つ



図 1.2 おもな大型望遠鏡の建設地.



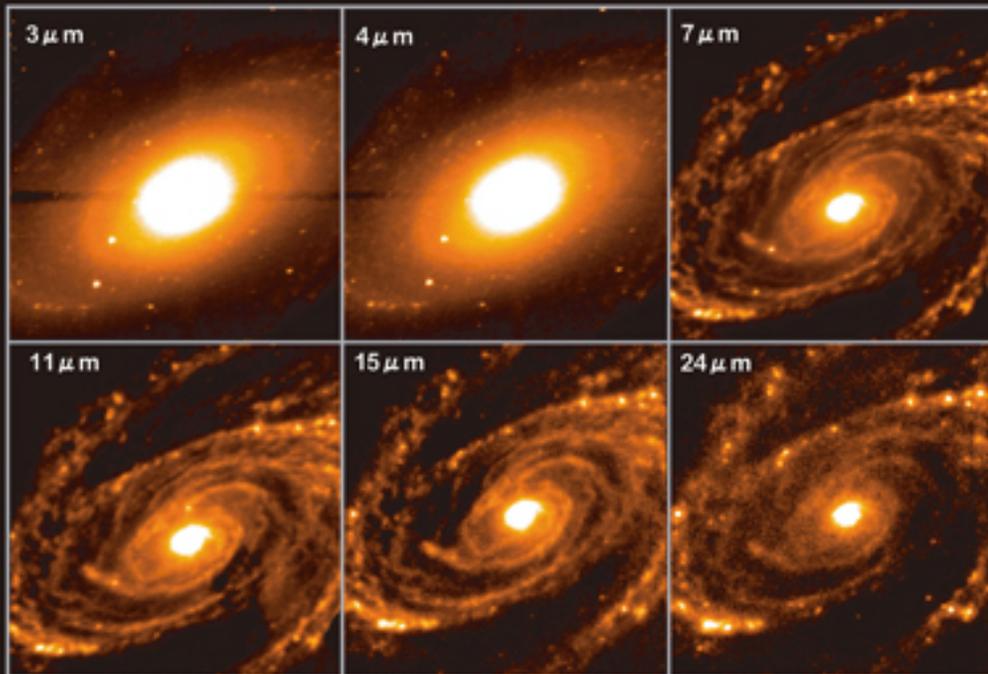
すばる望遠鏡(口径8.2m)
世界トップクラスの光学望遠鏡の一つ

赤外線で見える宇宙

あかり衛星 (2006--)



渦巻き銀河M81の近・中間赤外線画像



「あかり」近・中間赤外線カメラ



2006年5月22日

波長によって見えている物が違う。
星、ガス、塵など

- 光よりは低温の世界が見える。
- 軽い星、ガス、チリなど
- 一部は地上からも観測可能
- 人工衛星による観測も

電波で宇宙を見る



野辺山電波観測所45m電波望遠鏡

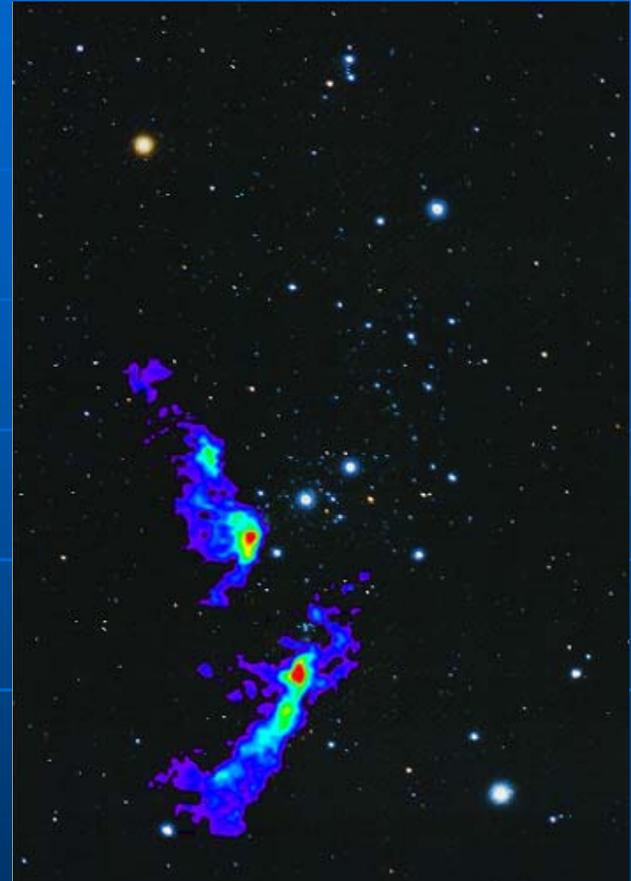
- 電波：光・赤外線よりも波長の長い（振動数の低い）電磁波。
- TV, ラジオ、携帯電話、無線LANなど
- 光よりも温度の低い世界が見れる。
（星の材料、星ができつつある場所など）

地球外文明からの通信電波も受かるかも？

電波で見る宇宙



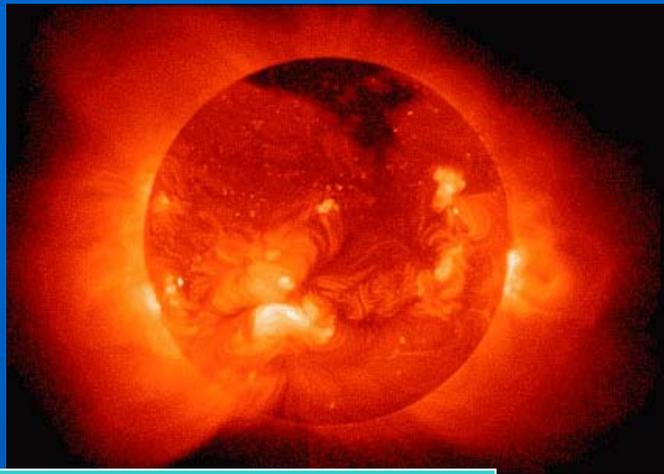
光で見たオリオン座
(数千度の世界)



電波で見たオリオン座
(氷点下100-200度の世界)

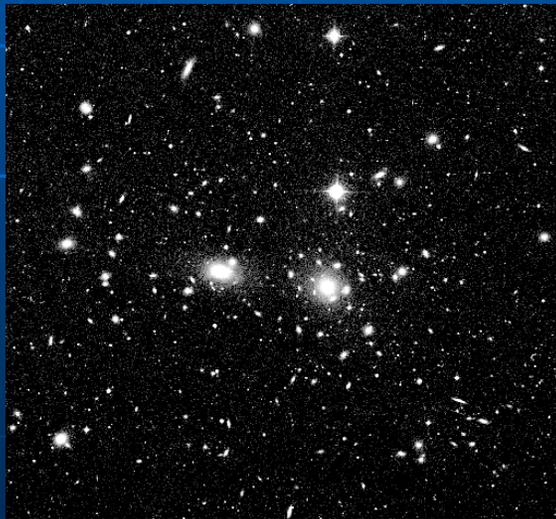
太陽の10万倍もの質量の冷たいガスが存在し、
星になりつつあると考えられている

X線で宇宙を見る

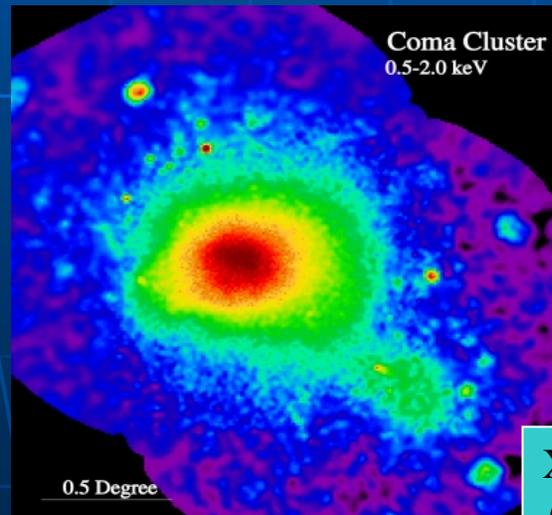


X線で見た太陽
(コロナ、数100万度の世界)
太陽表面自体は約6000度

- X線: 光よりも波長の短い(振動数の高い)電磁波。
- 病院のレントゲン、空港の手荷物検査など
- 光よりも温度の高い世界(数千万―数億度)がよく見える。
 - 太陽コロナ
 - 銀河団高温ガス
 - 活動銀河中心核



光で見た銀河団
(数100個の銀河の集まり)



X線で見た銀河団
(数千万から数億度の高温ガス)

X線で宇宙を見る目

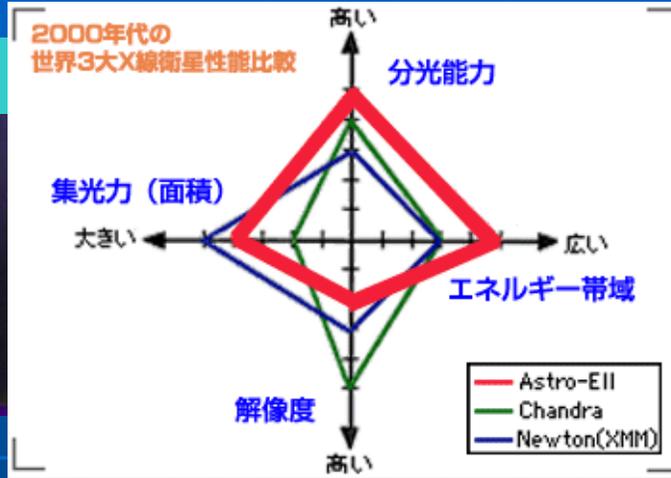


ニュートン(欧)



チャンドラ(米)

すざく(日本 2005--)



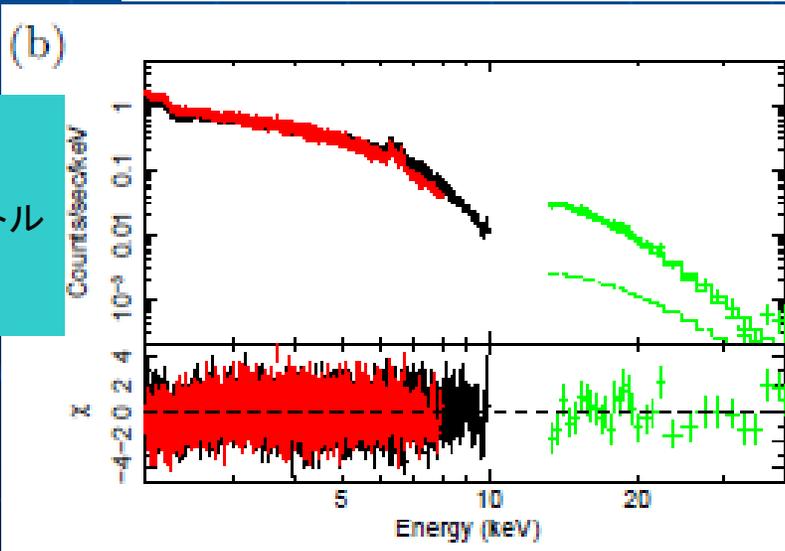
- X線は地球大気に吸収されるため、地上までは届かない。

——> 観測装置を大気圏外に持っていくのが必要

- 現在、異なった特徴をもった3つの人工衛星が活躍中。

- チャンドラ(高解像度)
- ニュートン(大集光力)
- すざく(広いエネルギー帯域、高エネルギー分解能)

- 山形大でも「すざく」を用いて銀河団や中性子星の観測をおこなっている。



すざく衛星による銀河団A2319の広帯域X線スペクトル (菅原知佳さんの修士論文より)

電磁波以外の手段

- 宇宙線
 - 宇宙から降ってくる陽子、電子、各種イオンなどの高エネルギー粒子
 - 天体からの重要な情報を持ってはいるが、必ずしもまっすぐとんでくるわけではないので、どこからきたのか起源がはっきりしていない。
- ニュートリノ
 - 非常に反応しにくい軽い粒子
 - 反応しにくい＝電磁波では見えないところからの情報も得られる。けど検出しにくい。
- 重力波
 - 時間空間の揺らぎが波となって伝わるもの
 - 強くて激しく時間変動する重力に関係した天体現象の情報が得られる。
 - 検出は大変むづかしい。

宇宙を研究する手段

コンピューターシミュレーション

宇宙物理学でのコンピューターシミュレーションの重要性

- 普通は、理論(頭で考える&紙と鉛筆で計算)+観測(しっかり観察)+実験(うごかしてみる)。
- でも宇宙でおきていることを実験することは難しい(ほとんど無理)
 - 大きさ、重さ、時間のスケールが全然違う。
 - 地球上ではつukれないような特別な状態(すごく熱い、すごく強い力、ものがほとんどない)
- けど自然界のルールは地球の上でも遠くの宇宙でもおなじ(はず)。
- ルールがわかっているならば、コンピューター上でシミュレーションをする。
——>理論、観測に続く第3の柱

コンピューターの進歩

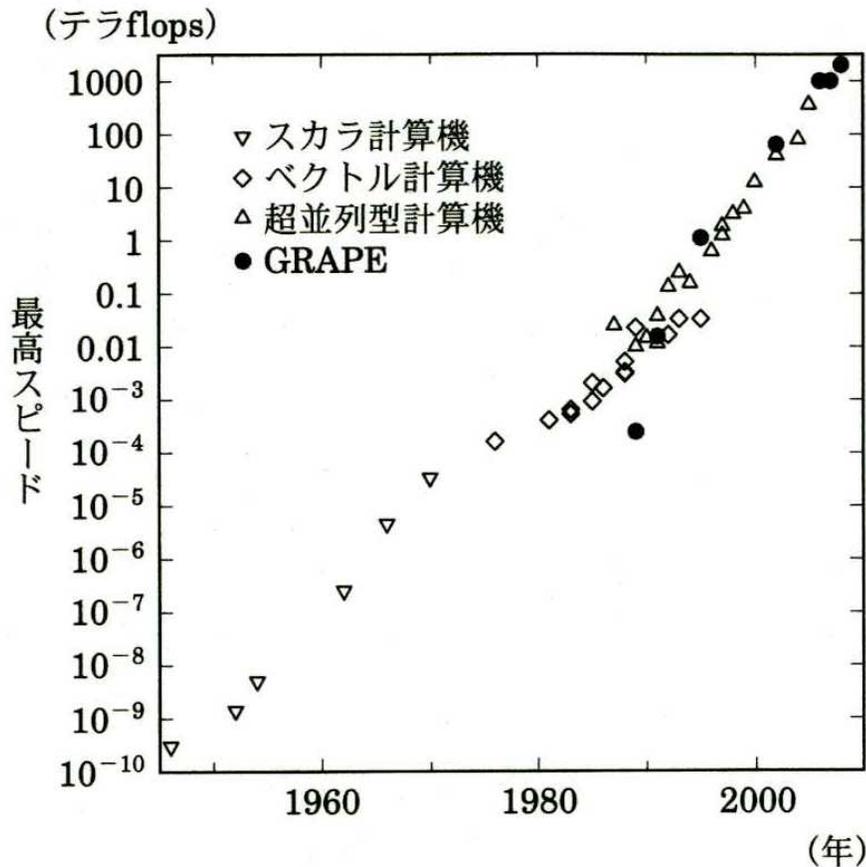


図 1.3 過去 60 年間の計算機の発達.

- 過去60年間に約10兆倍ものスピードアップ (ほぼ10年ごとに100倍)
- 幸いにして値段の上がり方はこれよりも遅い。場合によっては下がっていることも(実験装置だとうちはいかない)。
- ますます重要性は増している。

どんなコンピューターを使うのか？

- もちろん普通のパソコンでもできますが、、より速く大規模な計算をするために、様々な種類の試みがおこなわれている。
 - 並列計算機
 - 専用計算機
 - General Purpose Graphic Processing Unit (GPGPU)



並列計算機



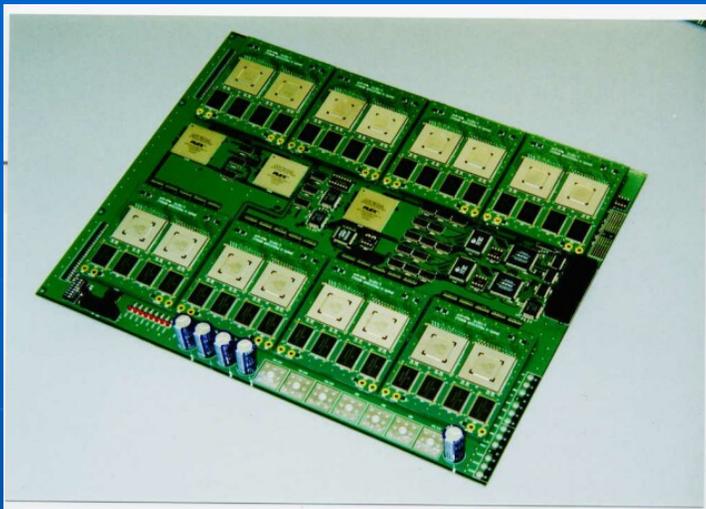
国立天文台の一般計算
サーバー
ほとんど手作りです。



国立天文台のCray XT4

少し高級なパソコンが700台
ぐらい集まったような物

- 多数の計算機を集めて同時に分業させて計算する。
- 単体の計算機をスピードアップするだけよりも電力消費量、発熱、値段などの点で有利。
- 実は最近のパソコンも小規模ながらも並列計算機（いわゆるマルチコアCPUをもったものは同時に2-4つの計算をおこなっている）。



専用計算機

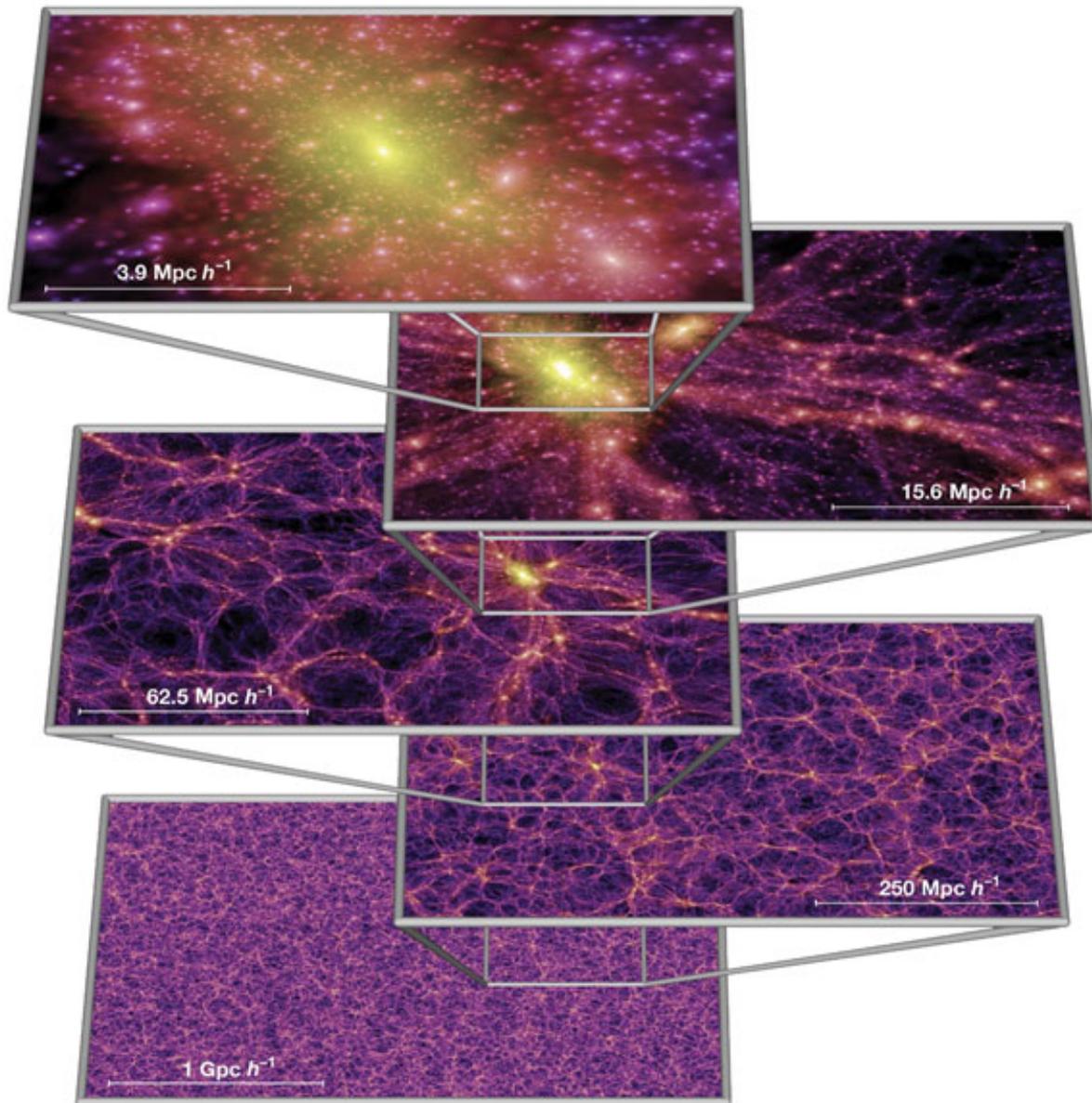
- 普通のコンピューターは“汎用”（プログラムを書き換えれば何でもできる）。
- 特定の問題専用の回路をもったコンピューターを自作。
 - コストパフォーマンスは大幅に改善
 - ただし、どういう問題にも使えるというわけではない、
- GRAPE（重力多体問題専用計算機）



GPGPU



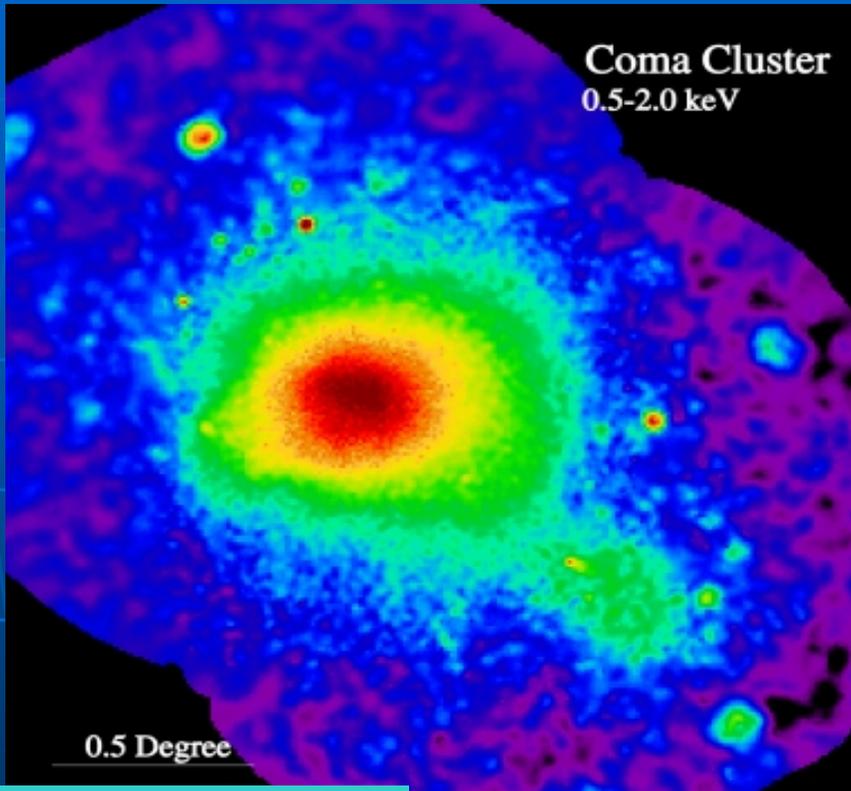
- Graphical Processing Unit (GPU): パソコンで画像処理を専門におこなっている部分。
- 同一の命令を多数同時におこなうような構造になっている。
- 画像処理以外のこともプログラムを組めば可能に
 - 普通のコンピューターより安い。
 - 専用機をつくるよりは簡単。
 - ただし、使いこなすのは少々難しい。
 - どんな問題にも適しているというわけではない



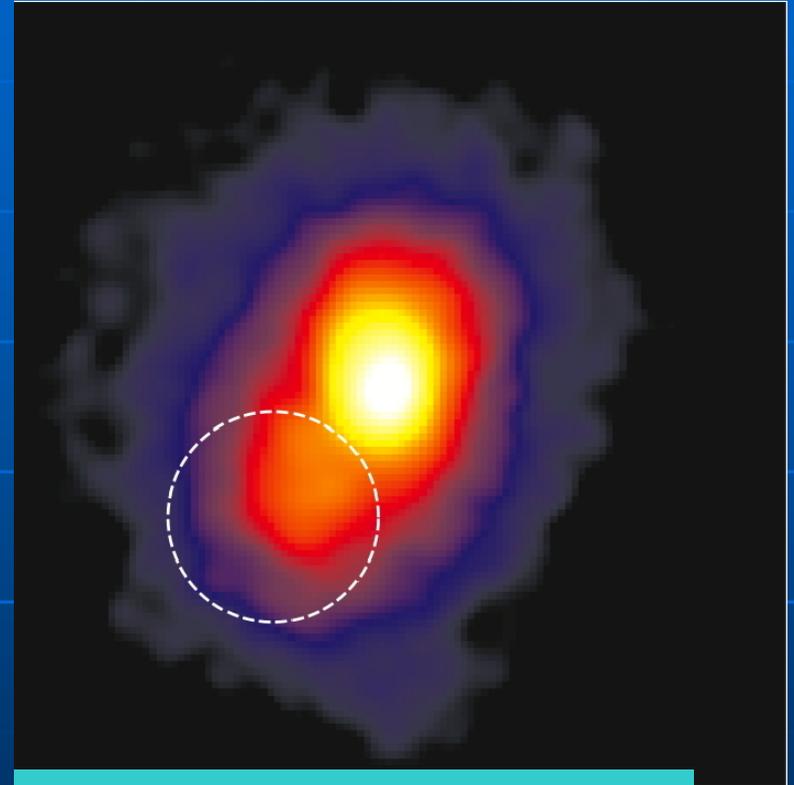
宇宙の大規模構造の
コンピュータシミュレーション
(Springel et al. 2005)

宇宙での暗黒物質
(ダークマター)
の分布の様子

衝突している？銀河団



かみのけ座銀河団



RXJ1347銀河団

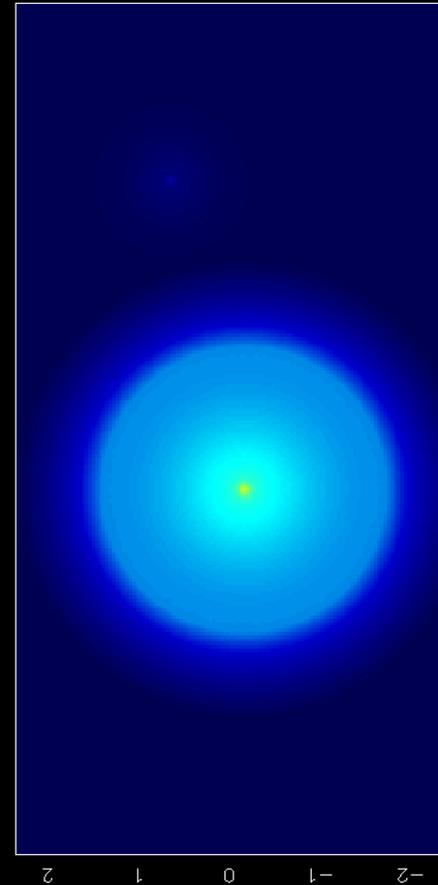
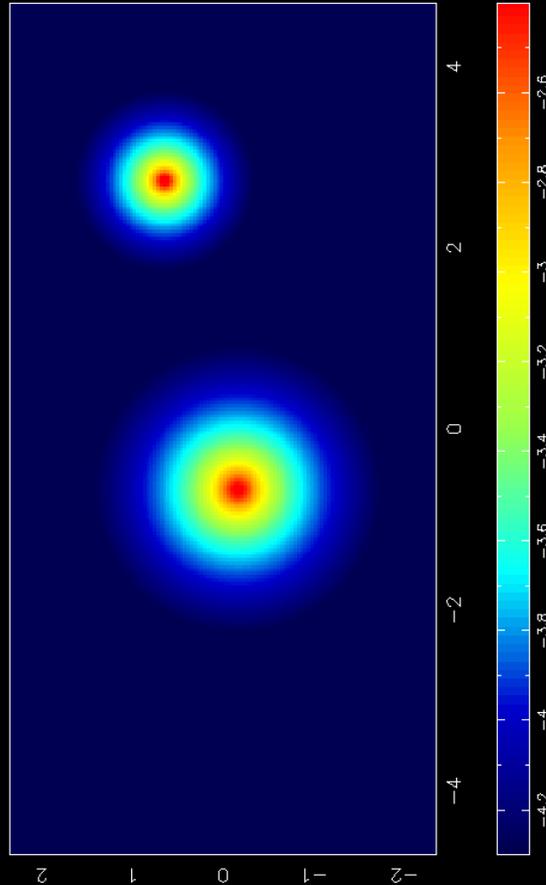
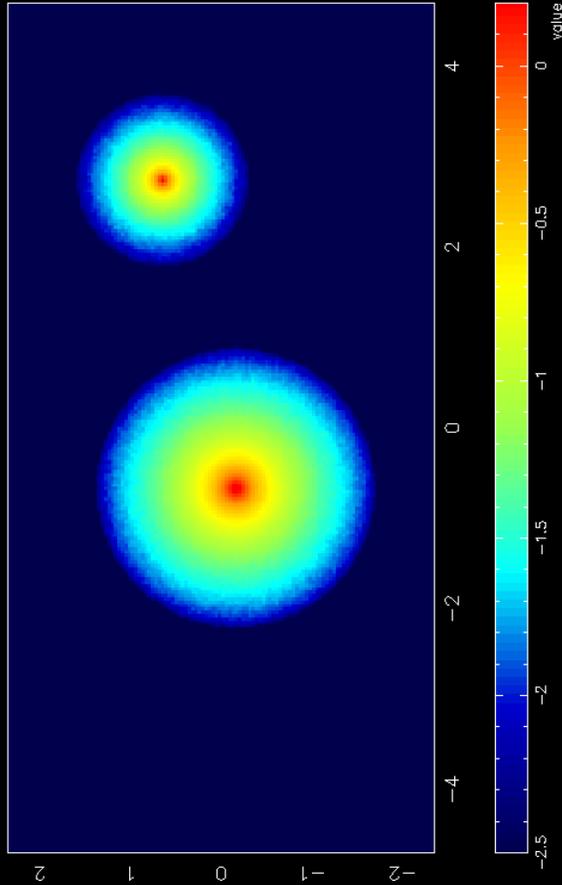
点線で囲んだ部分には宇宙でも最も熱い(約3億度)ガスが見つかっている

銀河団の衝突のコンピューターシミュレーション

暗黒物質 (ダークマター)

ガス

ガスの温度

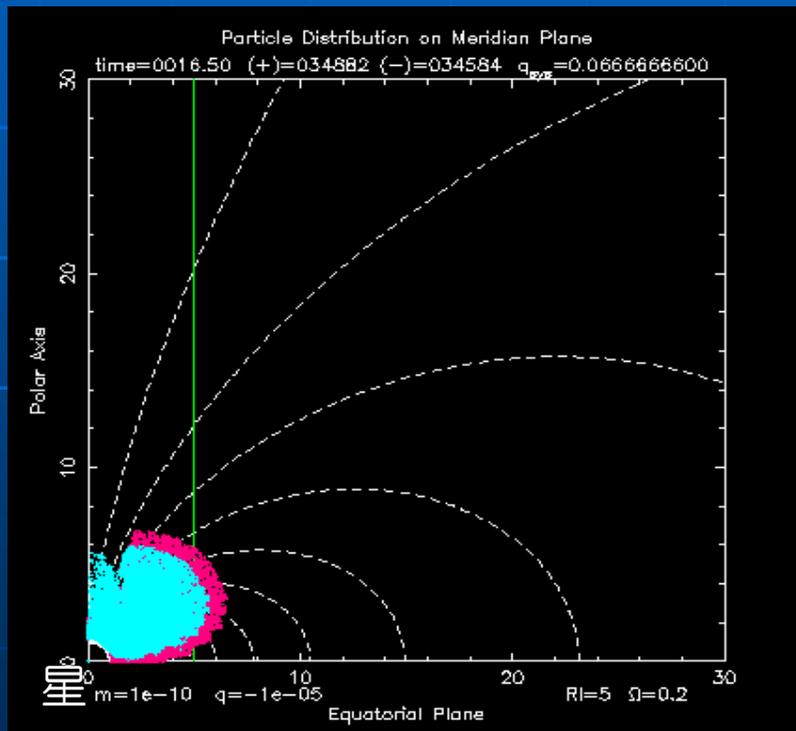


パルサー磁気圏の粒子シミュレーション

(大学院生結城君による計算。GRAPEを使用)

粒子分布

- 負電荷
- 正電荷



- パルサー: 強力な磁場を持って高速で自転している中性子星
- 磁石を回転 = 発電所
- 電子や陽電子が電気的な力で星から引き出されて吹き出している様子が見える

山形大学での研究の紹介

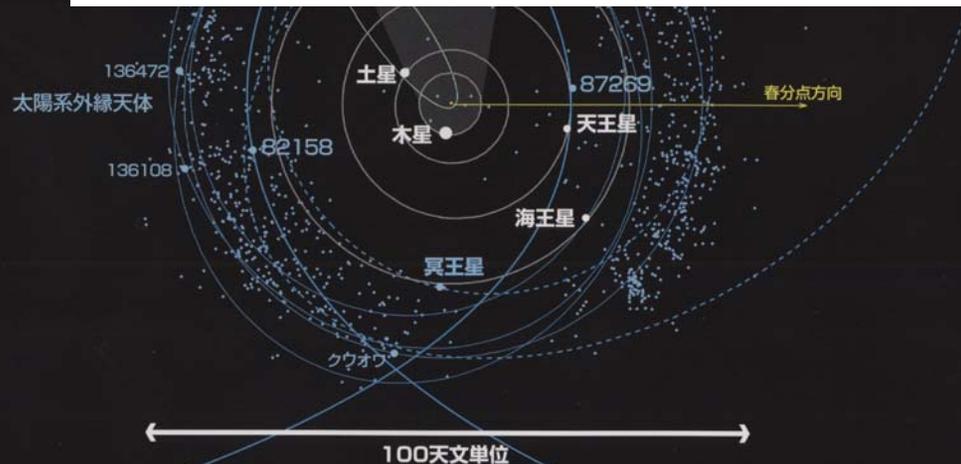
理学部物理学科宇宙物理学グループ

(梅林、柴田、滝沢)

研究テーマ 星と惑星系の形成 (梅林)

- 太陽系の新しい姿 --- 惑星、準惑星、小天体
- 系外惑星の発見 --- >400個、灼熱の巨大惑星、特異な楕円軌道

→ これらを解明する星と惑星系形成の研究で重要な原始惑星系ガス円盤の物理的・化学的進化を調べる





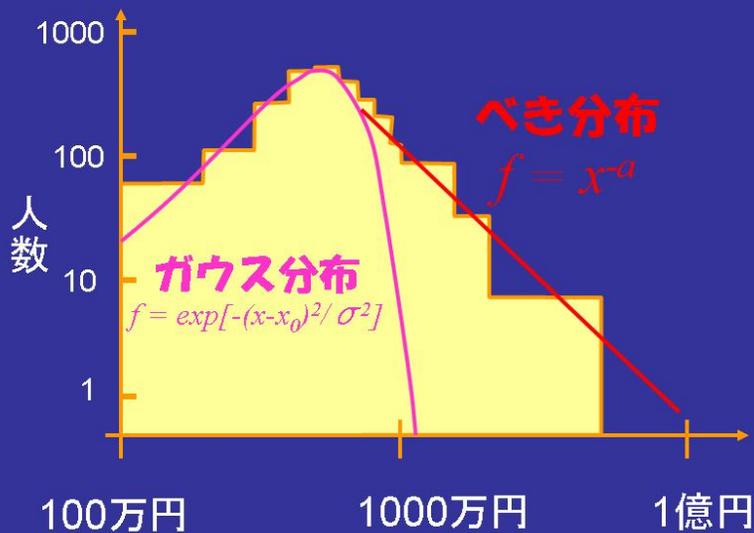
また、星と惑星系の形成をコントロールする要因はなんでしょう。

この問題のかぎであるガスの電離過程を調べ、磁場とガスの結合状態を明らかにする研究をしています。

研究成果

- 寿命の短い放射性元素によるガスの電離率の研究(2009)
- 放射性元素によるガスの電離率に対するダストの沈殿・成長の影響の研究(Katsuma, 2009年度修士論文)

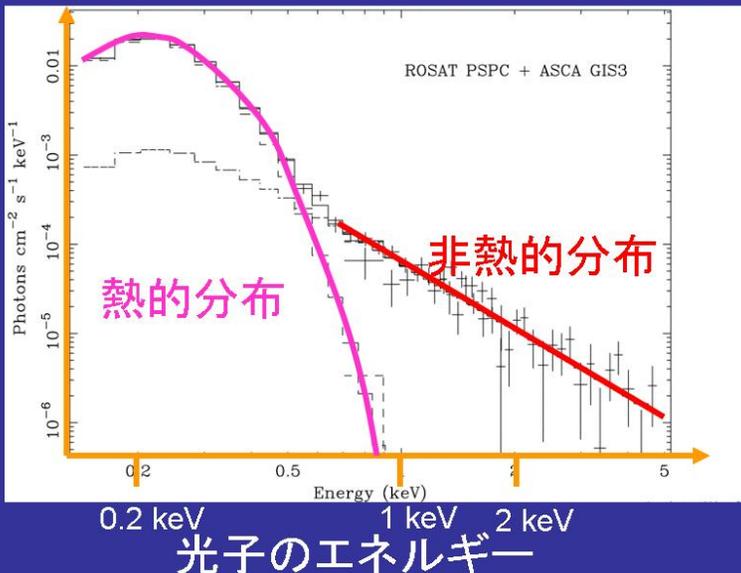
日本国民の年収の分布(国税庁HPより)



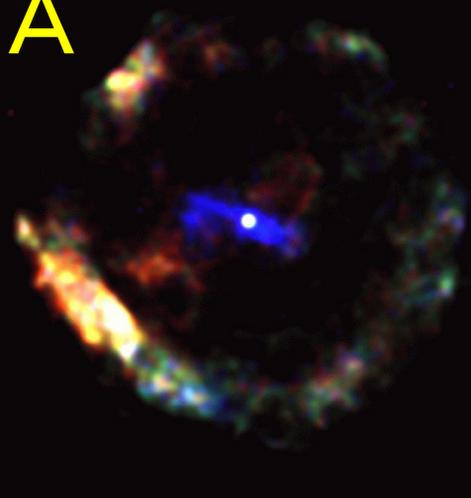
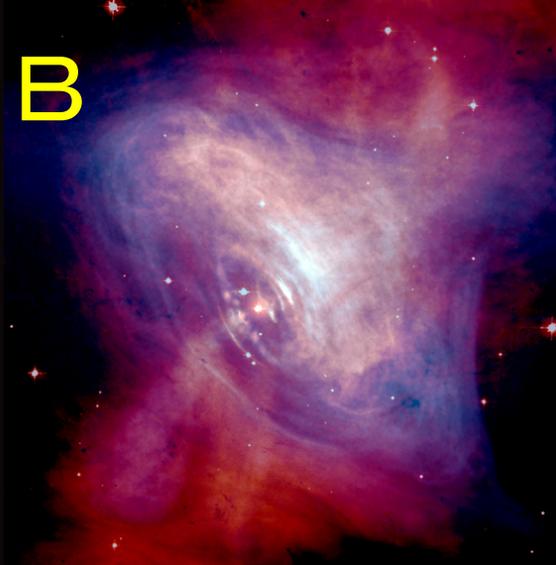
研究紹介:山形大学物理学科
宇宙物理研究グループ
柴田研究室

これは日本国民の年収の分布です。ガウス分布をしたサラリーマンと「べき分布」(直線)をした高額所得者のふたつの成分があることがわかります。なぜ高額所得者が発生するのでしょうか？あなたはどっちに将来はいるのでしょうか？

パルサーから来る光子のエネルギー分布



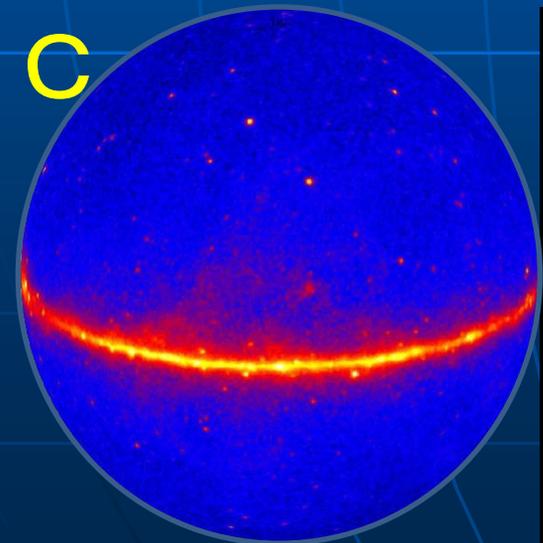
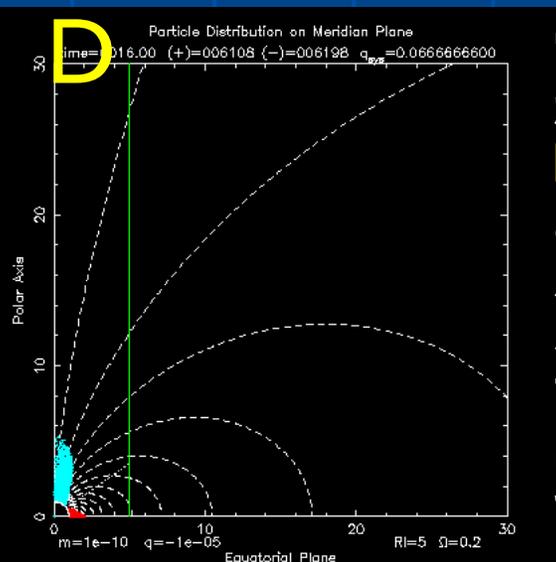
右図は天体から来る光子数のエネルギーごとの分布(スペクトル)です。パルサーをはじめ多くの天体からやってくる光子はこのようにサラリーマンの分布に相当する熱的分布と高額所得者に相当する非熱的な、超高いエネルギーの分布を持っています。いったいどんなメカニズムで宇宙で超高エネルギー光子、そしてそのもとになる超高エネルギー粒子がつけられるのでしょうか。これが研究の主テーマです。

A**B**

A: 質量の大きな恒星は最期に超新星爆発を起こしこのような星雲を作り、中性子星やブラックホールを残します。**B**: 中心星からは高速に加速された電子が放出されます。その速さは光の速さの99.99...%(9が12個も続きます)にもなり、相対性理論の効果でその質量は静止質量の100万倍にもなっています。

C: 2008年から活躍を始めたフェルミ=ガンマ線望遠鏡はガンマ線を放射する天体をたくさん見つけています。

私たちはこのような高エネルギー天体を観測し、データ解析し、理論モデルを構築し、なぜこのような活動的な宇宙になっているのか？を研究します。

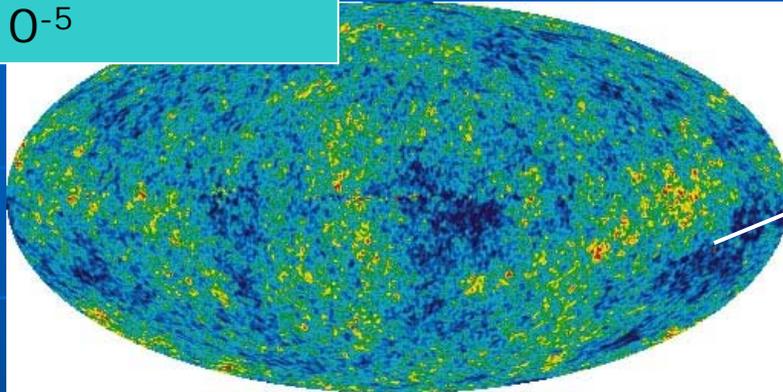
C**D**

電気と磁気と荷電粒子の集団運動が鍵をにぎっています。

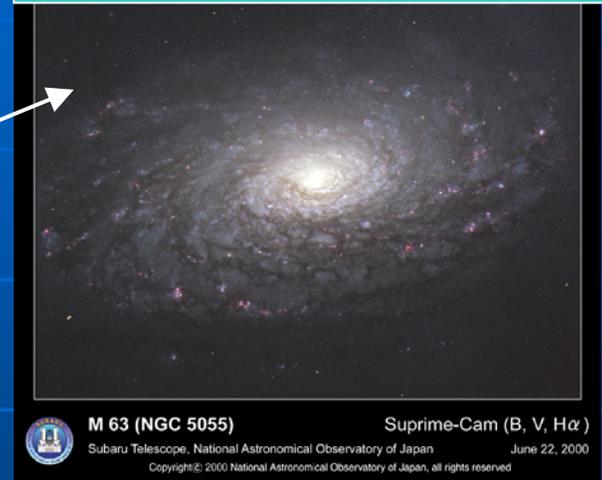
D: コンピューターシミュレーションをおこないながら高エネルギー粒子の加速機構をさぐってゆきます。Dはパルサーの磁気圏でアウターギャップという粒子加速領域が発生することを世界で始めて再現したわたしたちの計算です。

銀河、銀河団の数値シミュレーション & X線観測 (滝沢)

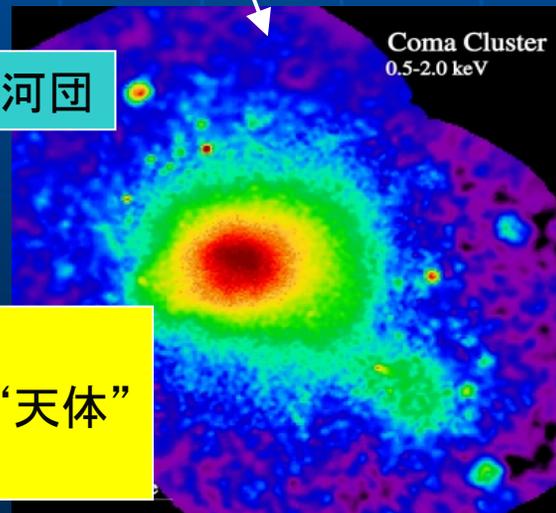
単調で一様な“昔の宇宙”
 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$



可視光で明るい渦巻き銀河



X線で明るい高温の銀河団



現在の宇宙:
非一様な様々な種類の“天体”
 $\Delta \rho / \rho > 10^3$

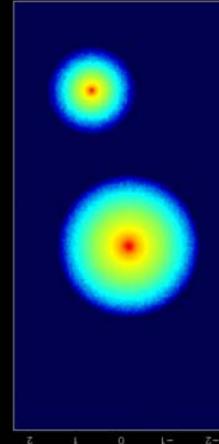
可視光で明るい楕円銀河



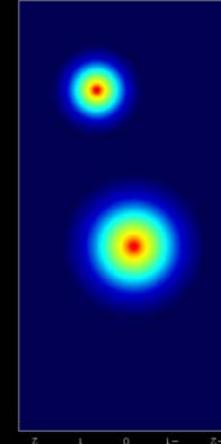
コンピューター シミュレーション

衝突銀河団のシミュレーション

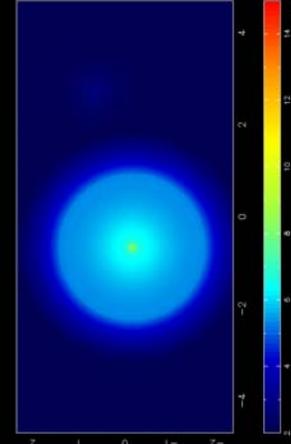
質量分布



ガス密度分布

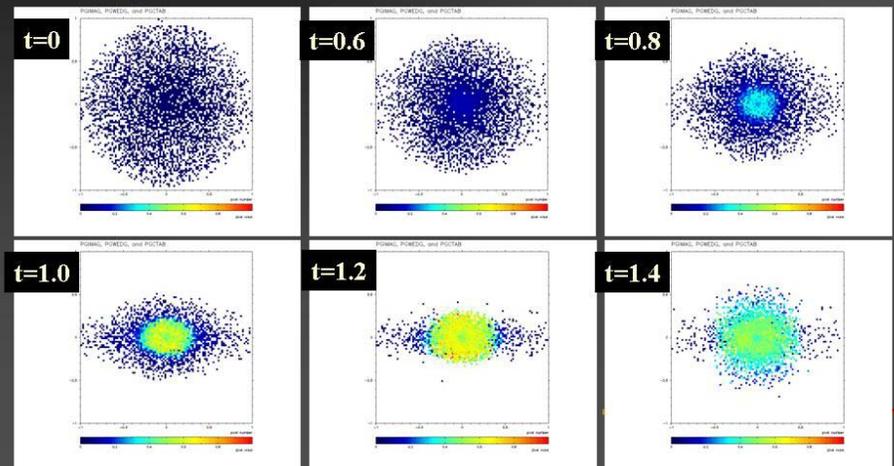


ガス温度分布



- 基礎方程式を極力近似なしで数値的に解く。
- 天体活動現象への応用
- 新たな数値解法の開発
- 宇宙グループ内の計算機や国立天文台のスーパーコンピュータを利用。

磁場に貫かれたガス雲の重力収縮のシミュレーション (山本修論)



X線観測データ解析

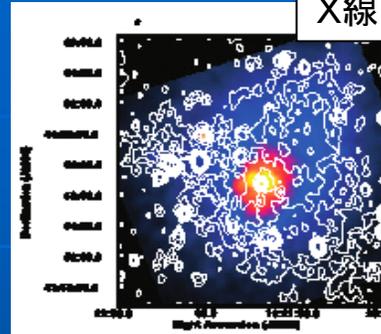


すざく (2005年7月--)

- 「理論」や「観測」というのは目的ではなくて手段。片方に引きこもる必然性は必ずしもない。共同研究まで含めれば天文の分野では。両方やるのは珍しいことではない。
- 主に「すざく衛星」を用いた銀河団のX線観測を他研究機関のグループと協力しながら行っている

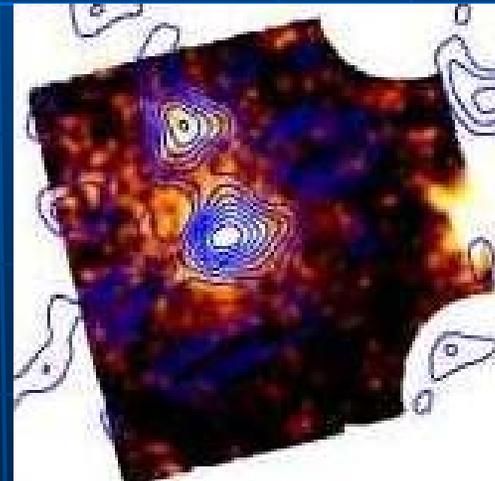
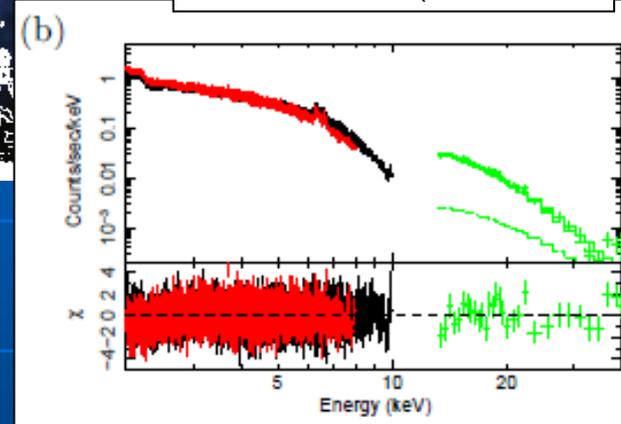
A2319

X線(カラー)と電波(等高線)



A2319広帯域

X線スペクトル(菅原修論)



Zwcl0823.2+0452
周辺領域
等高線:重カレンズ
カラー:X線
(渡邊修論)

レポート問題

[設問0] 名前と学生番号

[設問1] 今日の講義の内容について要約しなさい。

[設問2] 質問、感想などご自由に。

- 全体で1ページ程度に。
- 紙がたりなければ裏も使ってください。
- 5/21(金)17:00までに滝沢研究室のポストに提出してください。