

# 宇宙惑星科学

牧野淳一郎

惑星学専攻

# 事務連絡

- 今日は小テストあり。
- 次回は試験期間ですが、通常の講義+最終レポート。

# 事務連絡

- 評価は小テスト (初回はなし) (レポートはなし)
- 連絡は **BEEF** か状況によって **Google Classroom** を使うので、**Gsuite** のアカウントを有効にしておくこと。「宇宙惑星科学1」の招待がいつているはずである。

# 講義概要

1. ビッグバン宇宙論: **2**コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): **2**コマ分くらい
3. 星形成・進化、惑星形成: **3**コマ分くらい

# 講義の目的

- 惑星形成を、宇宙における階層的構造形成全体の中で理解する
- 同時に、惑星形成研究を天文学・天体物理学研究の中で位置付ける
- そのために宇宙の始まり、銀河等の天体形成、星形成、惑星形成の順にトップダウンで話を進める

# ビッグバン宇宙論

- 宇宙論の歴史
- 現在の描像
- 残っている問題
  - インフレーション
  - ダークマター
  - ダークエネルギー

# 天体形成

- 大規模構造・重力不安定 (ジーンズ不安定)
- 重力熱力学的不安定
- 円盤構造、軸対称不安定、スパイラルモード
- 銀河形成
- 銀河と太陽

# 星形成と惑星形成

- 星形成
  - 星形成を考えるいくつかの立場
  - 初代星
- 恒星進化
  - 星の一生
  - 中性子星・ブラックホール・重力波
- 惑星形成の標準ないし京都/林モデル
  - **minimum solar nebula model**
  - シナリオ紹介
  - 理論的問題
  - わかっていないこと

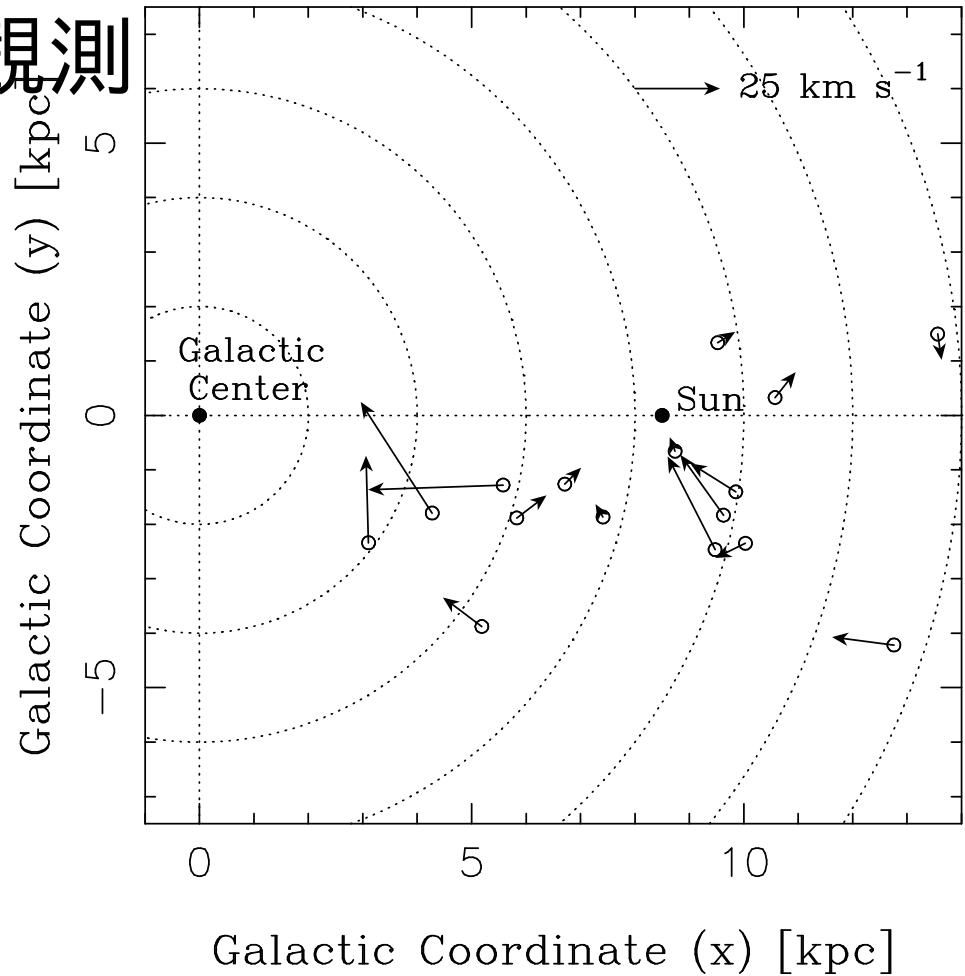


# 高分解能シミュレーションでわかってきたこと

- 星形成は大きなスケールの渦巻構造と関係
- 観測で見える複数アームがある渦巻は、定常ではなく形成・消滅を繰り返している
- この結果は、星形成のモデルの詳細にほとんど依然しない

# 電波干渉計による観測

- 2006: Xu et al, Science 311, 54
- Nov 208: Burst of results from VLBA
- Several data from VERA

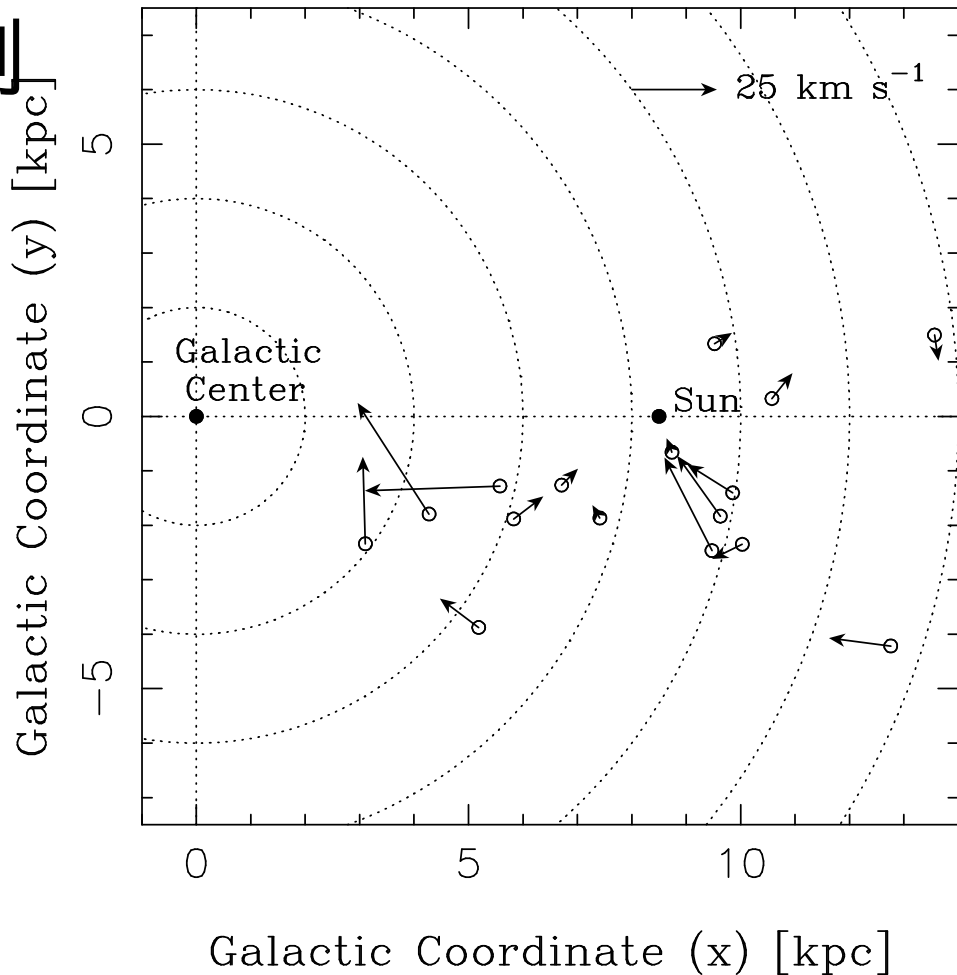


(Compiled by Dr. Asaki)

# 電波干渉計による観測

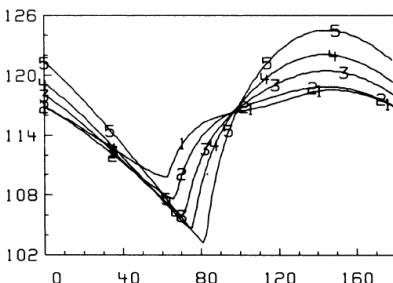
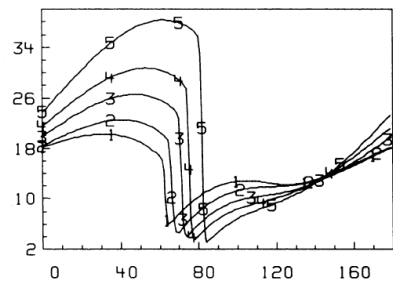
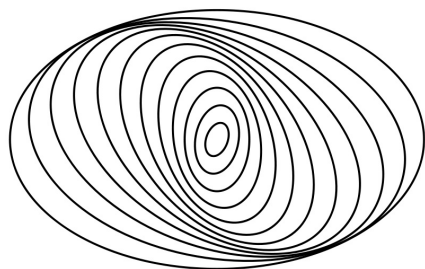
- 円運動からの大きなずれ ( $\sim 30\text{km/s}$ )
- 空間相関もあり？

このような大きな運動の起源は？



# 教科書に書いてあること

## 定常密度波



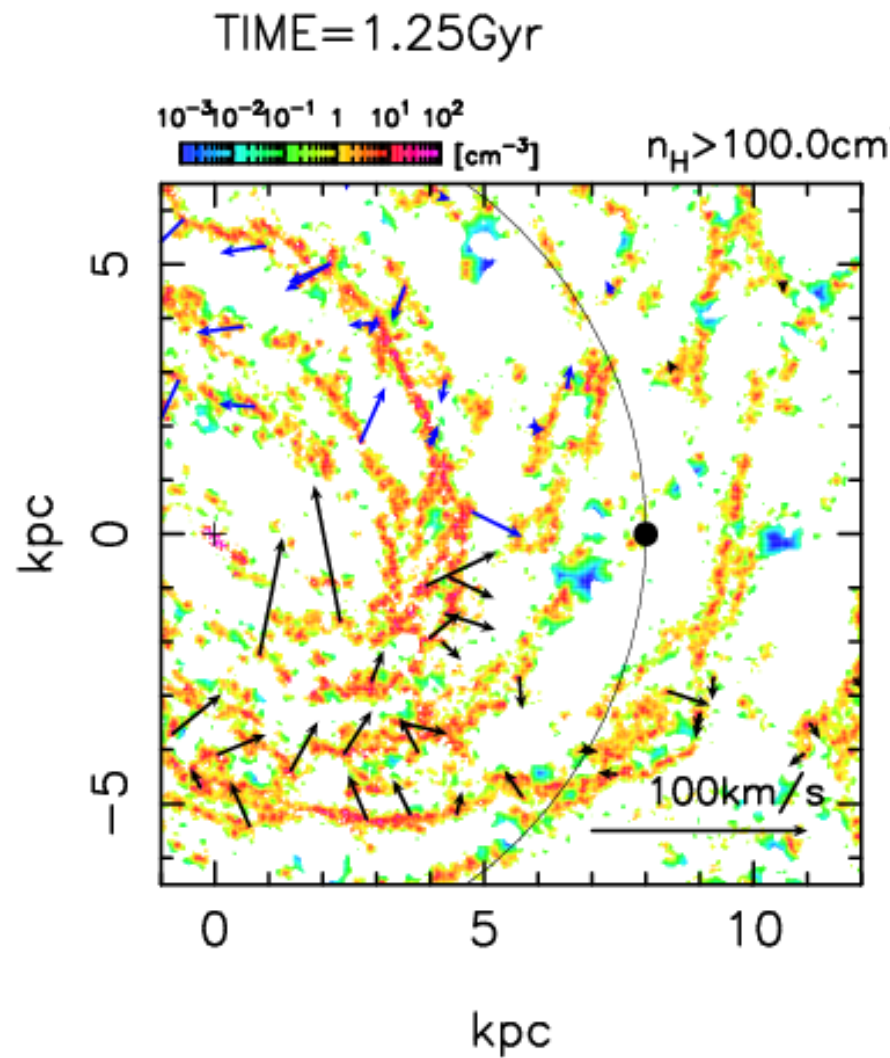
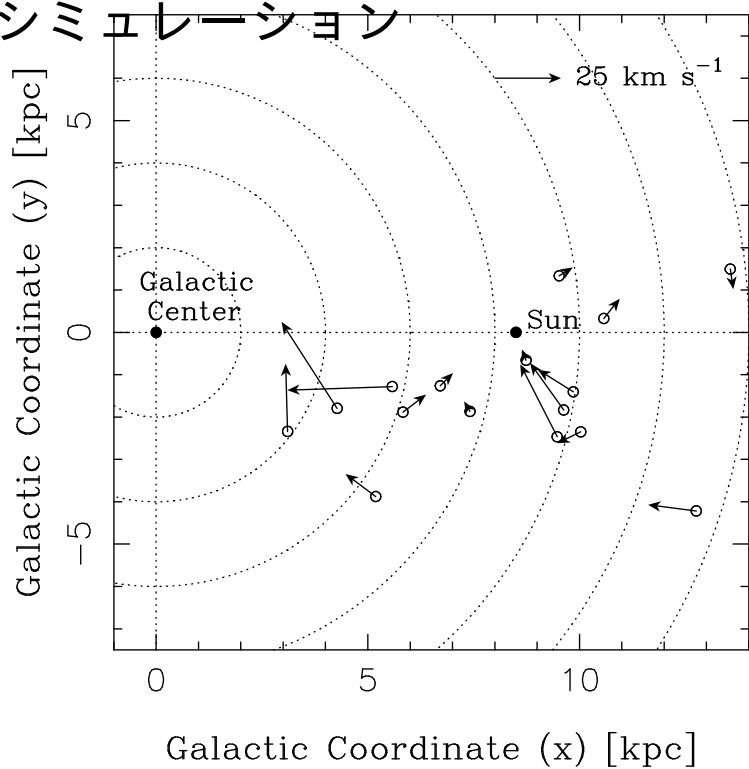
$\theta$  (deg)

- 渦巻構造は実体ではなく、密度波
- ガスは、渦巻が作るポテンシャルの底を通る時に圧縮されて、そこで星を作る
- 星やガスの円運動からのずれはごく小さい

観測ともシミュレーション結果とも全然あってない...

# 比較

観測とシミュレーション

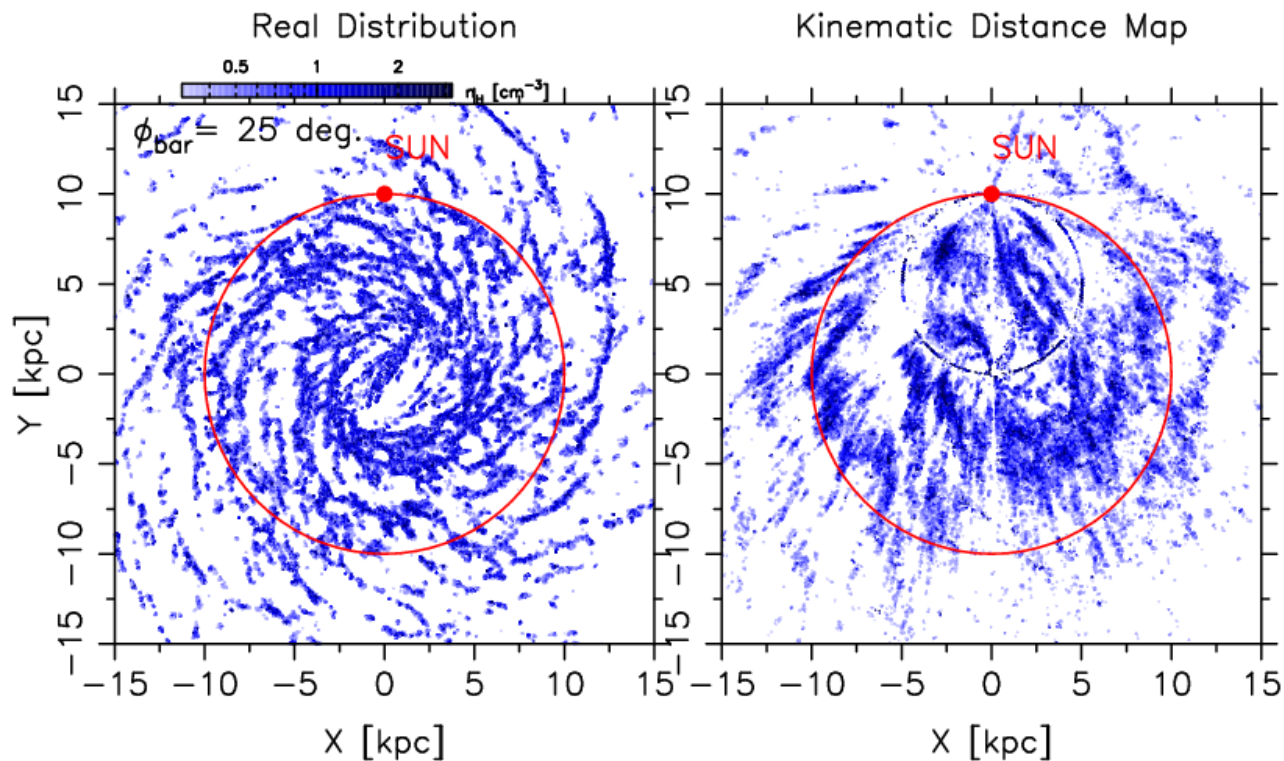


似ているような気が？

# 運動学的距離

TIME=2.00Gyr GAS ( $T=10^{1.5}-10^{2.5}K$   $n_H=10^{-0.5}-10^{0.5}cm^{-3}$ )

SUN : Pos=(0.0,10.0)[kpc] Vel=(169.5,0.0)[km/s]

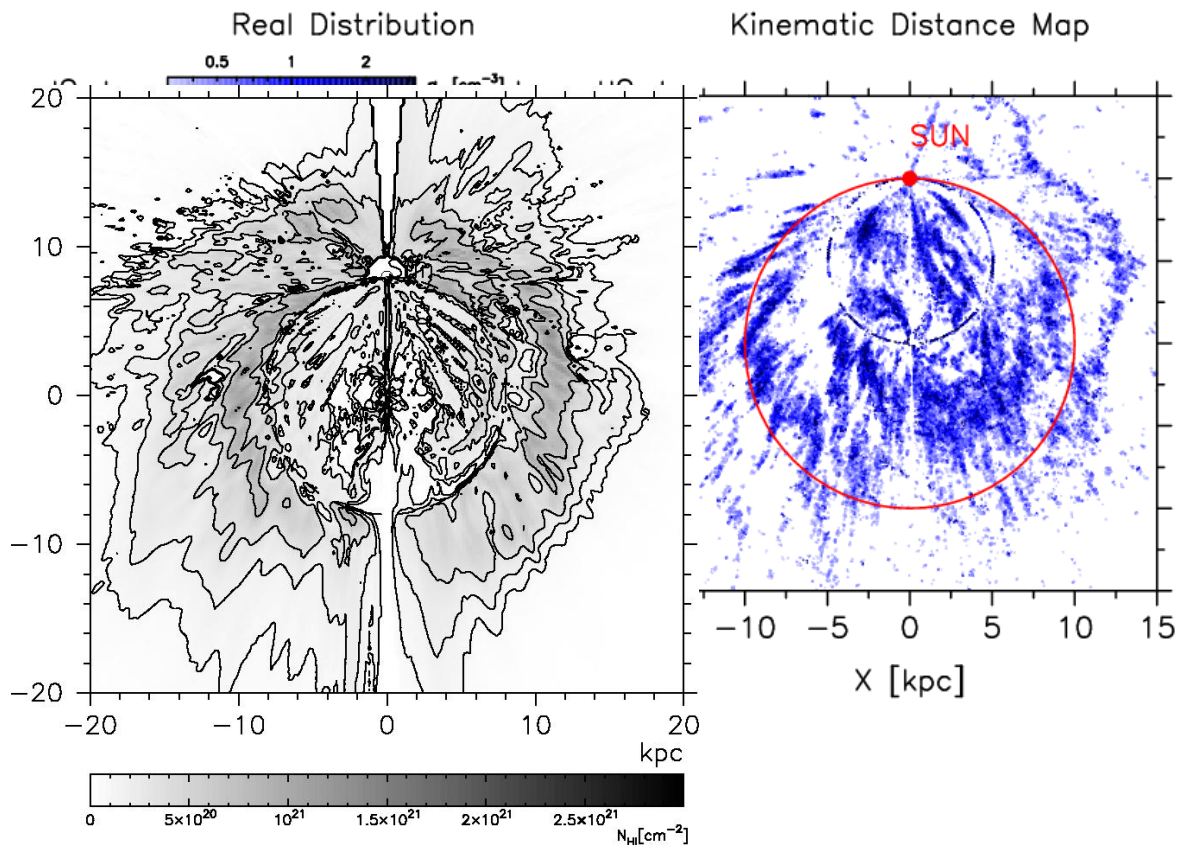


「円運動をしている」と仮定すると、速度の観測から距離が求まる  
シミュレーション結果を観測すると、、、、

# 運動学的距離

TIME=2.00Gyr GAS ( $T=10^{1.5}-10^{2.5}K$   $n_H=10^{-0.5}-10^{0.5}cm^{-3}$ )

SUN : Pos=(0.0,10.0)[kpc] Vel=(169.5,0.0)[km/s]

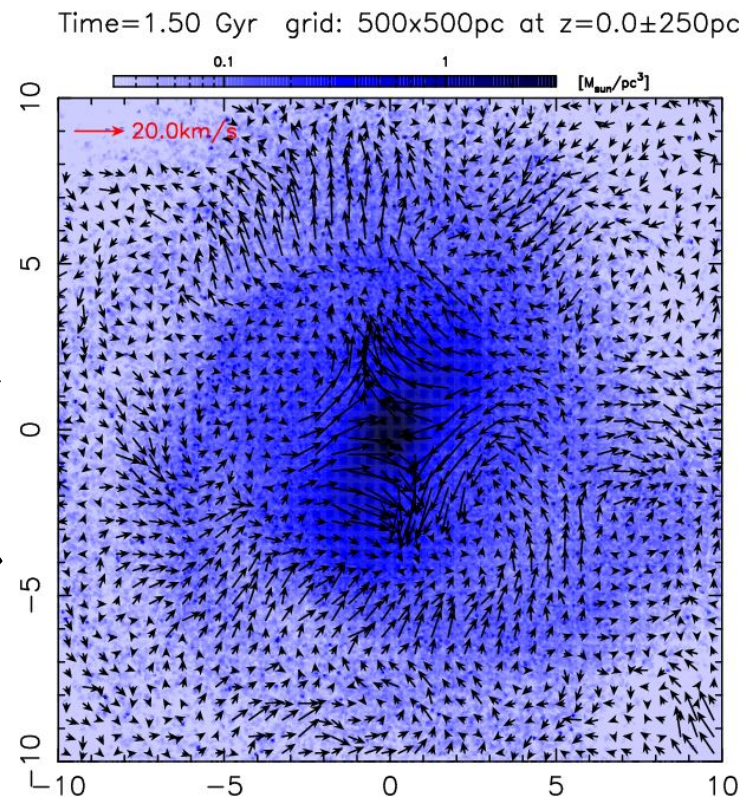


観測 (左) とシミュレーション (右) を比較すると、同じような構造

# 星のスパイラルの運動

星の運動の円運動からのずれ

- スパイラルアームは実体、密度波ではない
  - 古い星の平均の円運動からのずれも結構大きい
  - キロパーセクスケールの構造がある





# ガス+星の銀河円盤シミュレーションのまとめ

- 高分解能計算ではスパイラルアームは自然にできる
- アームは定常ではなく、常に生成消滅している
- シミュレーション結果を「観測」すると、我々の銀河系の観測の色々な特徴を再現できる

# 星だけの円盤

(Fujii et al. 2010)

animation a1

animation a2

animation b1

- 軸対称モードに対しては安定 (**a1, a2**)
- スパイラルアームはできる
- 非常に長時間アームは消えない

# 余談：ダークマターと恐竜絶滅



- こんな本が去年でていた
  - リサ・ランドールは大変有名で業績もある素粒子物理の理論家
  - これは、「未知のダークマター」が薄い銀河円盤を作っていると恐竜絶滅が説明できるという説
  - 講義で議論したような円盤の安定性の検討がない(著者達の論文読んでも)。
- 検討すると強い不安定。多分間違っている。

# 星形成と惑星形成

- 星形成
- 惑星形成

# 星形成についてわかっていること

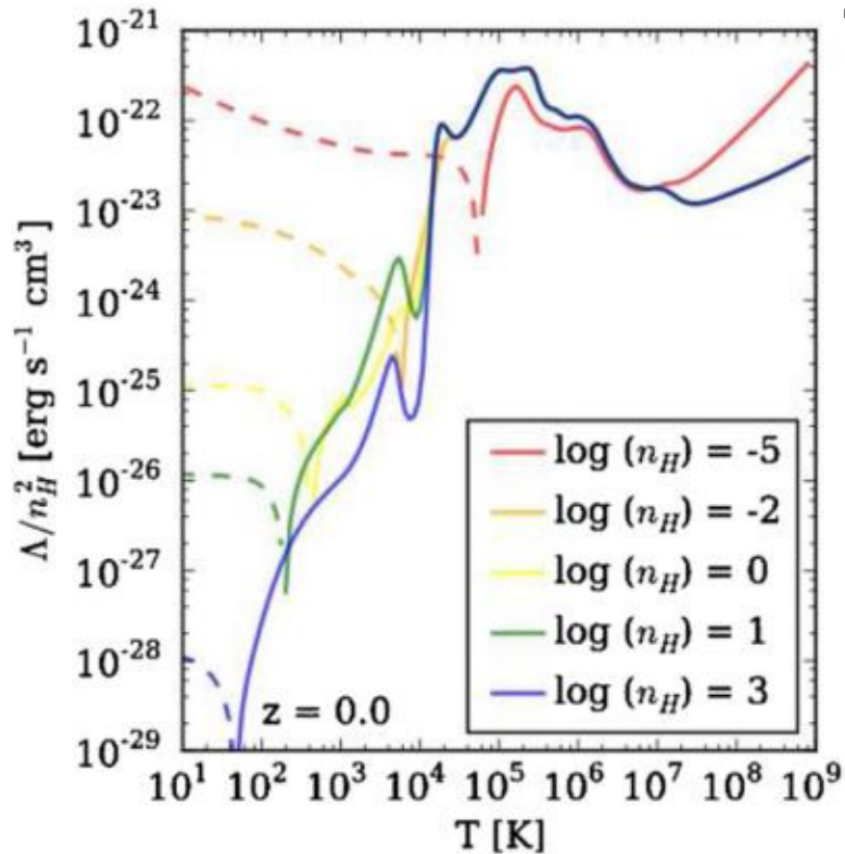
- 「星形成についてわかっていること」の整理はなかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

# 銀河形成の理論の側からみた星形成

- 銀河形成シミュレーションで、星ができたり超新星爆発したりもっともらしい振舞いをしていた
- 但し、星**1つ1つ**のレベルまで計算しているわけではない。ガスやダークマターを表す粒子の質量が、最近の「高分解能」の計算でも太陽質量の**1万倍**くらいある
- なので、「星間ガスが冷えて、自己重力で集まってくると適当に星になる」と考える。

いろいろいい加減だが、「定性的には」正しい

# ガスの冷え方



Kim et al. 2014(AGORA)

(破線は加熱。紫外線バックグラウンドによる)  
密度が低い (**0.01 個/cc** とか以下) ガスは **10<sup>4</sup>K** から冷えない  
密度が高くなると平衡温度は下がる。但し、冷却率は **10<sup>4</sup>K** 以下では小さい

# 冷却率を決めているもの

- $10^4\text{K}$  以上: 水素ガスは電離してプラズマになっている。: 電子と光子の相互作用:**Bremsstrahlung** (制動輻射)
- $10^4\text{K}$  以下: 水素はまず水素原子 (**HI**) になる。そうすると非常に冷却しにくくなる。水素ガスだけではほとんど冷えないが、(天文学でいう)「メタル」があると、ダストが形成され、ダストは固体なので熱輻射をだして冷える。水素原子とは衝突によって熱平衡にいくので、密度が高いと冷却率は大きくなる



# 「天文学でいう」メタルとは

- 水素とヘリウム以外の全ての元素のこと。炭素とか酸素も「メタル」なことが多い。天文学の論文で **metallicity** という言葉がでてくると大抵こっち。
- 地球科学とは結構違うのでこのへん注意が必要

# 銀河形成の観点からのガスの振舞い

理想化した話:

- ダークマター+バリオンの自己重力系が重力収縮していくと、ダークマターは冷えない(輻射をださない)ので最初の密度ゆらぎで決まる大きさに落ち着く
- バリオンは輻射をだして冷えて中心に集まる。角運動量で支えられた薄い円盤になる
- 薄い円盤はさらにスパイラルモードや、スパイラルアームの中での重力不安定を起こし、冷却しながら小さなものに分裂していく
- 星ができると、超新星爆発や若い星からの紫外線でガスは加熱されたり圧縮されたりする。

# 銀河形成の観点からのガスの振舞い

現実の話:

- 円盤形成・重力不安定による進化は確かに起こる
- その途中で、形成中の銀河同士が合体したり、小さな衛星銀河が落下してきたりする。
- ガス円盤同士も衝突して、衝撃波圧縮の結果爆発的星形成を起こす
- また、一部の(多くの?)ガスは角運動量を失って銀河中心に落ちる(バルジの起源?別の理論もある)

というわけで、ガスはかなりダイナミックに圧縮されたり加熱されたりする。

# 一方、星間ガスの理論の観点からの ガスの振舞い

- 初期状態として「無限一様で背景の輻射場と平衡なガスを考える」
- 熱不安定 (温度が低いガスは平衡温度が低いのでさらに温度が下がる) によって、高温ガスの中に低温ガスの塊ができる
- 但し、これは星形成につながるかということそうならない。より高密度のガスを衝撃波圧縮等で作る必要がある

# 星形成のシミュレーションの観点

1つの星の形成シミュレーション

星形成シミュレーション

連星形成シミュレーション

- 初期に適当な密度をもつガス球を置く。通例としては、ある温度で自己重力平衡な解を密度あげて収縮するようにする。一様な磁場とか回転もあったりする
- そこからシミュレーション

色々なことが起こってその過程は沢山の人が詳細に研究している一方、「その初期条件に意味はあるのか」はなかなか難しい。

# 星形成のシミュレーションの観点

星団形成のシミュレーション

## Star formation with SPH

- もっともらしく沢山星はできる。
- 初期条件は？
- 星ができるところを本当に計算できてるのか？

# シミュレーションの問題点

- 星になる前のガスとできた星の両方を流体シミュレーションで一気扱うのは現在のところ不可能
- 星ができるタイムスケール: 周りのガスが全部落ちてくるまで。典型的には **100** 万年くらいと考えられている。
- 星を流体として解く: タイムステップ **1** 分くらいが必要 (内部は上手くやって解かないとしても)。
- **1** タイムステップ **1** ミリ秒でできても **10** 年かかる。論文書けない、、、 というのはさておき、計算精度も問題になる。

# ではどうしているか

- 普通やっていること: 適当な半径 (**1-5AU** とか) から内側にはいったガスは「星」に落ちたとみなす (**sink particle**)
- これにはもちろん問題がある。本当は星の表面近くまで降着円盤が形成されるだろうし、円盤ガスの一部は磁場や輻射圧で赤道面から飛ばされたりするはず。そういう色々な効果を見捨てて単に中心星にくっつけると、成長速度やそもそも成長するかどうか計算できなくなっているかもしれない
- とはいえ、現状他に方法がない



# 星形成について整理

- 星は、重力不安定な高密度・低温なガスが重力収縮してできる、というのは間違いない
- が、「重力不安定な高密度・低温なガス」がどこからどうやって供給されるかは理論的には明確にわかっているわけではない。観測すれば見えるのでそういうものはある。
- シミュレーションも、計算機の速度という以上に原理的困難がまだある。

# 理論的には

もうちょっとわかっていると考えていること(あまり初期条件に依存しないこと)もある。

- ファーストコアの形成
- 林フェーズ

このへんの話をしておく。

# ファーストコア

「なんらかの理由によって」重力収縮に対して不安定な、ほぼ一様密度のガスがあるとしよう。

で、ほぼ球対称な領域が収縮をはじめたとする。

- 収縮して密度があがると、輻射で冷えるタイムスケールが短くなる (輻射にも原子力同士の衝突が必要なため)
- そうすると、ほぼ等温のまま、高密度で小さなコアができていく (メカニズムは厳密には違うが、重力熱力学的崩壊に似た自己相似解が現れる)
- コア密度が高くなり過ぎると輻射に対して不透明になって、収縮が止まる

これがファーストコア

# ファーストコアのあと

- 外側のガスがコアにふりつもる
- ふりつもりって、力学平衡にある質量が増えるにつれて急速に明るくなる。
- 周りにまだガスがあれば赤外線で見える。ガスがなくなったら可視光で見えるようになる
- まだ中心温度は核融合が起こるほど高くないので、星はこのあと収縮に重力エネルギーの放出で光る=原始星

# 原始星と林フェーズ

## 原始星の特徴

- 全体で対流が起こっている (輻射に対して不透明)
- この時、表面温度はほぼ一定 (説明省略、、、)
- このために、収縮していくに従って暗くなる。逆にいうと、最初の半径が大きい時には非常に明るくなっている

この段階を林フェーズ (京大にいた宇宙物理学者林忠四郎が発見したので) という

# とはいえ

観測的には、原始星でおこっていることはもっと複雑

- 「原始星」といえるようになる頃には円盤ができていてそこから降着している
- この時、円盤の上下方向にジェット(双極分子流)がでることが観測的にわかっている。磁場によるもの(磁気遠心力風)が主要なメカニズムと考えられている。

といった話と、星形成領域、原始惑星系円盤を統合的に理解することはまだできていない(これは牧野の私見。できているという人もいるかも)

# 銀河形成と比べてみる

- 銀河形成の理論・シミュレーションは、現在は初期条件は決まったといっている。
- これは、既にのべたように宇宙論的パラメータと呼ばれる、バリオンの量、ダークマターの量、ダークエネルギーの量、膨張速度、密度ゆらぎのパワースペクトルといったものがマイクロ波背景輻射や超新星の観測から正確に決まったため。
- 密度ゆらぎのパワースペクトル(言い換えるとダークマターの性質)が決まる前は銀河形成理論も初期条件と形成過程について大論争があった。**Monolithic collapse** と **hierarchical formation**

## 銀河形成と比べてみる (2)

- コールドダークマターシナリオが一般的になると、**Monolithic collapse** 説は段々フェードアウト (といっても最近の教科書でも生き残っていたりする)
- 銀河形成の教訓: 初期条件がわからないとなかなかサイエンスにならない、、、
- そういう意味で、星形成の理解はまだかなり初期段階といえる



# 初期条件が多少わかっている星

- 銀河形成の話で多少ごまかしたところ:星はいつで  
き始めるのか
- 「初代星」の問題
- **15**年くらい前から理論的(計算機シミュレーションを使  
ったものも)研究が盛んになってきた。
  - 初期条件が大体わかってきた
  - かなり早い時期に星はでき始めていないといけ  
ないという観測的要請: 宇宙の再電離

# 宇宙の再電離

- 「再」(何故「再」なのか今一つわからないが)結合: ビッグバンから宇宙膨張が進んで、バリオンが主に陽子になったあと、さらに膨張が進み、温度が $10^4$ 度くらい(もうちょっと正確にいうと**3000K**くらい)になると陽子と電子が結合、中性の水素原子に
- 光子とほとんど相互作用しなくなる。「宇宙の晴れあがり」。マイクロ波背景放射が見える理由。
- ちなみに:この時の「赤方偏移」 $z$ は大体**1000**くらい。

ところが:

観測的には、 $z$ が**10-20**のどこかで宇宙が再電離したとわかってきた。

# 宇宙の再電離

## 観測的な証拠

- 昔からわかっていたこと:ガン・ピータースン・テスト。  
遠方のクェーサーからの光のライマン $\alpha$ 輝線を観測すると、「比較的波長の短いところだけ」吸収されている
- 中性水素が、 $z = 5.5$  くらいでなくなって、宇宙のガスはプラズマにもどったということ。
- もうちょっと精密な議論がマイクロ波背景放射の偏光観測から。(私はよくわかってないので追求しないで)
- これだと、 $z = 14$  くらいから始まって $z = 6 \sim 8$  あたりで終わる？

# 宇宙の再電離

なにが再電離を引き起こすか: **UV**(紫外線)光子が必要。水素原子のイオン化エネルギーを供給する必要がある。何度もでてくるが**1万度**くらいの熱輻射に相当

問題:何が**UV**光子を供給するか。候補

- クェーサー(活動銀河核含む)
- 初代星

# クエーサーって？

- 「準星」最初に見つけた時はなんだかわかってなかった
- 水素の輝線から、「大きく赤方偏移している」＝「非常に遠くにある」とわかった
- 遠方の銀河の中心にある超巨大ブラックホールが明るく光っているもの

# 遠方の銀河とクエーサー

観測的にもっとも遠くの銀河とクエーサーは、、、

- 銀河: 赤方偏移 **11.1**、ビッグバンから**4億年**後

## **Hubble Team Breaks Cosmic Distance Record**

”The combination of Hubble’s and Spitzer’s imaging reveals that GN-z11 is 25 times smaller than the Milky Way and has just one percent of our galaxy’s mass in stars. However, the newborn GN-z11 is growing fast, forming stars at a rate about 20 times greater than our galaxy does today. This makes such an extremely remote galaxy bright enough for astronomers to find and perform detailed observations with both Hubble and Spitzer.”

- クエーサー:  $z = 7.1$ , ビッグバンから**8億年**

# とはいえ

- クェーサーは銀河より数桁少ないので、「見つかっていない」だけかも
- クェーサーはブラックホール(の降着円盤等)が光っているので、ビッグバンから数億年でどうやってそんな大きなブラックホール作れるの?という議論はある
- でも、銀河があるくらいだからどうにでもなるかもしれない

# クェーサーと初代星

- 初代星は(次に述べるように)銀河・クェーサーより(平均的には)先にできる
- が、確率的な話なので非常に早くできる銀河もある。クェーサー(ブラックホール)もできるかも(色々シミュレーションや議論はある)
- 現在のところ、どちらか再電離に寄与したかはよくわかっていない(どちらもそれなりに的的な話になっている)



# 初代星の形成

- 現在のところ、一般的理解: 「初代星」はどうやってできたと考えられているか:
  - ダークマターハローは、非常に質量が小さいもの同士の合体で成長していく。(地球質量くらいから?これはダークマター粒子の正体、質量で変わる)
  - バリオンは太陽質量の**10**万倍程度のダークハローができて初めて重力収縮を始める(と考えられている)。それより小さいスケールのバリオンの密度ゆらぎは光子との相互作用でならされるため。
  - ダークマターハローの中心に、太陽質量の数十から数百倍の星ができる

# 初代星の形成—シミュレーション

- **15**年くらい前から精力的にシミュレーション研究がされてきた
- 当初は、ハローの中心に一つ星ができるという「シミュレーション結果」だった
- 最近は**2**つに分裂するとかいや小さいのが沢山できるとか色々なシミュレーション結果があって混乱中
- 初期条件の(理論的な)違いではなくて、計算手法や「問題ない」としているはずの簡略化、計算精度等の影響(「いれ忘れていた初期条件」なんてのもある)

# 星形成の理解の現状

- 「星間ガスが冷えて、重力収縮して星になる」のは間違いない。
- 具体的にどんなふうにして重力不安定を起こすガスができるのかは銀河形成・進化とカップルした問題。まだ非常に良くわかっているわけではない。
- 初期条件についてはよくわかっていると考えられる初代星でも、まだシミュレーションやる人によってできる星が違う状態。

# 恒星進化

- 星の一生・内部構造
- 中性子星・ブラックホール・重力波

# 星の一生・内部構造

星形成は謎が多いができたあとはかなりよくわかっている。以下まず大雑把な話

- 中心の密度・温度が十分上がると、水素の核融合が始まって「主系列星」に
- 主系列星段階の寿命: 大質量星で数百万年。太陽くらいだと **100** 億年
- 中心で水素燃焼が終わる (全部ヘリウムになる) と、ヘリウムの核融合が始まる。この時には赤色巨星になり、半径が不安定な振動を起こしたりする (変光星)
- 太陽質量の **8** 倍以下の恒星は炭素・酸素から先には核融合が進まない。ヘリウムがなくなると白色矮星になる
- 太陽質量の **8** 倍以上では、核融合がさらに進み、最終的に鉄までいくが、鉄コアの温度がさらに上がると一気にヘリウムに分解する吸熱反応が起きてコアが重力崩壊し、II型超新星になる。超新星のあとには中性子星ないしブラックホールが残る。

# もうちょっと詳しい話

- 内部構造の基本方程式
- 主系列星の質量と光度の関係
- 主系列の後の進化

# 内部構造の基本方程式

球対称で定常な星の構造は、

- 質量保存の式
- 静水圧平衡の式
- 状態方程式
- エネルギー生産と輸送の式

で決まる。この辺をまずだしておく。(10/25に一部書いた)

# 質量保存の式

半径を  $r$ 、密度を  $\rho$ 、ある半径の内側の質量を  $M_r$  とすれば

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (1)$$

これは特に難しいところはない？半径  $r$  から  $r + dr$  の範囲の体積は半径  $r$  の球の表面積  $4\pi r^2$  に厚さ  $dr$  を掛けたものなので、質量はそれにさらに単位体積あたりの質量である  $\rho$  を掛けたもの。



# 静水圧平衡の式

さらに圧力を  $p$  として

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (2)$$

さて、これはどういう式だったかということ、、、高踏的な説明は、「流体は圧力勾配から力を受ける。星の静水圧平衡ではそれが重力と釣り合う」というもの。

もうちょっと丁寧なつもりの説明: 半径  $r$  から、 $r - dr$  に下がった時にどれだけ圧力が増えるかを考える。そこでの重力加速度が  $g$  なら、新しく上に載ることになる流体の質量は  $\rho dr$  であり、重力の増加は  $g\rho dr$  である。これが圧力の増加  $dp$  と等しい。なので  $dp/dr = -\rho g$ 。ここで  $g = GM_r/r^2$  なので上の式になる。

# 状態方程式

これは、温度はそこそこ高くて電離した理想気体の方程式で、温度が高いと輻射圧(光子の圧力)も無視できないので

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (3)$$

ここで  $k$  はボルツマン定数、 $a$  は輻射定数、 $m_H$  は水素原子の質量、 $\mu$  は平均分子量である。

地球上なら理想気体といえば話は簡単だが、恒星内部で高温だと、原子の電離状態が組成、温度、密度の関数になるので少し複雑である。輻射圧は、あとで述べるような理由で大質量星では重要になる。

# エネルギー生産の式

エネルギー生産：熱核反応。

- 主系列星の中心温度： $10^7\text{K}$ 程度。  $1\text{eV} \sim 10^3kT$  なので **10keV** 程度。
- 核融合反応ででるエネルギーは **10MeV** 程度。なので、 $10^{10}\text{K}$  くらいまで温度が上がらないと普通には核融合は起きない(これは何故核融合炉は難しいかという話)

# エネルギー生産の式(2)

- 「普通には」起きないが、量子力学的効果(トンネル効果)でほんのちょっとだけ起きる。
- おきやすさ:  $\exp(-\sqrt{E_G/E})$  くらい。  $E_G$  が量子力学的な効果を表す係数で単位はエネルギー、  $E$  は**2**つの原子核の相対運動のエネルギー
- 原子核のエネルギーの分布はマックスウェル・ボルツマン分布なので  $\exp(-\frac{E}{kT})$  になる

## エネルギー生産の式(3)

このため、典型的に反応が起こるところは、 $\exp(-\sqrt{E_G/E}) \exp(-\frac{E}{kT})$  が最大値をとるところで、これの対数をとって  $E$  で微分して  $0$  になるところを求めると、

$$\frac{1}{2} \sqrt{E_G} E^{-3/2} - \frac{1}{kT} = 0 \quad (4)$$

から

$$E = E_0 = \left( \frac{\sqrt{E_G} kT}{2} \right)^{2/3} \quad (5)$$

# エネルギー生産の式(4)

で、この時の値は

$$\exp\left(-\frac{3E_0}{kT}\right) \quad (6)$$

になる。ここで、 $E_G$  は  $kT$  よりはるかに大きいので、 $E_0$  も  $kT$  よりかなり大きくなる。

$E_0$  が  $kT$  よりずっと大きいということには、恒星の核融合反応には、エネルギーがマックスウェル・ボルツマン分布の典型的な値よりずっと大きな、非常に少数の原子核だけが関わっている、ということである。

このことから色々重要な帰結がでてくるが、まずその前に核融合反応の紹介。

# 核融合反応

恒星の中で起こる核融合の主要なものは水素原子核**4**個からヘリウム原子核ができる反応で、 $p-p$ チェーンと**CNO**サイクルが主要な反応である。

- $p-p$ チェーンは水素原子核(陽子)だけがあればできる。陽子**2**個から重水素、重水素と陽子からヘリウム**3**ができ、ヘリウム**3**同士からヘリウム**4**と陽子**2**個になる。
- もうちょっと温度が高いとか、ヘリウム**4**の量が多いとかすると、ヘリウム**3**と**4**の融合でベリリウム**7**ができ、それが電子捕獲でリチウム**7**になり、さらにリチウムが水素と反応して**2**つのヘリウム**4**になる。あるいは、ベリリウム**7**が陽子捕獲してベリリウム**8**になり、これが分裂して**2**つのヘリウム**4**になる。

# CNO サイクル

星があらかじめ **C, N, O** 等の元素をもっていると、それらが触媒として働く、要するに  $^{12}\text{C}$  から **3** 個陽子を捕獲して  $^{15}\text{N}$  になり、これが陽子と反応して  $^{12}\text{C}$  と  $^4\text{He}$  に戻る反応が起こる。

これを **CNO** サイクルという。



# 水素燃焼の先

- 水素燃焼は数千万度 (**1-2** 千万度でも) 起こる。
- 水素がほぼなくなったあと、恒星の中心の温度が **1** 億度程度まであがると、ヘリウム **4** の燃焼が起こる。これは、 $^{12}\text{C}$  と  $^{16}\text{O}$  を作る。
- さらにもっと高温になると、炭素、酸素がそれぞれ核融合を始める。
- さらにもっと高温になると、最終的には  $^{56}\text{Fe}$  まで進む。
- $^{56}\text{Fe}$  は「核子あたりのエネルギー」が最小の原子核で、そこから先はエネルギーが増える (吸熱反応になる) のでここで普通の核融合は終わり。
- 鉄から先は、超新星爆発や中性子星の合体の時にできる。

# エネルギー輸送の式

恒星の中でエネルギーが運ばれる主要なメカニズムは輻射と対流である。まず輻射について。

表面近くを別にすると、星は「光学的に厚い」つまり、光学的厚さが1よりはるかに大きい。この時、光子は拡散的に振舞う。つまり、多数の原子核とぶつかってランダムウォークをしている。

## エネルギー輸送の式(2)

このため、輻射によるエネルギー輸送は熱伝導と同様、温度勾配に比例して

$$L_r = -4\pi r^2 \left( \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

となる。ここで、 $L_r$  は半径方向のエネルギー流速、 $a$  は輻射定数(既にててきた)、 $c$  は光速、 $\kappa$  は吸収係数である。

本当は光子のエネルギーには波長方向の分布があって吸収係数も波長依存性がある。ここでの $\kappa$  は波長方向の平均(ロスランド平均という特別なもの)をとったものである。

# 普通の熱伝導と同じ？

といったけどなんか式は変ではないか？単純な熱伝導なら、何か熱伝導の係数  $C$  があって

$$L_r = -4\pi r^2 C \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

となる。なので、輻射輸送の式は

$$C = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \quad (9)$$

となっていることを意味する。なぜそうなるかを簡単に説明しておく。

# 輻射輸送の係数の意味

$c$  は光速である。熱流が光速に比例するのは、動いている光子が熱を運ぶのでそういうことになる。

$4aT^3$  は、輻射の体積あたりのエネルギーが  $4aT^4$  であることからくる。普通の熱伝導ではエネルギーは  $T$  に比例するだけなので、輻射のエネルギーは  $T^3$  に比例して普通の熱エネルギーより大きい。

$\kappa\rho$  は光子の吸収されやすさなので、小さいと光子が遠くまで物質とぶつかることなく飛ぶ。このため、小さいと流れる熱は大きくなる。

(ここは本当はもうちょっと定量的に議論するべきだが、別のところで)

# 対流

- 普通の気体や液体では、下から上にエネルギーを運ぶ主要なメカニズムは対流である。
- 粘性が大きくない対流では、温度・密度構造は断熱的(等エントロピー的)になる
- これは、対流に対して、断熱温度勾配は中立安定であるため。断熱温度勾配より小さい勾配であれば対流は起きない。
- 星のある程度温度が高いところでは、輻射によるエネルギー輸送が非常に効率的になるため、対流が起こらない。
- 極度に小さい星を除いては、星の(質量で)大部分は輻射でエネルギーが輸送される。

## 対流 (2)

- 前回話をした林フェーズでは全体が対流的。これは温度が低いため。
- **CNO** サイクルになると、中心付近の一部が対流的になる
- 外側のちょっとは必ず対流的になるが、星の構造・高度には(林フェーズや巨星段階以外は)あまり影響がない。

# 星の内部構造・進化の方程式のまとめ

まとめると、エネルギー生産以外は、対流がおこっているところを無視すると

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (11)$$

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (12)$$

$$L_r = -4\pi r^2 \left( \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (13)$$



# 星の内部構造・進化の方程式のまとめ(2)

状態方程式は、非常に大質量の星以外では輻射圧優勢にはならない。

エネルギー生産は、「温度に敏感にエネルギー生産が変わる」という性質のため、近似的には、星の中心温度は**1-2**千万度で、外側に流れるのに必要なだけのエネルギーが生産される、と考えてよい。