

2016年度「宇宙と地球と人間」

## 講義資料 3

- 7. 現代天文学の時代へ
- 8. 膨張する宇宙
- 9. 21世紀の太陽系観

東京学芸大学 自然科学系 宇宙地球科学分野 助教  
西浦 慎悟 (にしうら・しんご)

### 7. 現代天文学の時代へ

「恒星(太陽)のエネルギー源は何か？」

太陽はどのくらい輝き続けるのか？  
太陽の年齢は？ → 地球の年齢は？

17世紀：ジェームズ・アッシャー司教(アイルランド)が  
聖書の記述から地球の起源は紀元前4004年10月23  
日と算出。

「地表よりも地中の方が温度が高い」@炭鉱  
→ 地球は太陽に暖められているように見えるが、  
実は元々熱かった地球が熱を宇宙に放出して徐々に冷えているのではないか？

1770年代：博物学者ビュフォン(仏)が鉄の冷却率から  
地球の年齢を7万5千年～16万8千年と計算した。

→ 「地球年齢はせいぜい50万年くらいだろう」

→ 地球の「非常に長い過去」を支持する研究



ビュフォン

7. 現代天文学の時代へ

地質学の発展

18世紀後期：アブラハム・ゴットローブ・ヴェルナー(独)は、広い範囲で同じ地層が見つかることから、大規模な作用が地層を作ると考えた。

ウィリアム・スミス(英)は、地層累重の法則(下の地層ほど古い)と、示準化石による地層の年代決定方法を確立した。

1795年：ジェームズ・ハットン(英)が、『地球の理論』を出版し、斉一説を説く。

斉一(せいいつ)説：地質学的・生物学的な変化は、地球の歴史を通して常に同じである。

19世紀初め：チャールズ・ライエルが、『地質学原理』を出版し、斉一説を広める。

→ 地球の年齢は千年単位ではなく、百万年単位



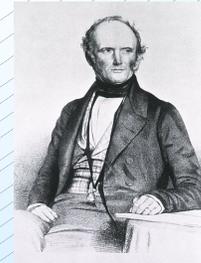
ヴェルナー(独)



スミス(英)



ハットン(英)



ライエル(スコットランド)

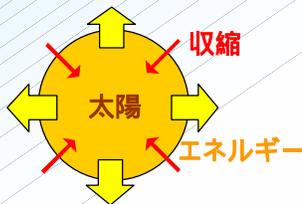
7. 現代天文学の時代へ

熱力学の発展

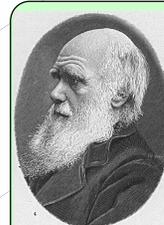
1854年 太陽の収縮による重力エネルギー(ヘルムホルツ[独])



ヘルムホルツ



・太陽の年齢は最長で4-5億年(ケルビン卿[英])



ダーウィン(英)

進化論

↓  
『生物が進化するには数100万年では時間が足りない!!』

・熱力学第一法則(エネルギー保存の法則)  
全ての相互作用においてエネルギーは保存される

・熱力学第二法則(エントロピー増大の法則)  
一様温度の物体が持つ熱を全て仕事に変換する過程は実現不可能



ケルビン卿

7. 現代天文学の時代へ

原子物理学・核物理学の発展

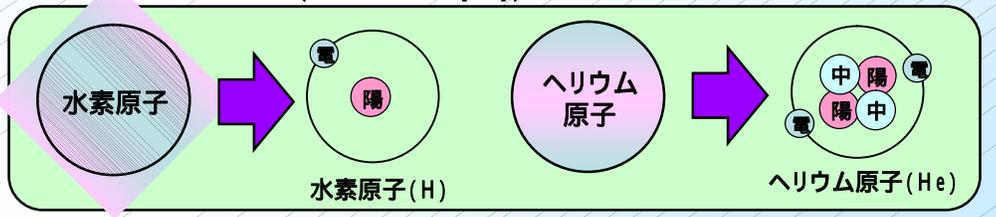
・放射性物質の発見

- 1895年 X線の発見 (レントゲン[独])
  - 1898年 放射線の発見 (ベクレル[仏])
  - 1902年 放射性元素の元素変換説を提唱 (ラザフォード[ニュージーランド・英])
- 放射線物質の発見  
岩石などの年代測定的基础

地球内部に熱源が存在する

・原子構造の解明

- 1897年 電子の存在確認 (トムソン[英])
  - 1904年 原子模型の理論 (長岡半太郎[日本])
  - 1911年 原子核の存在確認 (ラザフォード[ニュージーランド・英])
  - 1913年 陽子の発見 (トムソン[英])
  - 1932年 中性子の発見 (チャドウィック[英])
- 地球・太陽の年齢はもっと長い



7. 現代天文学の時代へ

・相対論と量子論の登場

- 1900年 エネルギー量子仮説 (プランク[ドイツ])
- 1905年 特殊相対性理論 (アインシュタイン[ドイツ])
- 質量とエネルギーの等価性
- 1913年 量子論に基づく原子の構造モデル (ボーア[デンマーク])
- 1916年 一般相対性理論 (アインシュタイン[ドイツ])
- 1924年 物質波理論 (ド・ブロイ[フランス])
- 1925年 量子力学(行列力学)の開発 (ハイゼンベルク[ドイツ])
- 量子力学(波動力学)の開発 (シュレーディンガー[オーストリア])
- 1928年 量子トンネル効果の理論 (ガモフ[ソ連])
- 原子核反応の可能性
- 1938年 原子核分裂の発見 (オッター・ハーン[ドイツ]、リーゼ・マイトナー[オーストリア])
- 1939年 原子核融合の理論 (ハンス・ベータ[アメリカ])

恒星のエネルギー源としての核融合反応

7. 現代天文学の時代へ

核融合反応 ~ 恒星のエネルギー源

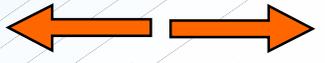
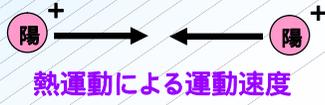


>



→ この質量の差がエネルギーとなって放出される。

水素原子核    ヘリウム原子核



クーロン力による反発力に逆らって、二つの水素原子核(陽子)を衝突させるためには、**100億度**という超高温状態が必要。

→ 太陽中心でも**1000万度**程度

量子力学 → 水素原子核(陽子)は波  
量子トンネル効果 → 極めてわずかな確率だが、エネルギーの壁を通り抜ける陽子がある(ガモフ, 1928年)

1000万度の温度でも十分な陽子どうしの衝突が生じる

太陽内部で、1000万度に達し、核融合反応が生じている場所は、中心のわずか**数10 km**の領域

→ 太陽の年齢**50億年**

7. 現代天文学の時代へ

近傍の恒星までの距離測定

地球の公転運動による、恒星の年周視差を使う!

三角測量の利用

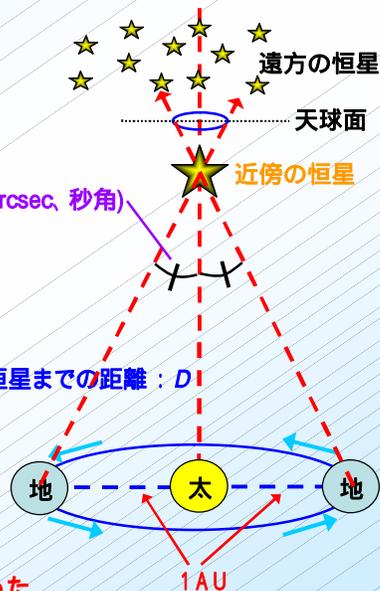
年周視差  $p$  (arcsec, 秒角) の恒星までの距離  $D$  (pc) は、

$$D = \frac{1}{p}$$

太陽-地球間の距離1 AUに対して、年周視差が  $p = 1$  となる天体までの距離  $D$  を、1パーセク (pc) と定義する。

$$1\text{pc} = 3.08 \times 10^{13} \text{ km}$$

→ 恒星の絶対等級(光度)の導出が可能になった



### 7. 現代天文学の時代へ

太陽の次に近い恒星:「アルファ・ケンタウリ」= 太陽と同じ大きさ、明るさ

太陽 - アルファ・ケンタウリ間の距離

= 4.4光年 (1光年 = 約9兆5千億km)

年周視差: 0.76秒角

「太陽を100円サイズに縮めて、東京に置くと  
アルファ・ケンタウリはどこに置けば良いか？」

(参考値)

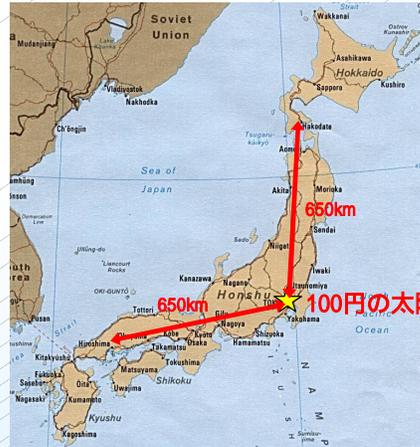
地球の直径: 約1万3千km

太陽の直径: 地球の約109倍

太陽・地球間の距離: 約 $1.5 \times 10^8$  km

恒星と恒星の間はスカスカ・・・

恒星までの距離ははるかに遠い

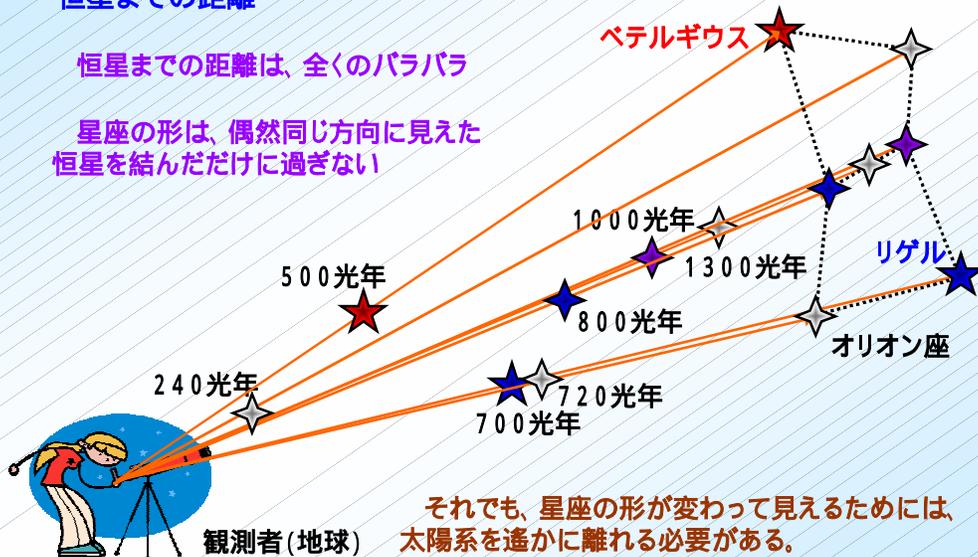


### 7. 現代天文学の時代へ

恒星までの距離

恒星までの距離は、全くのバラバラ

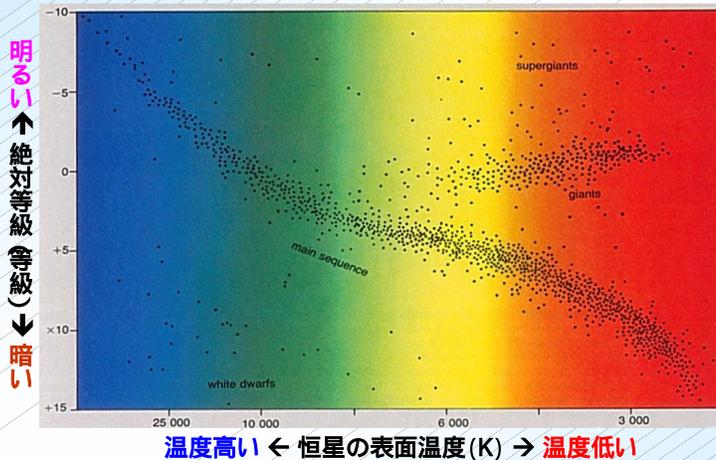
星座の形は、偶然同じ方向に見えた  
恒星を結んだだけに過ぎない



7. 現代天文学の時代へ

ヘルツシュプリング・ラッセル図 (HR図: 1910年~1911年)

ヘルツシュプリング(デンマーク)とラッセル(アメリカ)が独立に提唱する。



ほとんど(80%~90%)の恒星は左上(明るくて高温)から右下(暗くて低温)に向けて分布する。

↓  
主系列  
主系列星

低温な恒星には非常に明るいもの(巨星)と暗いもの(矮星)がある。

温度高い ← 恒星の表面温度(K) → 温度低い

7. 現代天文学の時代へ

重い元素の起源を求めて 20世紀中頃: Heより重たい元素の起源は?

陽子-陽子連鎖反応 → ヘリウム(He)

CNOサイクル → ヘリウム(He) [C、N、Oは実質上増えていない]



ジョージ・ガモフ(米)

・ビッグバン(ガモフ他)

「宇宙初期の火の玉の中で重い元素が合成された」



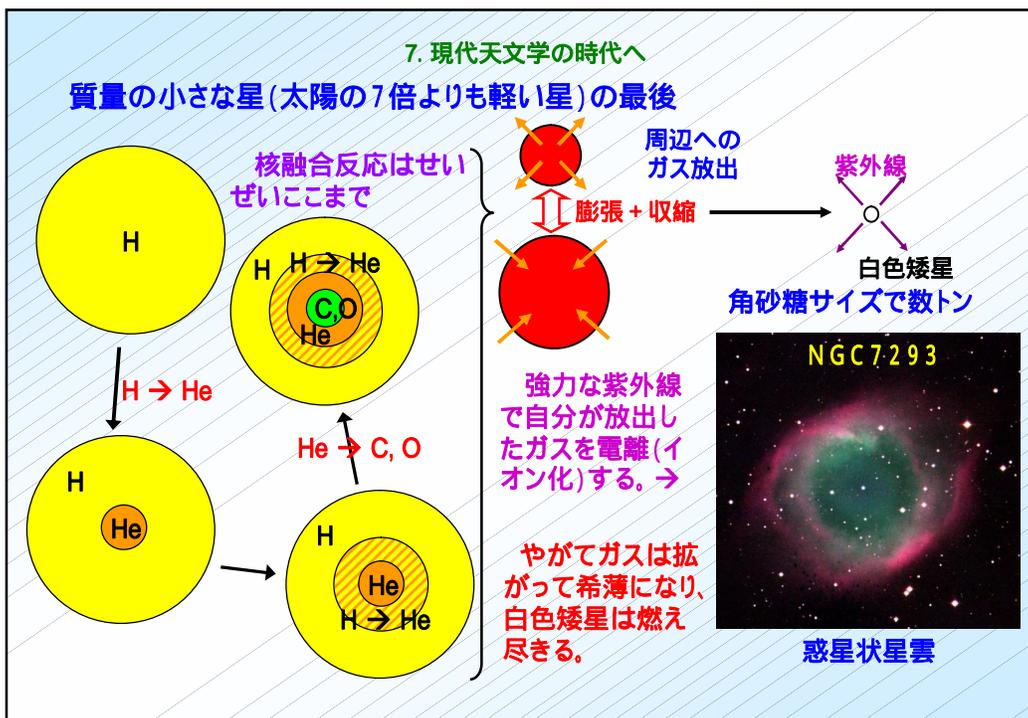
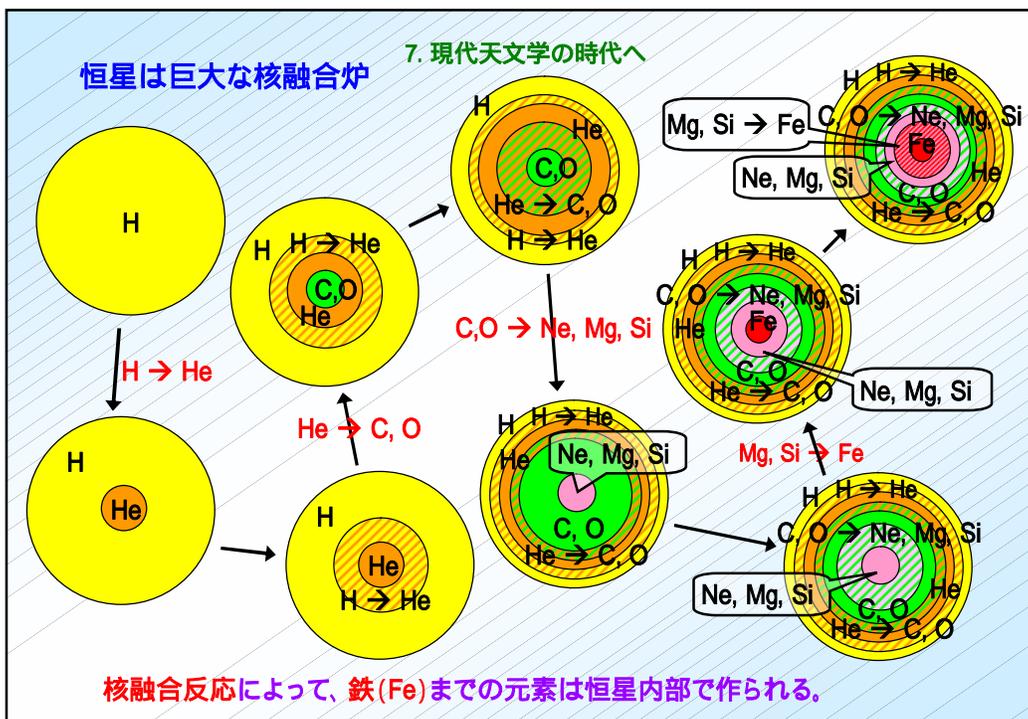
Heが合成された段階で、初期宇宙は既に希薄になってしまい、これ以上元素を合成できない。

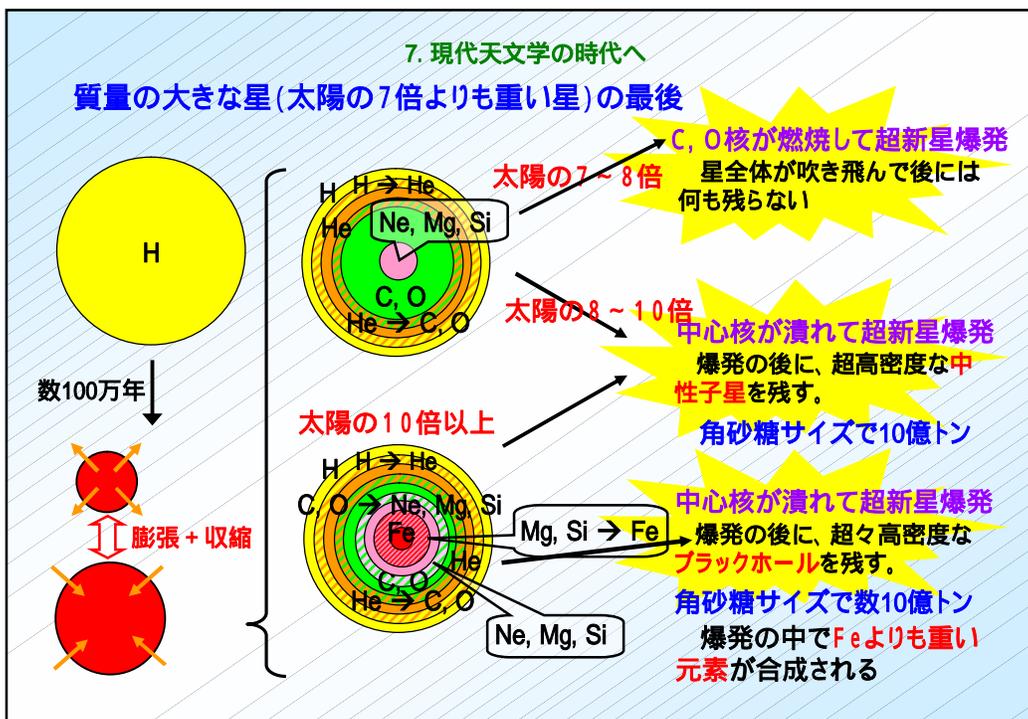
・恒星内部(ホイール他)

「恒星内部で次々に核融合反応が進行して重い元素が合成された」



フレッド・ホイール(米)





7. 現代天文学の時代へ

元素の周期表

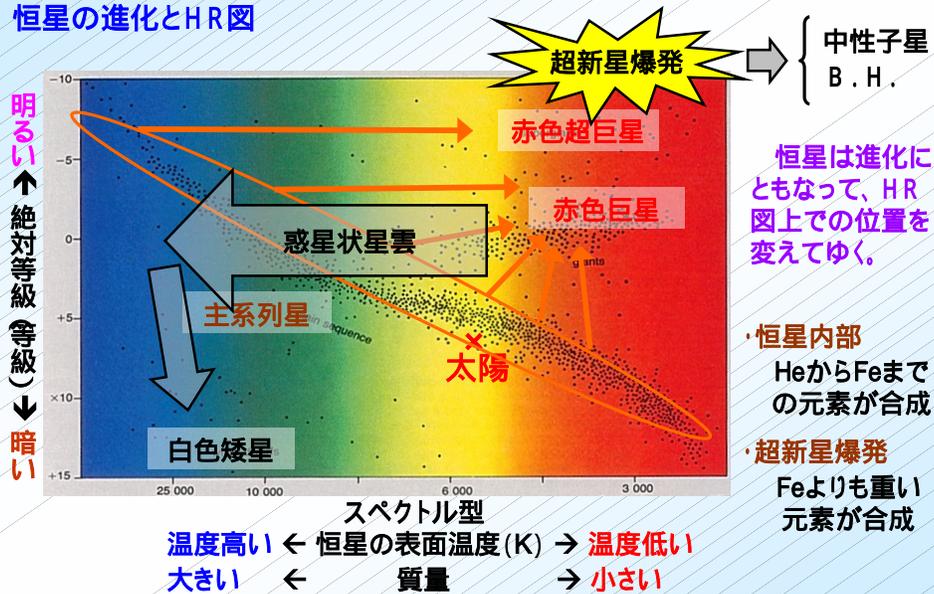
ビッグ・バンでも合成され得る



鉄よりも重い元素は、超新星爆発によってつくられる。

7. 現代天文学の時代へ

恒星の進化とHR図



## 7. 現代天文学の時代へ

### 恒星の輪廻転生



## 8. 膨張する宇宙

### 天の川の再発見

**天の川** : Milky way = 乳の流れる場所(ギリシャ神話に由来) = 銀河



ガリレオ(伊)

自作の天体望遠鏡で天の川を観察

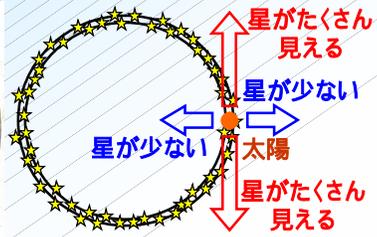


17世紀初め : ガリレオ・ガリレイ 「天の川は無数の星(恒星)の集まりである」

8. 膨張する宇宙

宇宙を描き出す 中世の人々のイメージ：「宇宙 = 星の存在する場所」

1750年：トーマス・ライト(イギリス)「宇宙は球殻状」



カント(普)

ランベルト(独)

ライト(英)とライトの宇宙像

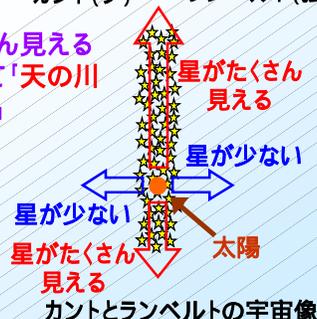
1755年：イマニュエル・カント(プロイセン)

「宇宙は薄い円盤状の形」

宇宙 (= 恒星が存在する場所) はたくさん存在する → 「島宇宙」概念の登場

1762年：ヨハン・ハインリッヒ・ランベルト(ドイツ)

「宇宙は円盤型の星の集まり」



カントとランベルトの宇宙像

8. 膨張する宇宙

宇宙の地図を作る

18世紀末期～19世紀初頭

ウィリアム・ハーシェル(イギリス)：望遠鏡を用いた恒星の掃天(サーベイ)観測を行い、簡単な仮定の下で、恒星までの距離を算出し、宇宙の恒星地図を作成した。



ハーシェル

(ハーシェルが導入した仮定)

全ての星の本当の明るさは全て同じ(星の見かけの明るさは距離の2乗に反比例して暗くなる)

ハーシェルの望遠鏡は、宇宙の端に存在する星まで見通している。



ハーシェルが観測から描いた宇宙

直径：約6000光年、厚み：最大で1100光年

→ かなりの過小評価ではあるが...

観測結果から初めて、宇宙が円盤状であることを示した。

### 8. 膨張する宇宙

**19世紀末期:** フーゴ・フォン・ゼーリガー(独)は、「ボン掃天星表」などのカタログから恒星の数を数え、ハーシェルの仮定を用いない方法で宇宙モデルを構築した。その結果、ハーシェルの宇宙に似た描像を得るに至った。

**20世紀初期:** ヤコブス・カプティン(オランダ)、フォン・ゼーリガーの研究をさらに推し進め、カプティン宇宙モデルを提唱する。



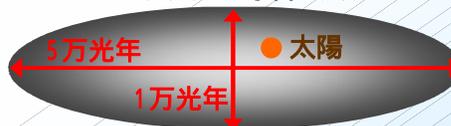
フォン・ゼーリガー



カプティン

我々が存在している無数の恒星の集まり = 銀河系、天の川銀河

カプティンの宇宙モデル



- ・ 恒星の密度は、中心から外側に向けて減少する。
- ・ 太陽(太陽系)は中心からずれた位置に存在する。

→ 少しずつ銀河系の実像に近付いているが、依然として過小評価している

### 8. 膨張する宇宙

#### 楕円星雲・渦巻星雲を巡る論戦 ~ 「島宇宙説」対「星雲説」 ~

**18世紀半ば:** 望遠鏡による観測から、夜空のあちこちに楕円星雲が発見される。

「楕円星雲・渦巻星雲とは何か？」 島宇宙説: カント、ランベルト

太陽は一つの島宇宙の中の一つの恒星に過ぎず、他にも同等の島宇宙が無数に存在する。

星雲説: カント、ラプラス

ガスが凝縮しつつ渦を巻いている姿で、ここから星が誕生する。大きさも島宇宙よりずっと小さい。



アンドロメダ星雲(東大木曾観測所)



ラプラス(フランス)

**18世紀後期:** ウィリアム・パーソンズ(ロス卿:英)(英)が、楕円星雲の一部が渦巻き構造になっていることを発見。以降、多くの楕円銀河に渦巻き構造が見つかる。

ジェームズ・ジーンズ(英)が、潰れゆくガス塊が渦を巻くことを数学的に示す。

→ 「星雲説」を強く支持

ただし、ロス卿自身は、宇宙は変化しないと考えており、ガス雲から恒星が生まれる、という星雲説には反対していた。ガス雲は、望遠鏡で恒星に分解できるとし、ウィリアム・ハーシェルと論戦を繰り広げた。

8. 膨張する宇宙

1864年: ハギンス(英)「全ての星雲は、星の集合ではなく、輝くガスである」  
 → ハギンスは、星雲は全て同じだと考えていた。

1888年: ハギンス(英)「アンドロメダ星雲のスペクトルは解釈が困難」

1897年: ジュリアス・シャイナー(独)「アンドロメダ星雲のスペクトルは恒星に似ている」

1900年頃: ジーンズ の理論では、太陽の自転速度が、観測されるよりも遥かに高速になることが判明。

1914年: スライファー(米:ローウェル天文台) 14個の渦巻星雲の回転速度が数100 km/sにもなること、そして、そのほとんどが我々から遠ざかっていることを発見。→ 星雲説では説明できない

1916年~1923年: ファン・マーネン(米:ウィルソン山天文台) 渦巻星雲M101をはじめ7個の渦巻星雲に回転の固有運動を検出。→ 渦巻星雲は近距離に存在する

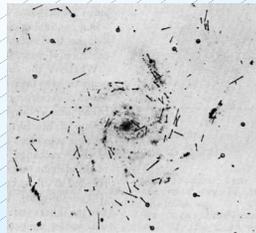
1917年: リッチー(米:ウィルソン山天文台)とカーティス(米:リック天文台)が、過去の観測写真から、渦巻星雲の渦状腕に、複数の異なる超新星や新星を発見。  
 → 星雲説では、中心に1つだけ星が出現するはず



スライファー



ファン・マーネン



ファン・マーネンが測定した渦巻星雲M101

8. 膨張する宇宙

大論争(The Great Debate) ~ シャプレイ vs カーティス ~

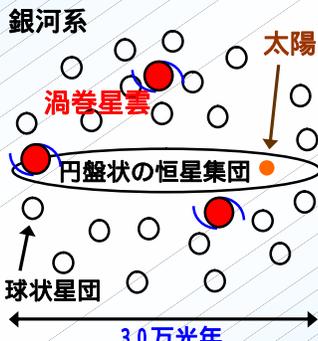
1920年4月26日: アメリカ国立科学院の年会にて

銀河系の大きさは?

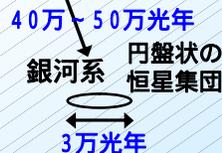
渦巻星雲は「島宇宙」か? 銀河系内天体か?



シャプレイ(米)



カーティス(米)



両者の議論は噛み合わなかった

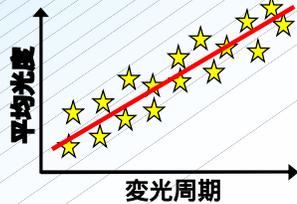
## 8. 膨張する宇宙

「渦巻星雲までの距離を、直接測定する」

### セファイド型変光星

セファイド型変光星 = 赤色巨星の一種で、1日～50日周期で明るさが規則的に変化する。

1912年: リービット(米:ハーバード・カレッジ天文台)が17個のセファイド型変光星の変光周期と光度の間の相関関係を見出した。



M56 (東大木曾観測所)

セファイド型変光星の変光周期を観測し、見かけの明るさを調べることで、そのセファイド型変光星までの距離を導くことができる。

→ 遠過ぎて年周視差では測定できない天体(例えば球状星団や渦巻星雲)に応用できる。



リービット(米)



シャプレイ(米)

1917年: シャプレイ(米:ウィルソン山天文台)が、多くの球状星団までの距離を測定し、天の川中心に対して球状星団が球対称に分布していることを示唆。

球状星団の分布の中心(銀河系の中心)から、太陽が大きく離れていることも見出した。

## 8. 膨張する宇宙

### 論争の終焉

1923年～1924年: エドウィン・ハッブル、ミルトン・ヒューメイソン(米:ウィルソン山天文台)は観測によってアンドロメダ星雲(M31)と渦巻星雲M33の中にセファイド型変光星を発見。

→ その変光周期と見かけの明るさから、M31・M33までの距離を100万光年と計算した。

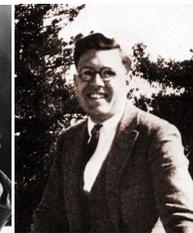
渦巻星雲は遥か彼方に存在する島宇宙



アンドロメダ星雲M31とM33 (東大木曾観測所)



ハッブル



ヒューメイソン

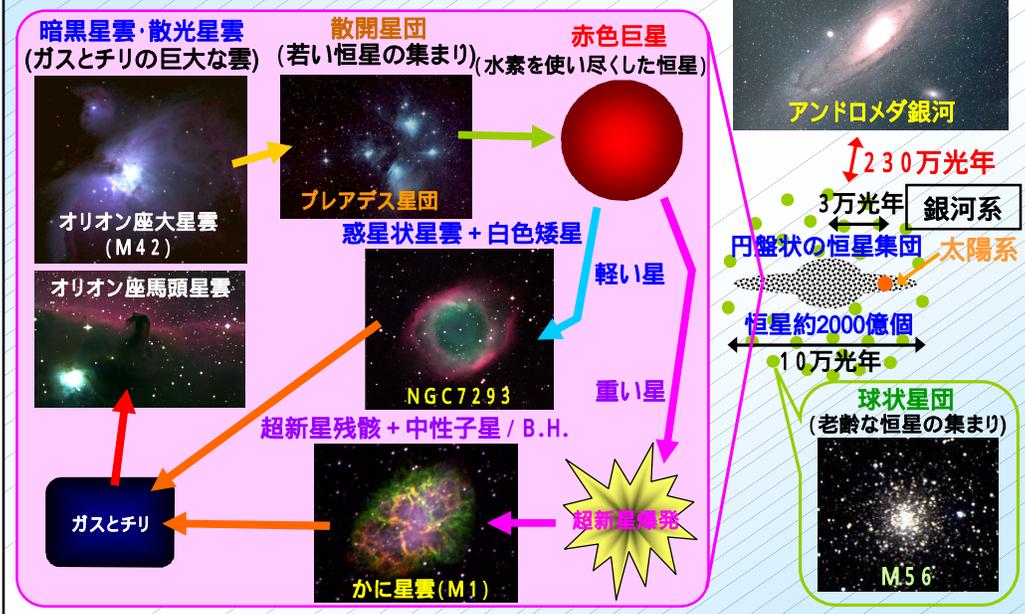
~~アンドロメダ星雲、渦巻星雲~~

↓  
アンドロメダ銀河、渦巻銀河

宇宙には無数の銀河が存在している。

8. 膨張する宇宙

銀河・銀河系と星団・星雲の関係

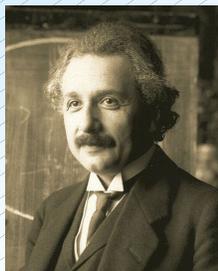


8. 膨張する宇宙

現代宇宙論の夜明け

20世紀初頭の宇宙観: 「宇宙は、始まりも終わりも無く、未来永劫変化しないもの」

1915年: アルベルト・アインシュタイン(独)、一般相対性理論を構築。



アインシュタイン

宇宙項 (ラムダ)

$$R_{\mu} - \frac{1}{2} R g_{\mu} + \Lambda g_{\mu} = \frac{8}{c^4} G T_{\mu}$$

アインシュタインの重力場方程式

当初、宇宙項 はゼロだったが、これでは宇宙が自分自身の重力(万有引力)で収縮し潰れてしまうため、これを妨げる反発力(万有斥力)として導入した。

1922年: アレクサンドル・フリードマン(ソ連)が方程式の解として膨張宇宙モデルを導く。

1927年: ジョルジュ・ルメートル(ベルギー: 司祭)が独立に膨張宇宙モデルを導き「宇宙は原初の爆発から始まった」という説を提唱。

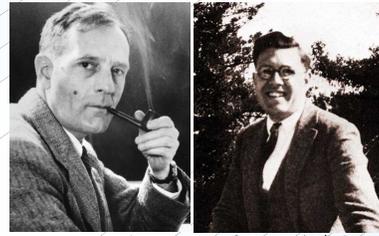


ルメートル

## 8. 膨張する宇宙

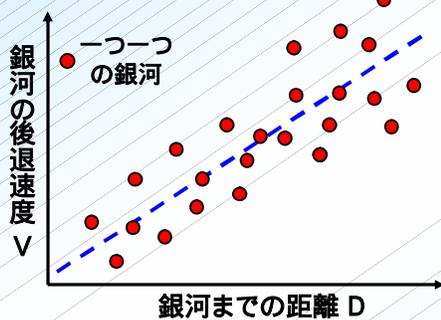
### 膨張宇宙の発見

1929年: ハッブルとヒューメイソン(米)は銀河の中のセファイド型変光星を観測、距離を導出し、分光観測で得られた後退速度(後述)との相関関係を発見した。



ハッブル

ヒューメイソン



「銀河の後退速度は、その銀河までの距離に比例する」 $H_0$ : ハッブル定数

「全ての銀河が元々は同じ場所におり、ある瞬間に同時に四方八方に動き始めた」と考えるとうまく説明できる

$$V = H_0 \times D \text{ (ハッブルの法則)}$$

「膨張宇宙」の状況証拠の一つ

アインシュタイン「宇宙項(宇宙定数)の導入は生涯で最大の過ちである」

だが、しかし…

## 8. 膨張する宇宙

### ハッブル定数と膨張宇宙の年齢

$$V = H_0 \times D \text{ (ハッブルの法則)}$$

$V$ : 銀河の後退速度(km/s)

$D$ : 銀河までの距離(Mpc)

$H_0$ : ハッブル定数(km/s/Mpc)

ハッブル定数の逆数は、近似的な膨張宇宙の年齢を示している。

$$\frac{1}{H_0} = \frac{D}{V} = \frac{\text{道のり}}{\text{速さ}} = \text{要した時間}$$

(例)  $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$  の場合

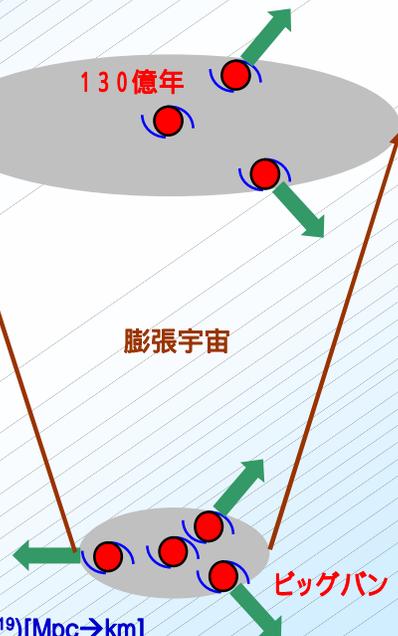
$$1\text{Mpc} = 3.09 \times 10^{19} \text{ km}$$

$$1\text{年} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\text{宇宙年齢} = 1/H_0 = 1 / 75 \text{ (s Mpc/km)}$$

$$= 1 / 75 / (3.16 \times 10^7) [\text{s} \rightarrow \text{年}] \times (3.09 \times 10^{19}) [\text{Mpc} \rightarrow \text{km}]$$

$$= 1.30 \times 10^{10} \text{ 年} = 130\text{億年}$$



## 9. 21世紀の太陽系観

### 小惑星を持って帰る



### 彗星を持って帰る



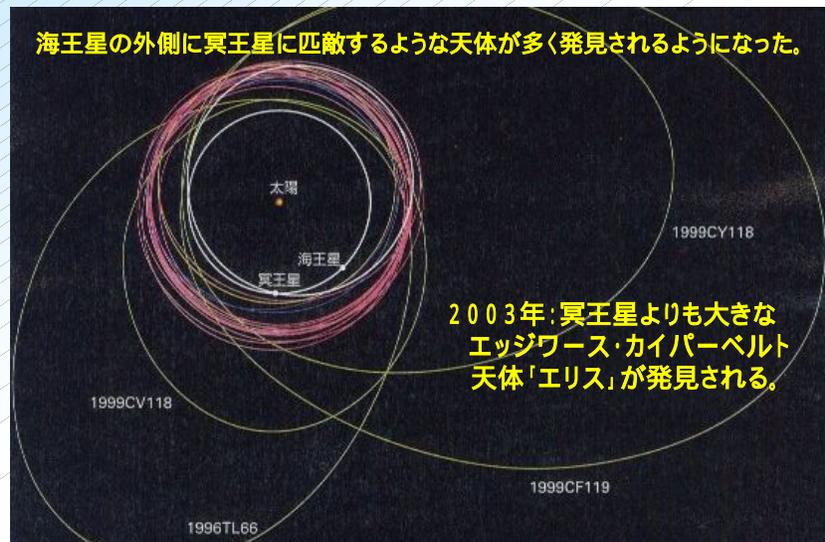
彗星を壊して一部  
を持ち帰る

ディープ・インパクト計画

小惑星を持ち帰って分析し、太陽系の  
起源解明に挑む。

## 9. 21世紀の太陽系観

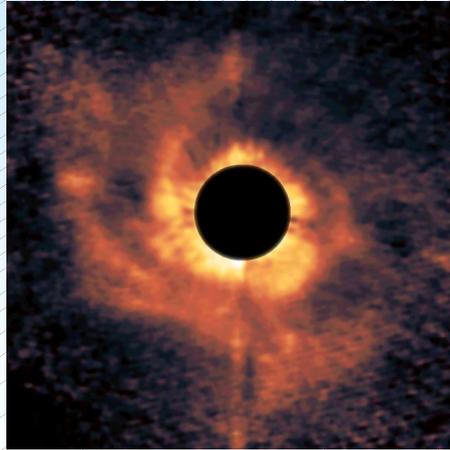
### 冥王星とエッジワース・カイパーベルト天体



→ '冥王星は特別な天体ではない' → 冥王星を「準惑星」とする。

## 9. 21世紀の太陽系観

### 惑星形成初期の現場



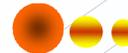
ぎょしゃ座AB星(すばる, 国立天文台)  
原始惑星系円盤が中心星  
からの赤外線を反射。

### 異形の惑星たち

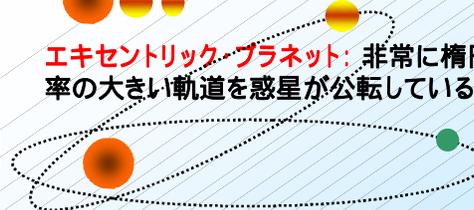
**太陽系:** 内側を小さい岩石型惑星、  
外側を巨大なガス惑星が円に近い  
軌道を公転している。



**ホット・ジュピター:** 地球よりもずっと内側  
を巨大なガス惑星が公転している。



**エキセントリック・プラネット:** 非常に楕円  
率の大きい軌道を惑星が公転している。



**あまりにも太陽系と異なる姿**  
我々の太陽系は、一般的なものではなかった！

### 参考資料と引用文献など:

- 1) ティモシー・フェリス(野本陽代訳 1992年):『銀河の時代 宇宙論博物誌(上、下)』、工作舎  
(画像: ガリレオ肖像、ハーシェル肖像)
- 2) 奥村幸子ほか(1996年): 新版地学教育講座13『宇宙・銀河・星』、東海大学出版会
- 3) ASTRONOMY, Cambridge University Press (画像: HR図)
- 4) 東京大学天文学教育研究センター 木曾観測所HP (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>)  
(画像: NGC7293、馬頭星雲、M42、M45、M1輝線画像、天の川、M31、M56、M33)
- 5) 岡村定矩(1999年):『銀河系と銀河宇宙』、東京大学出版会 (画像: ハーシケルの宇宙像)
- 6) Cosmic Journey ホームページ (<http://www.aip.org/history/cosmology/index.htm>、画像: スライファー、M101の固有運動、エドウィン・ハッブル、ミルトン・ヒューメイソン)
- 7) Shade Tree Physics ホームページ (<http://www.datasync.com/~rsf1/>、画像: ファン・マーン)
- 8) パージニア大学天文学教室ホームページ (<http://www.astro.virginia.edu/>、画像: カーティス)
- 9) JAXAホームページ (<http://www.jaxa.jp>) (画像: はやぶさ、小惑星イトカワ)
- 10) NASAホームページ (<http://www.nasa.gov>) (画像: SN1994D、テンペル 彗星)
- 11) Wikipedia (画像: ビュフォン肖像、ヴェルナー肖像、スミス肖像、ハットン肖像、ライエル肖像、ヘルムホルツ、ケルビン卿、ダーウィン肖像、ガモフ、ホイール、ライト肖像、カント肖像、ランベルト肖像、フォン・ゼーリガー、カプティン、ラプラス、シャプレー、リービッ、アインシュタイン、ルメートル)