



EHTによるM87の中心領域の観測結果

credit: EHT collaboration

https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/images.html

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏



講義のアウトライン

- ・ 第 1 回: 天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体
- 第2回: 電磁波による宇宙の観測
- 第3回: 太陽系内天体と天体の運動
- ・ 第4回: 天体の距離、明るさ、色
- 第5回:恒星1-恒星のエネルギー源と核反応-





2

講義のアウトライン

- 第6回: 恒星2 恒星の分類と進化-
- 第7回: 星の誕生と星間物質
- 第8回:銀河1-銀河系の構成要素-
- 第9回:銀河2-銀河の分類と進化-
- 第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- ・第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・ 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界

第11回: 白色矮星、中性子星、 ブラックホール

- ・
 ・
 白色矮星とは何か
- ・中性子星とは何か
- ブラックホールとは何か



- ・主系列(Main sequence): HR図を左上 から右下に横切る帯とそれに属する星
- ・巨星・超巨星(giants・supergiants): HR図上で右上に位置する星の集団で、 主系列から分岐している?
- ・白色矮星(white dwarfs): HR図上で左 下に位置する星の集団

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/





- ・ 白色矮星(white dwarf)は太陽のような 中小質量星(<8-10M_●)の最終状態
- ・すでに燃料(水素とヘリウム)を使い果た し、星としての寿命を終えて冷えていく
- が星自身の重力を支えていた
- ・
 白色矮星内部では何が起きていて、なぜ
 半径が小さいのか?

data source: Mesa Isochrons & Stellar Track database http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/



7



- ・そのヒントは、1844年に遡る
- フリードリヒ・ヴィルヘルム・ベッセルによる シリウスの固有運動の観測
- なにかふらついている?
- ・見えないが星を伴った連星であると解釈できる (シリウスBの存在)
- ・現代では分離して見ることができる





Fig. 2-a. Heliocentric paths of Sirius A, Sirius B, and the center of mass of the system, I. b. Orbits of A and B around their common focus or center of mass.

シリウスの固有運動の観測

Lippincott (1961) Astronomical Society of the Pacific Leaflet 8, 311 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1961ASPL....8..311L 8

- ・そのヒントは、1844年に遡る
- フリードリヒ・ヴィルヘルム・ベッセルによる シリウスの固有運動の観測
- なにかふらついている?
- ・見えないが星を伴った連星であると解釈できる (シリウスBの存在)
- ・現代では分離して見ることができる



- ・ 連星(binary star): 2つ以上の星が重力的 に束縛され、お互いの周りを回っているシ ステム
- ・2つの星からなる連星の場合、**共通重心**を回 っている
- ・恒星A(質量MA)と恒星B(質量MB)の恒星間距 離をM_B:M_Aの質量比に分割した点
- シリウスの場合、片方が白色矮星









円運動をする連星の共通重心と軌道

- ・ 連星(binary star): 2つ以上の星が重力的 に束縛され、お互いの周りを回っているシ ステム
- ・2つの星からなる連星の場合、**共通重心**を回 っている
- ・恒星A(質量MA)と恒星B(質量MB)の恒星間距 離をM_B:M_Aの質量比に分割した点
- シリウスの場合、片方が白色矮星









円運動をする連星の共通重心と軌道

- ・ 連星(binary star): 2つ以上の星が重力的 に束縛され、お互いの周りを回っているシ ステム
- ・2つの星からなる連星の場合、共通重心を回 っている
- ・恒星A(質量MA)と恒星B(質量MB)の恒星間距 離をMB:MAの質量比に分割した点
- シリウスの場合、片方が白色矮星











円運動をする連星の共通重心と軌道 (実際にはシリウスは楕円軌道なので注意)

質量 約1M.



- ・ 連星(binary star): 2つ以上の星が重力的 に束縛され、お互いの周りを回っているシ ステム
- 2つの星からなる連星の場合、
 共通重心を回 っている
- ・恒星A(質量MA)と恒星B(質量MB)の恒星間距 離をM_B:M_Aの質量比に分割した点
- シリウスの場合、片方が白色矮星









Fig. 2-a. Heliocentric paths of Sirius A, Sirius B, and the center of mass of the system, I. b. Orbits of A and B around their common focus or center of mass.

シリウスの固有運動の観測

Lippincott (1961) Astronomical Society of the Pacific Leaflet 8, 311 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1961ASPL....8..311L 13

 2つの星の連星系での質量(M_A,M_B)と周期 P・連星間距離aの関係: $G(M_A + M_B)$

(太陽系天体の時は、地球質量を太陽質量に比べて無視(m<<M)したことに注意)

- ・シリウスの合計質量(MA+MB)が分かる
- ・シリウスAはA型主系列星ということなの で、2M_●程度 → シリウスBは約1M_●

(ドップラー効果による視線速度の観測からMA/MBも分かる)

14



https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1961ASPL....8..311L

シリウスBの正体

- ・シリウスAとBはそこまで質量が変わらない
- ・しかし、圧倒的にシリウスBは暗い(シリウスA の可視光での絶対等級M=1.42,シリウスBは M = 11.3)
- ・10等暗いと、光度は1/10000
- ・シュテファン=ボルツマンの法則: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$
- ・あとはスペクトル(表面温度)が知りたい



シリウスBの正体

- ・シュテファン=ボルツマンの法則: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$
- ・シリウスBの最初の分光観測:1915年、W.S. AdamsがシリウスBを分離して分光観測に成功
- ・スペクトル型はA型(当時): シリウスAと同じで 表面温度は極端には変わらない
- ・とすると、1/10000の光度は半径が1/100だ から?



シリウスBの正体

	シリウスA	シリウス
光度[L₀]	25.4	0.056
質量[M₀]	2.02	0.978
表面温度[K]	9,940	25,200
半径[R⊙]	1.7	0.084
スペクトル型	A型主系列星	白色矮星



星の内部構造

- ・恒星の密度・温度分布は内部圧力と自己重 力の釣り合いによって決まる:静水圧平衡 (hydrostatic equilibrium)
- 釣り合いの式: $\frac{dP}{dr} = -G\frac{M(r)\rho}{r^2}$
- ・外向き圧力勾配 vs 内向き重力
- 自分の重さを中心でのエネルギー生成で支 える



18



白色矮星の構造

- 通常の恒星に比べ圧倒的に暗いということは、 中心での核燃焼が極めて弱い(あるいは無い)
- それにも関わらず、約1M
 ●もの質量が支えられ ている
- 自分の重力に対抗している力は何か?



19



量子力学と電子の縮退圧

- 高密度環境で有効になる電子の圧力
- ・電子はフェルミ粒子(Fermion)の一つ
- パウリの排他律(Pauli exclusion principle): 2つ以上のフェルミ粒子は同じ量子状態をとる ことができない(1925年)
- ・複数の電子を狭い場所に閉じ込めようとする と、お互いに反発する(縮退圧: degenerate pressure



W. パウリ、1945年ノーベル物理学賞受賞 credit: Nobel foundation https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/biographical/



白色矮星の構造

- ・通常の恒星でガスの圧力は温度に依っていた(理 想気体だと密度と温度に比例, P∝ρT)
- ・電子の縮退圧は温度に依らず、中心付近の核燃 焼で温度を上げなくても星の重力を支えること ができる($P \propto \rho^{4/3}$ or $\rho^{5/3}$)



白色矮星の限界質量

- 一方で、電子の縮退圧で支えられる質量に限界
 があることが知られている
- ・チャンドラセカールの限界質量(Mch)
- ・化学組成によるが、ヘリウムや炭素・酸素からできた普通の白色矮星はMch=1.4M
 ●が限界
- ・単独の白色矮星はM_{ch}以下で生まれ、そのまま 冷えていく

白色矮星の限界質量

- 一方で、電子の縮退圧で支えられる質量に限界 があることが知られている
- ・チャンドラセカールの限界質量(Mch)
- ・化学組成によるが、ヘリウムや炭素・酸素から できた普通の白色矮星はM_{ch}=1.4M
 ●が限界
- ・単独の白色矮星はMch以下で生まれ、そのまま 冷えていく

S. チャンドラセカール、1983年ノーベル物理学賞受賞 credit: Nobel foundation https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1983/chandrasekhar/facts/

白色矮星の限界質量

- 一方で、電子の縮退圧で支えられる質量に限界
 があることが知られている
- ・チャンドラセカールの限界質量(Mch)
- ・化学組成によるが、ヘリウムや炭素・酸素からできた普通の白色矮星はMch=1.4M●が限界
- ・単独の白色矮星はM_{ch}以下で生まれ、そのまま 冷えていく

la型超新星(核燃焼型超新星)

- ・連星系を成している白色矮星が相手の星か ら質量を受け取り、チャンドラセカール限 界質量を超えると爆発する
- ・白色矮星を構成する炭素や酸素の核燃焼が 点火し、暴走的に核燃焼が進む
- ・具体的にどのような進化過程を経て爆発に 至るのかはまだ未解明な部分が多い

la型超新星を説明する2つのシナリオ credit: NASA/CXC/SAO and GSFC/D. Berry https://aasnova.org/2018/10/24/ speeding-white-dwarfs-may-point-to-past-explosions/

la型超新星(核燃焼型超新星)

- ・連星系を成している白色矮星が相手の星か ら質量を受け取り、チャンドラセカール限 界質量を超えると爆発する
- ・
 ・
 白色矮星を
 構成する
 炭素や
 酸素の
 核燃焼が
 点火し、暴走的に核燃焼が進む
- ・具体的にどのような進化過程を経て爆発に 至るのかはまだ未解明な部分が多い

NGC4526で発生したIa型超新星 SN1994D credit: High-Z Supernova Search Team/HST/NASA https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/t/Type+la+Supernova

la型超新星(核燃焼型超新星)

- ・重力崩壊型超新星と同じように、56Niの放 射性崩壊をエネルギー源として、可視光で 輝く
- ・チャンドラセカール限界質量の白色矮星の 爆発であるため、どの超新星もほぼ同じ状 態の白色矮星の爆発だと考えられる
- ・光度曲線の形から最大光度を補正し、標準 光源として用いられる

S. Perlmutter (2012), Nobel lecture **REVIEWS OF MODERN PHYSICS 84**

白色矮星とは

- ・半径 1000kmに0.1-1.4M●の質量が詰め込ま れた天体
- 内部で通常の恒星のような核融合を行なってお らず、電子の縮退圧(量子力学的な反発力)で重 力に対抗し、星として存在している

第11回: 白色矮星、中性子星、 ブラックホール

- ・
 ・
 白色矮星とは何か
- ・
 ・
 中性子星とは何か
- ブラックホールとは何か

- ・白色矮星は高密度だが、電子の縮退圧が 星を支えることで存在していた
- ・縮退圧でも限界はある(チャンドラセカー ル限界質量). では、別の圧力があればも っとコンパクトな星が存在できる?
- ・核子同士に働く核力(nuclear force): 原子核を結びつける力だが、あまりに核 子同士を近づける(10-15m以下)と反発す 3

- ・白色矮星は高密度だが、電子の縮退圧が 星を支えることで存在していた
- ・縮退圧でも限界はある(チャンドラセカー ル限界質量). では、別の圧力があればも っとコンパクトな星が存在できる?
- ・核子同士に働く核力(nuclear force): 原子核を結びつける力だが、あまりに核 子同士を近づける(10-15m以下)と反発す る

典型的に 10-14m

31

- ・白色矮星は高密度だが、電子の縮退圧が 星を支えることで存在していた
- ・縮退圧でも限界はある(チャンドラセカー ル限界質量). では、別の圧力があればも っとコンパクトな星が存在できる?
- ・核子同士に働く核力(nuclear force): 原子核を結びつける力だが、あまりに核 子同士を近づける(10-15m以下)と反発す る

核力の解明には湯川秀樹(1907-1981:1949年ノーベル 賞受賞)のπ中間子理論(1935)が大きな役割を果たした

Hideki Yukawa – Facts. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2021. Sat. 17 Apr 2021. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1949/yukawa/facts/ 32

- W. Baade, F. Zwicky (1934): 重力崩壊 型超新星によって崩壊した鉄コアの最終 状態として、中性子の圧力で支えられる 星(中性子星: neutron star)ができるの ではないか?
- ・中性子発見から間もない頃
- ・当時は仮説だった
- そんなものはあるのか?

COSMIC RAYS FROM SUPER-NOVAE

By W. BAADE AND F. ZWICKY

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON AND CALI-FORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, PASADENA

Communicated March 19, 1934

A. Introduction.—Two important facts support the view that cosmic rays are of extragalactic origin, if, for the moment, we disregard the possibility that the earth may possess a very high and self-renewing electrostatic potential with respect to interstellar space.

(1) The intensity of cosmic rays is practically independent of time. This fact indicates that the origin of these rays can be sought neither in the sun nor in any of the objects of our own Milky Way.

(2) The decrease in intensity of cosmic rays in equatorial regions has successfully been explained by assuming that at least a part of the rays consists of very energetic, positively or negatively charged particles.

Vol. 20, 1934 ASTRONOMY: BAADE AND ZWICKY

advanced in this article must be postponed because of lack of space. We wish to say only

(1) So far we cannot offer any satisfactory explanation of the eastwest effect.

(2) It remains to be explained why the dust and gas clouds which lie along the principal plane of our own galaxy do not appreciably absorb the cosmic rays.⁵ This point, however, needs further observational testing.

In addition, the new problem of developing a more detailed picture of the happenings in a super-nova now confronts us. With all reserve we advance the view that a super-nova represents the transition of an ordinary star into a *neutron star*, consisting mainly of neutrons. Such a star may possess a very small radius and an extremely high density. As neutrons can be packed much more closely than ordinary nuclei and electrons, the "gravitational packing" energy in a cold neutron star may become very large, and, under certain circumstances, may far exceed the ordinary nuclear packing fractions. A neutron star would therefore represent the most stable configuration of matter as such. The consequences of this hypothesis will be developed in another place, where also will be mentioned some observations that tend to support the idea of stellar bodies made up mainly of neutrons.

Baade and Zwicky (1934) PNAS 20, 254 and 259 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1934PNAS...20..254B/

263

- 1967年、A. Hewish, J. Bellによる電波サー ベイ観測(星間シンチレーション)
- ・規則的に繰り返す奇妙な電波パルスを発見す る (PSR B1919+21)
- ・周期は約1.34秒、あまりに規則的なので、地 球外生命からの信号ではないかという説もあ った
- ・実態はパルサーと呼ばれる中性子星の一種

Antony Hewish (1974にノーベル賞受賞) credit: Nobel foundation https://www.nobelprize.org/prizes/physics/ 1974/hewish/biographical/

パルサーの発見とJocelyn Bell credit: Cavendish Laboratory

- 1967年、A. Hewish, J. Bellによる電波サー ベイ観測(星間シンチレーション)
- ・規則的に繰り返す奇妙な電波パルスを発見す る (PSR B1919+21)
- ・周期は約1.34秒、あまりに規則的なので、地
 球外生命からの信号ではないかという説もあ った
- ・実態はパルサーと呼ばれる中性子星の一種

電波の強さ

credit: ESO https://www.eso.org/public/images/eso9948i/

中性子星とは

- ・半径約10kmに1-2M
 ●程度の質量が詰め込 まれた天体
- ・通常の星のように核融合は行なっておらず、 中性子の核力(反発力)で重力に対抗し、星と して存在している
- ・速い自転: 10-3-数10 [s]
- 強力な磁場: 10⁷-10¹¹[T] (巨大な磁石) ulletc.f.) 地磁気 = 30-50[µT] MRI = 1.0-1.5[T]

中性子星とは

- ・半径約10kmに1-2M

 ●程度の質量が詰め込まれた天体
- ・通常の星のように核融合は行なっておらず、 中性子の核力(反発力)で重力に対抗し、星と して存在している
- ・速い自転: 10-3-数10 [s]
- ・強力な磁場: 10⁷-10¹¹[T] (巨大な磁石) c.f.) 地磁気 = 30-50[µT] MRI = 1.0-1.5[T]

中性子星の質量分布

37

中性子星と超新星

- ・中性子星は主に大質量星が重力崩壊する時に できる(**重力崩壊型超新星**)
- ・鉄コアが**原始中性子星**になり、その外側は超 新星爆発で吹き飛ぶ
- 超新星残骸の中に中性子星が発見される例:かに星雲(SN 1054)とかにパルサー(中性子星)
- SN 1987Aでは、まだ中性子星が見つからない

中性子星と超新星

- ・中性子星は主に大質量星が重力崩壊する時に できる(重力崩壊型超新星)
- ・鉄コアが**原始中性子星**になり、その外側は超 新星爆発で吹き飛ぶ
- ・超新星残骸の中に中性子星が発見される例: か に星雲(SN 1054)とかにパルサー(中性子星)
- SN 1987Aでは、まだ中性子星が見つからな \bullet し

かに星雲の異なる波長での姿

credit: Chandra Education Data Analysis Software And Activities

電波の強さ

パルサーの光度曲線の例(かにパルサー) credit: ESO

https://www.eso.org/public/images/eso9948i/

第11回: 白色矮星、中性子星、 ブラックホール

- ・
 ・
 白色矮星とは何か
- ・中性子星とは何か
- ブラックホールとは何か

一般相対性理論とブラックホール

- ・中性子星は高密度だが、核子の反発力が星 を支えることで存在していた
- ・3Moくらいが核力で支えられる限界だと思 われている
- それ以上の質量を持ったコンパクトな星は あるのか?
- ・ それ以上は潰れる(例えば10M●が1点に集 中しようとする)と考えられている

低密度・低温 表面 dP半径 r 密度 温度 圧力 (ρ, \mathbf{X}, P) 半径 r に含まれる質量 M(r)

一般相対性理論とブラックホール

- ・中性子星は高密度だが、核子の反発力が星 を支えることで存在していた
- ・3Moくらいが核力で支えられる限界だと思 われている
- それ以上の質量を持ったコンパクトな星は あるのか?
- ・ それ以上は潰れる(例えば10M●が1点に集 中しようとする)と考えられている

低密度・低温 表面 半径 r 密度 温度 圧力 (ρ, \mathbf{X}, P) 半径 r に含まれる質量 M(r) 高密度・高温

一般相対性理論とブラックホール

- ・極限的な重力の下で物体の運動は一般相対性 理論(general relativity)によって記述され る
- ・A. アインシュタイン(1879-1955): 1915-16 年,一般相対性理論に関する論文を発表(ほぼ) 一人で構築された理論)
- ・1916年、K.シュワルツシルトが一般相対論に おける重力の方程式を解き、ブラックホール の存在を予言(シュワルツシルト解)

A. アインシュタイン, 1921年ノーベル物理学賞受賞 credit: ノーベル財団

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/

- ・はくちょう座方向のX線で明るく輝く天体
- ・1962年、R.ジャコーニらのロケット実験: さ そり座 X-1(中性子星のX線源)を発見
- ・1970年、小田稔らによるアメリカのX線天文 衛星Uhuruでの観測: はくちょう座 X-1の発見
- ・X線天体はO型星との連星だと分かった
- ・X線で明るい天体の正体はなにか?

はくちょう座 X-1のX線天文衛星チャンドラによる画像 credit: NASA/CXC/SAO https://chandra.harvard.edu/photo/2009/cygx1/

- ・はくちょう座方向のX線で明るく輝く天体
- ・1962年、R.ジャコーニらのロケット実験: さ そり座 X-1(中性子星のX線源)を発見
- ・1970年、小田稔らによるアメリカのX線天文 衛星Uhuruでの観測: はくちょう座 X-1の発見
- ・X線天体はO型星との連星だと分かった
- X線で明るい天体の正体はなにか?

- ・O型星の可視光観測: ドップラー効果によって、視線方向の速度が測定できる
- ・視線方向速度v_{los}とその変化の周期Pが測定で き、見込み角iを推定
- ・見込み角i(=30度)の補正: $v = \frac{v_{\text{los}}}{\sin i}$
- ・ケプラーの法則から得られる質量と周期,最大 速度,見込み角との関係: $m^3 = v_{max}^3 P_{max}$

 $(M + m)^2$

観測者

- O型星の可視光観測:ドップラー効果によっ て、視線方向の速度が測定できる
- ・視線方向速度vlosとその変化の周期Pが測定で き、見込み角iを推定
- 見込み角i(=30度)の補正: v = ^vlos
- ・ケプラーの法則から得られる質量と周期,最大 m^3 速度,見込み角との関係:

 $(M + m)^2$

- ・これらを全て考慮すると、m~10M_●程度(見込み角やMの不定性がある)
- Cyg X-1本体の観測: とても速いX線変動が観 測され、コンパクトな天体であることが分かる
- ・中性子星よりも大きな質量が狭い領域に詰め
 込まれた天体
- ・(恒星質量)ブラックホール候補天体の第1号

- ・銀河系の中心のブラックホール: Sgr A*
- ・周りを回る恒星やガス雲の軌道から質量 が推定できる
- · 質量約400万太陽質量

チャンドラX線望遠によるSgr A*の観測 credit: NASA/CXC/Caltech/M.Muno et al. https://chandra.harvard.edu/photo/2007/gcle/

- 活動銀河核(active galactic nuclei; **AGN)**: 明るい放射やジェットなどの活 動性を示す銀河の中心領域
- ・銀河の中心部に存在する巨大ブラックホ ールとそこに吸い込まれるガスによって 様々な活動性がみられる
- 明るい電離放射
- ・ジェット

1型セイファート銀河 NGC 4151の可視光画像 credit: Adam Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona https://ja.wikipedia.org/wiki/NGC_4151

- ・電波で極めて明るく輝く電波銀河
- ・中心ブラックホールからのジェットの放 出
- ・ジェットとジェットが銀河を取り巻く物 質に衝突してできる構造(電波ローブ)が 電波で光る

電波銀河M87の電波ジェット credit: F. N. Owen (NRAO) et al., VLA, NRAO, AUI https://apod.nasa.gov/apod/ap990216.html

- ・イベントホライズン望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によるM87 の中心ブラックホールの観測
- ・ブラックホールの「陰」(Blackhole shadow; ブラックホールの重力によって光が曲げられ、暗くなった部分)が観 測された
- ・ブラックホール直接撮像の時代

EHTの望遠鏡ネットワーク credit: NRAO/AUI/NSF, EHT collaboration https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20190410

D観測	
1	

- ・イベントホライズン望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によるM87 の中心ブラックホールの観測
- ・ブラックホールの「陰」(Blackhole shadow; ブラックホールの重力によって光が曲げられ、暗くなった部分)が観 測された
- ・ブラックホール直接撮像の時代

EHTによるM87の中心領域の観測結果 credit: EHT collaboration https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/images.html