

宇宙惑星科学2

牧野淳一郎

惑星学専攻

事務連絡

- 今日の小レポートあります。

事務連絡

- 評価は小テスト(初回はなし)とレポートで行う。

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

星形成と惑星形成

- 星形成
- 惑星形成

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。

放射伝達の問題

- 星ができる時に放射によるエネルギー輸送が重要なのは明らか
 - 放射による冷却
 - バックグラウンドの紫外線等による加熱。周りの星からの加熱 (大質量星)
 - 降着してくるガスに対する中心の原始星からの放射による加熱
- 3次元的な放射: 方程式としては位置、方向 (2次元)、エネルギーの6次元分布関数の平衡状態を求める必要がある。
- ものすごく計算量が多い。様々な近似方法が提案されているが、なかなか上手くいかない。
- なにか全く新しいアプローチがまだ多分必要。

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、計算機の世界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、放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放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 (放射に対して不透明)
- 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。

といった話を含めて、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放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(もう少し正確にいうと**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 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1万度くらいの熱放射に相当

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

クェーサーって？

- 「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、、、(JWSTでこの辺これから全然変わる)

- 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
- 最近では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。

質量保存の式

半径を r 、密度を ρ 、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 ρ 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 ρdr 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、温度が高いと放射圧(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 は放射定数、 m_H は水素原子の質量、 μ 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。放射圧は、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: 10^7K 程度。 $1\text{eV} \sim 10^3kT$ なので **10keV** 程度。
- 核融合反応で生じるエネルギーは **10MeV** 程度。なので、 10^{10}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、 $p-p$ チェインと **CNO** サイクルが主要な反応である。

- $p-p$ チェインは水素原子核(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}C から 3 個陽子を捕獲して ^{15}N になり、これが陽子と反応して ^{12}C と ^4He 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}C と ^{16}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}Fe まで進む。
- ^{56}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放射と対流である。まず放射について。

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、放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 は放射定数(既にててきた)、 c は光速、 κ 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 κ 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、放射輸送の式は

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

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。

放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、放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、放射のエネルギーは 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、放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)大部分は放射でエネルギーが輸送される。

対流(2)

- 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放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。

恒星の質量-光度関係

ここまでの議論から、星の質量と明るさの間関係を導くことができる。以下その議論をする。

まず、星の中心温度は質量によらずに一定とする。これは厳密に正しいわけではないが、上でみたようにまあそんなに大きくは変わらない。ある質量 M の星の密度分布が

$$\rho = \rho_0 f(r/r_0) \quad (14)$$

で与えられたとしよう。これは、密度から質量分布、圧力、温度、と順番に求めていって、熱流 L_r が半径によらず一定になる、ということである。

恒星の質量-光度関係 (2)

さて、そうなっていると、密度や半径を適当にスケールした、

$$\rho = \rho_1 f(r/r_1) \quad (15)$$

も、熱流が一定になる、という意味で解にはなっている。

但し、 ρ_1/ρ_0 と r_1/r_0 の間に何か関係をつけないと、中心温度が変わってしまい、条件としてつけた中心温度一定をみたさない。

恒星の質量-光度関係 (2)

例えば、星の半径を a 倍にしてみよう。これは、 $r_1/r_0 = a$ ということである。この時に、中心密度が x 倍になったとする。星の質量は a^3x 倍であり、圧力勾配は同じ相対位置のところで r^2 の分が a^{-2} 、質量は a^3x 、密度は x 倍なので ax^2 倍となり、圧力自体は2倍外側から積分してくるので a^2x^2 となる。つまり、温度は、状態方程式から a^2x 倍である。

つまり、温度一定であるためには、 $a^2x = 1$ でなければならないことがわかる。つまり、

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \quad (16)$$

質量と半径

星の総質量は $\rho_1 r_1^3$ に比例して、 ρ_1 は r_1^{-2} に比例するので、結局、質量が半径に比例する非常に簡単な関係

$$M \propto R \quad (17)$$

が導かれる。ここで、 M, R は星の総質量と半径である。

質量・半径と光度

では L_r はどうなるかである。同じように半径を a 倍にすることを考える。同じ相対位置で、 r^2 から a^2 、 $1/\rho$ 、 $1/\kappa$ からそれぞれやはり a^2 がでてきて、 dT/dr から $1/a$ がでてくるので、結局

$$L \propto a^5 \propto M^5 \quad (18)$$

つまり、星の明るさは質量の5乗に比例する、ということがわかる。

(κ が ρ に比例するのは比較的低温)

光度と表面温度

表面温度がどうなるかを考える。ここまでの議論は、実はエネルギー輸送については、「表面で温度 0」という境界条件を仮定して解を求めたことに相当しているが、実際には太陽を見ればわかる通り有限の温度を持つ。

この温度は、ほぼ全体が放射でエネルギーが流れている星については、表面から放射でていくエネルギーが内部での熱流と等しい、という条件で決まる。これはシュテファン・ボルツマン則から

$$L \propto 4\pi R^2 T_s^4 \quad (19)$$

なので

$$T_s \propto M^{3/4} \quad (20)$$

である。

大質量星

星の質量が太陽あたりだとここまでの議論はそれほど悪くないが、もっと大きな星では、密度が非常に低くなるために放射輸送に効くのが主に電子になり、この時は κ は ρ に依存しない。この領域では、ここまでの議論と同様にして

$$L \propto M^3 \quad (21)$$

になる。さらに大質量では、放射圧が圧力の主体になる。この領域では、温度と圧力の両方が一定で、議論を省略するが、

$$L \propto M \quad (22)$$

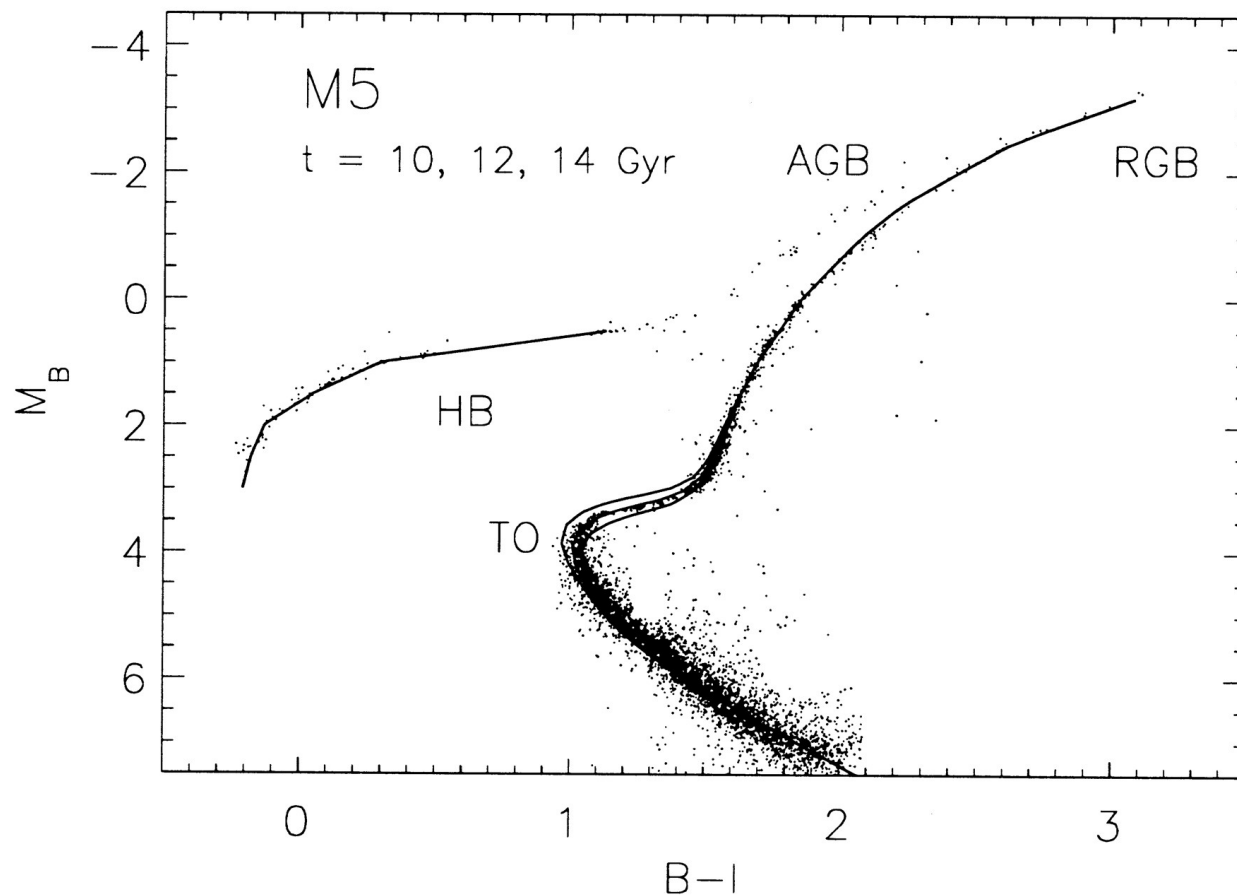
が導かれる。

色-光度関係、ないし HR 図

ここまでの議論から、恒星の表面温度 (実際には「表面」ではないので、「有効温度」という) と星の明るさの間には関係があり、(超大質量星を除いて) 明るいほうが温度が高いことがわかった。

これを天文学の言葉でいうと、「絶対等級で明るい星は青い」ということになる。この関係をプロットしたのが **HR 図** (最近の論文では色-等級図、**CMD** ということが多い) である。

CMDの例



(球状星団の例なのでちょっと特殊)

主系列星

星が水素燃焼を始めて時間が立つと、段々中心の水素がなくなってくる。しかし、前に述べたように、核融合反応は温度に敏感なので、水素がほとんどなくなっても温度を少しあげれば最初と同じだけエネルギーを供給できる。

このため、水素燃焼が続いている間、**CMD** 上で恒星はほとんど同じ位置にあり、その位置はほぼ質量だけで決まる(星が持つ金属量でもちろん少し変わる)。

この、水素燃焼段階にある星を主系列星といい、**CMD** 上で主系列星が作るシーケンスを主系列という。

ある質量の星が主系列にいる時間は、理論とシミュレーションでかなり精密に決まる。

主系列星の寿命

中心の水素がほぼなくなると主系列段階は終わる。星の一生の中では主系列段階の時間が圧倒的に長いので、これがほぼ寿命を決める。

寿命は質量/明るさになるので、小質量星は長く、大質量星は短い

太陽程度だと100億年、10太陽質量程度で1千万年程度まで短くなる。

惑星形成

星形成はまだなんだかよくわからないというのが現状だが、
では惑星形成は、、、

非常に大雑把なところはわかっていると思っている。

- ガスが冷却・重力収縮して星になる。
- 角運動量が大きな成分は星に落ちないでガス円盤に
- このガス円盤がさらに冷却するかなんかしてダスト成分が集まって惑星に

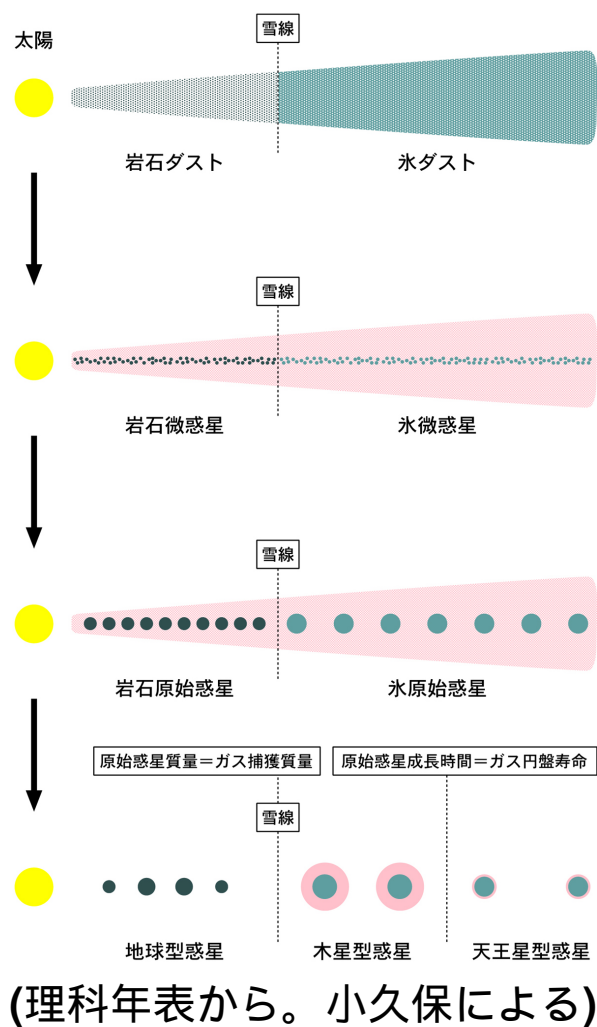
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

21世紀の惑星形成理論

といっても基本的には 1970 年代にできた「京都モデル」ないし「標準モデル」

- 「原始太陽系星雲」を想定: これは、大雑把には「現在ある惑星」がその場所にあるダストが集まってできたとして、最初はダストの他に水素・ヘリウムもあったとする
- その中で、ガスとダストが分離して、、、
- 詳しくは次のスライド以降で
- 大槻さんの講義でもっと詳しくやるよね？

標準的な惑星形成理論



- 太陽の周りに原始惑星系円盤。水素、ヘリウム+それ以外。
- 太陽に近いところでは水は気体。外側は氷: 惑星材料の量が違う
- ダストは赤道面に沈降、集まって「微惑星」になる。(10¹⁸g くらい)
- 微惑星同士がさらに重力相互作用で衝突・合体して「原始惑星」に(10万年くらい? 10²⁶g くらい)
- 原始惑星がさらに合体して地球型、あるいはガスを集めて木星型に

このシナリオが解決しようとした問題

- 「原始太陽系星雲」(現在の太陽系の惑星の質量をバラバラにして星雲にして、元々あったはずの水素・ヘリウムを足した仮想的なもの)からどうやって惑星ができたか
- 沢山ある困難の1つ: 小さなダストが合体して成長していくとすると、メートルサイズくらいになったところで成長速度よりガス抵抗で太陽に落ちる速度のほうが大きくなる
- 「ダスト落下問題」

ダスト落下問題

- ダストはケプラー回転する
- ガスは圧力もあり、外側のほうが圧力が小さいのでその圧力勾配の力があり、ケプラー回転よりちょっとゆっくり回る
- このために、ダストは抵抗を受ける。
- ダストが非常に小さいうちは、抵抗が非常に大きいのでガスにダストはくっついて動き、落ちない。
- ダストがすごく大きくなると、重力に比べてガスの流体力学的な抵抗は小さくなり、落ちない。
- 中途半端なサイズ(1メートルくらい)で落ちる

ダスト落下問題の「解決」

- 京都モデル: 赤道面に集まったダストが重力不安定で一気にキロメートルサイズの「微惑星」になる
- 本当にそうなるかどうかはまだ議論がある。
 - ダストが赤道面に沈むと、赤道面近くは回転が速くなり、速度差からケルビン・ヘルムホルツ不安定が起きて円盤が乱流化するという説が有力
 - 但し、これが本当かどうかはよくわかってはいない
- 内側のほうがのガスは電離していて、密度が下がる。境界のところにダストがたまるかもしれない。(よくわからない)

次の問題

Hayashi, et al. 1985

- 微惑星から惑星へ、という基本的な描像は既にあった
- しかし、理論的には惑星ができるのに時間がかかりすぎる、という問題があった

何故時間がかかるということになっていたか？

- 惑星が成長すると成長速度が遅くなる (1/3 乗)
- 太陽から遠いと成長速度が遅くなる (3 乗)

海王星は存在しない(形成時間 100 億年以上)

形成時間問題への解

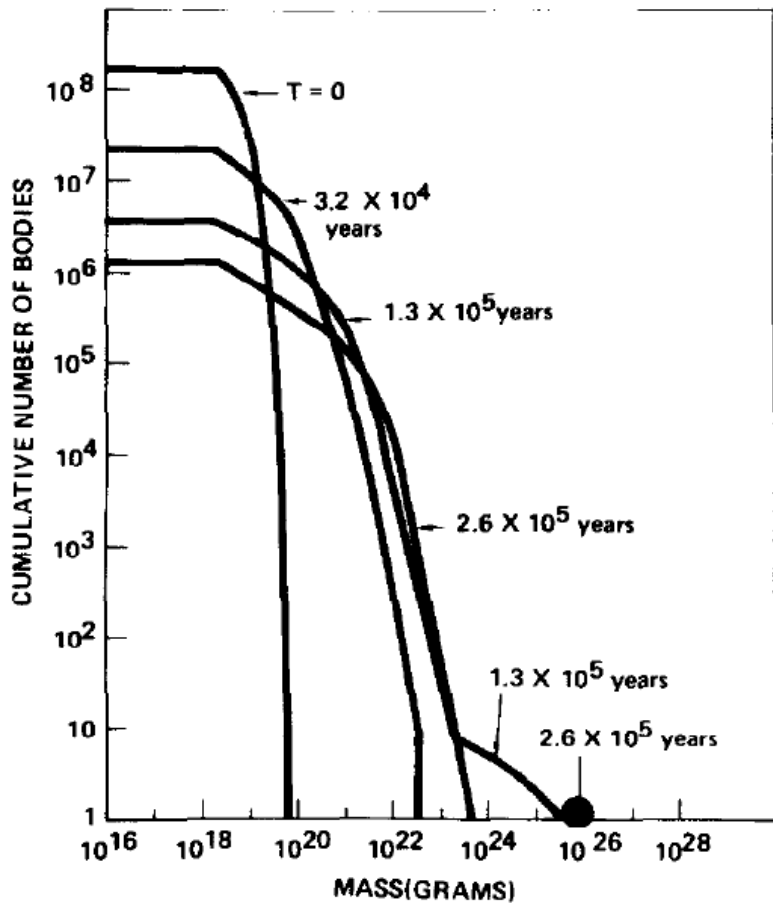
暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- それまでの理解: 秩序的成長。微惑星は同じように重くなる
- 暴走的成長: 周りよりも少し重くなったものが他より速く成長してどんどん大きくなる

速く成長する理由

- 大きいので衝突断面積大きい
- 重いので、重力フォーカシングの効果も大きい
- ランダム速度が小さい(円軌道に近い)ので、重力フォーカシングの効果がさらに大きい

Wetherill and Stewart 1989



- 微惑星の質量分布の時間変化をモンテカルロ計算
- 衝突・合体の効果、速度分散等はモデル
- 水平方向空間分布は「一様」
- 最初深いべき (-2.5 乗くらい)の質量分布ができて、そこからさらに重いものができる