

# 星の一生

**Alexandre Costa, Beatriz García,  
Ricardo Moreno, Rosa M Ros**

*International Astronomical Union  
Escola Secundária de Loulé, Portugal*

*ITeDA and Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*

*Colegio Retamar de Madrid, Spain*

*Technical University of Catalonia, Spain*



# 目標

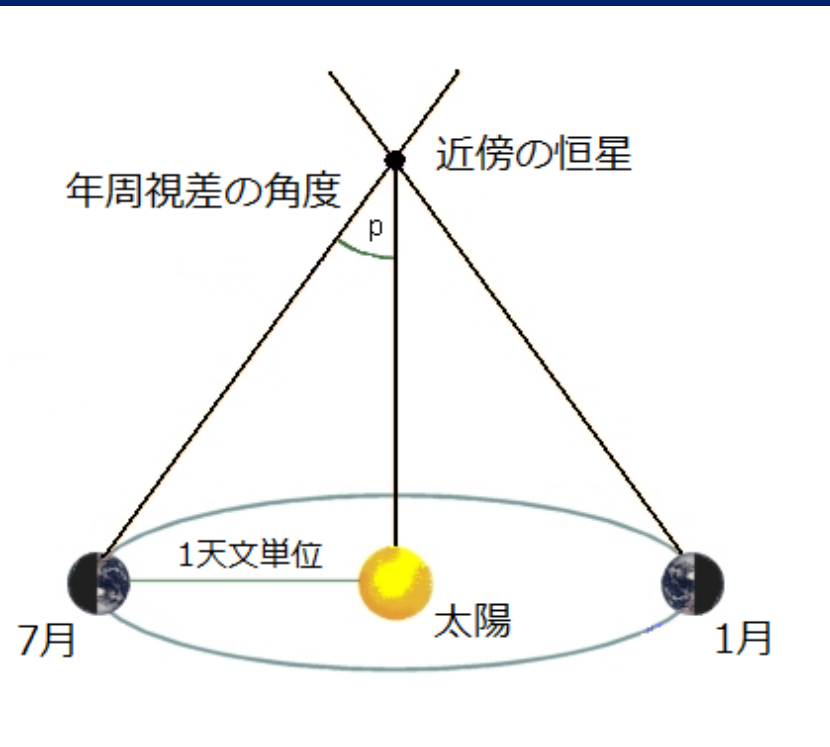
- 見かけの等級と絶対等級の違いを理解する。
- 恒星の色と明るさ（等級）の関係を示したヘルツシュプルング-ラッセル図を理解する。
- 超新星、中性子星、ブラックホール、パルサーなどの概念を理解する。

# 活動 1 : 視差の実験



- 親指を上に向けて腕を伸ばす。
- そのままの状態、最初は左目だけで次に右目だけで観測しよう。どう見えるか。
- 指を鼻の方へ半分の位置まで近づかせ、同じ観測をしよう。どう見えるか。

# 年周視差

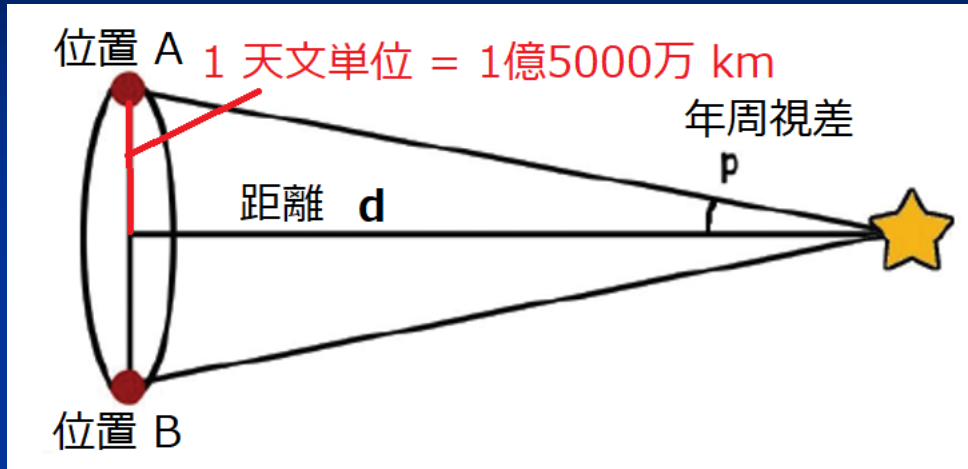


出典：コロンビア大学

- 視差とは、異なる場所から見たときの対象物の見かけの位置の違いである。
- 地球から見る近傍の天体の位置は、今と6カ月後では変化しているように見える。
- それによって、近傍の天体までの距離を測定することができる。



# 年周視差



$$d = \frac{AB/2}{\tan p} = \frac{AB/2}{p \text{ [ラジアン]}}$$

訳注：年周視差  $p$  が 1 秒角 ならば、距離  $d$  はいくらになるか：

$$d \cong \frac{150\,000\,000 \text{ km}}{2\pi / (360^\circ \times 60 \times 60)} = 30\,939\,720\,937\,064 \text{ km} = 3.26 \text{ 光年}$$

— 1 天文単位を km 単位で

— 1 秒角をラジアン単位で

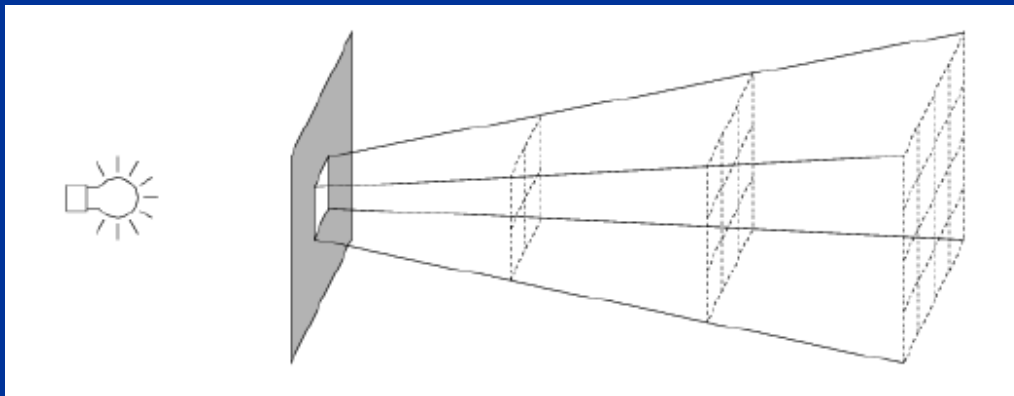
1 パーセク (pc) = 3.26 光年

距離  $d$  [pc] = 1 /  $p$  [秒角]



## 活動 2：逆二乗則

星はすべての方向に光を放っている。  
一般に、距離  $d$  で単位面積で受け取る  
強度  $I$  は、光度  $L$ （放射の強度）を、  
星を中心とする球の表面積で割った値  
である。



$$I = \frac{L}{4\pi d^2}$$

## 活動 2：逆二乗則

距離が2倍になると、対応する領域が4倍になり、照度（単位面積あたりに届く光）は4分の1になる。

照度は、光源からの距離の2乗に反比例する。

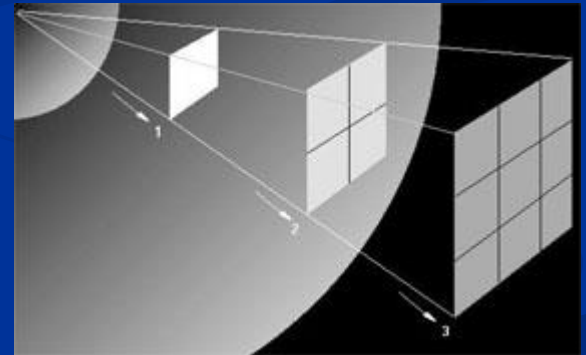


# 等級という表現

星はいろいろな明るさを持つ。  
最も明るい星は、光度が暗くても近いのか、光度が明るくて遠いものか、である。

受け取る明るさである照度  
(ここでは  $B$  で表現する) は、  
次のように定義できる。

$$B = \frac{L}{4\pi d^2}$$





# 等級という表現

ヒッパルコスは、紀元前190年にニカイア（現在トルコのイズニク）で生まれ、ギリシャのロードスで紀元前120年に死亡したと考えられている。

紀元前約125年に、彼は等級の表現法を作り出した。



# 等級という表現

ヒッパルコス是最も明るい星を1等星、少し暗い星を2等星と名付けていき、最も暗い星を6等星とした。

その定義は、わずかに変更され、今日でも使用されている。等級値が大きいほど星の明るさが弱いことを意味する。

天文学で等級といえば、星の明るさのことを指している。



# 等級という表現

1850年にロバート・ポグソンは、5等級の差（1等星と6等星の明るさの違い）が明るさの比でだいたい  $100:1$  となっていると示し、ここから、明るさ 100 倍の比を5等級の差と定義した。今日の天文学においても使用されている等級の尺度の定義である。



# ポグソンの法則

この関係は、対数を使って表現すると、わかりやすい：

$$2.5 \log (B_1/B_2) = m_2 - m_1$$

訳注：ここでの log は底が10の常用対数

明るい天体は負の数で表現できる。例えば：

- 最も明るい星であるシリウスは  $-1.5$  等級
- 金星は  $-4$  等級
- 月は  $-13$  等級
- 太陽は  $-26.8$  等級



# 見かけの等級と絶対等級

- 本来明るい<sup>1</sup>が遠い星は、本来暗い<sup>2</sup>が近い星と、見かけの等級  $m$  が同じになることがある。
- そこで、恒星が 10パーセク（32.6 光年）の距離にある時の見かけの明るさである絶対等級  $M$  の概念を導入した。
- 絶対等級を使って、2つの星の「本来の明るさ」、すなわちそれぞれの星の放射エネルギー（光度とも）を比較することができる。
- $m$  と  $M$  の数学的関係は次のとおりである：

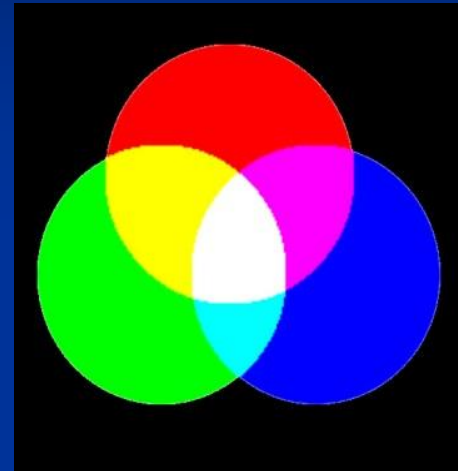
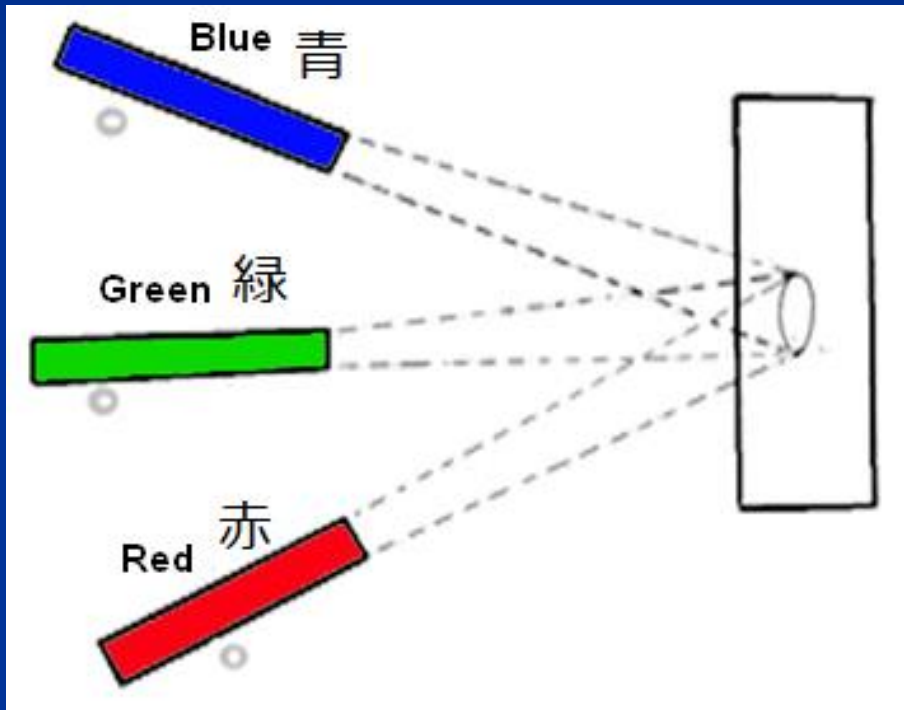
$$M = m + 5 - 5 \log d$$

ここで  $d$  は星までの実際の距離である。

訳注：再び、ここでの対数も底が10の常用対数である。



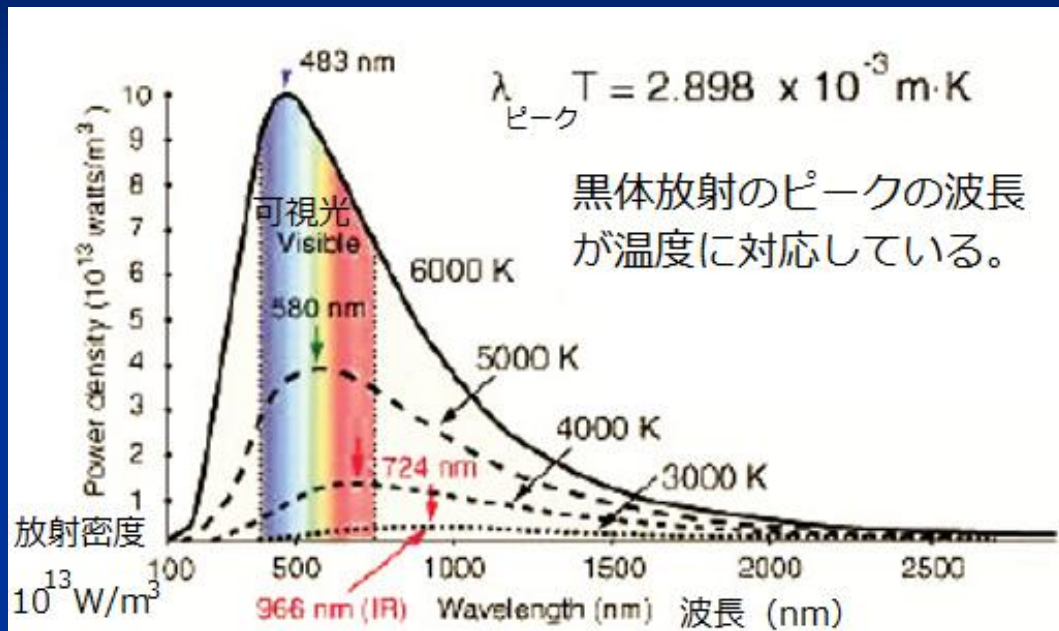
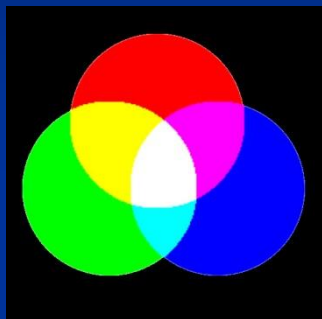
# 活動 3： 恒星の色



# 活動 3: 星の色

星の色は表面温度で決まる。

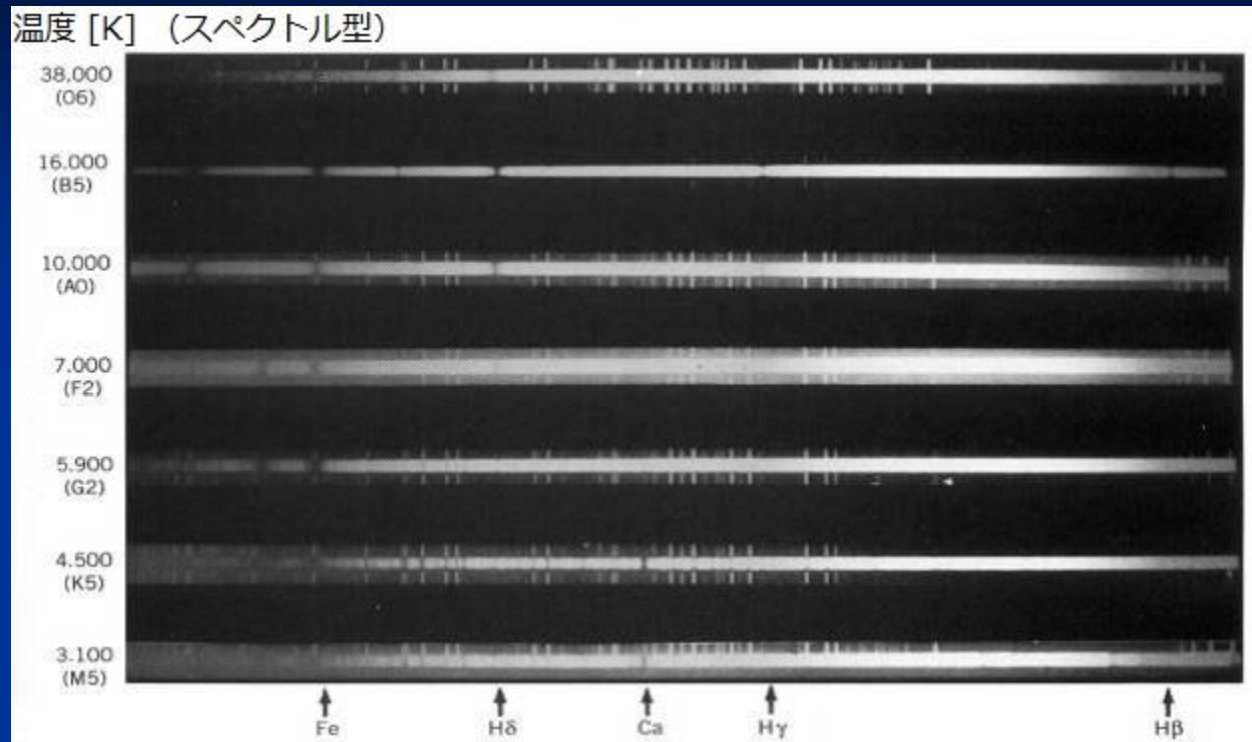
訳注：星の色は白を基調にやや色づきがある程度で、説明図では色が強調されている。



中間的な温度では緑色での放射が最大になるが、その際も赤色光、青色光の放射があり、可視光域全体でならして見ていくと、白色光となる。

緑色の恒星がない理由である。

# スペクトル型



星のスペクトル分類  
温度と色の関係



訳注：星の色は白を基調にやや色づきがある程度で、説明図では色が強調されている。太陽の型であるG型（Class G）は、実際には白色として私たちには見える。



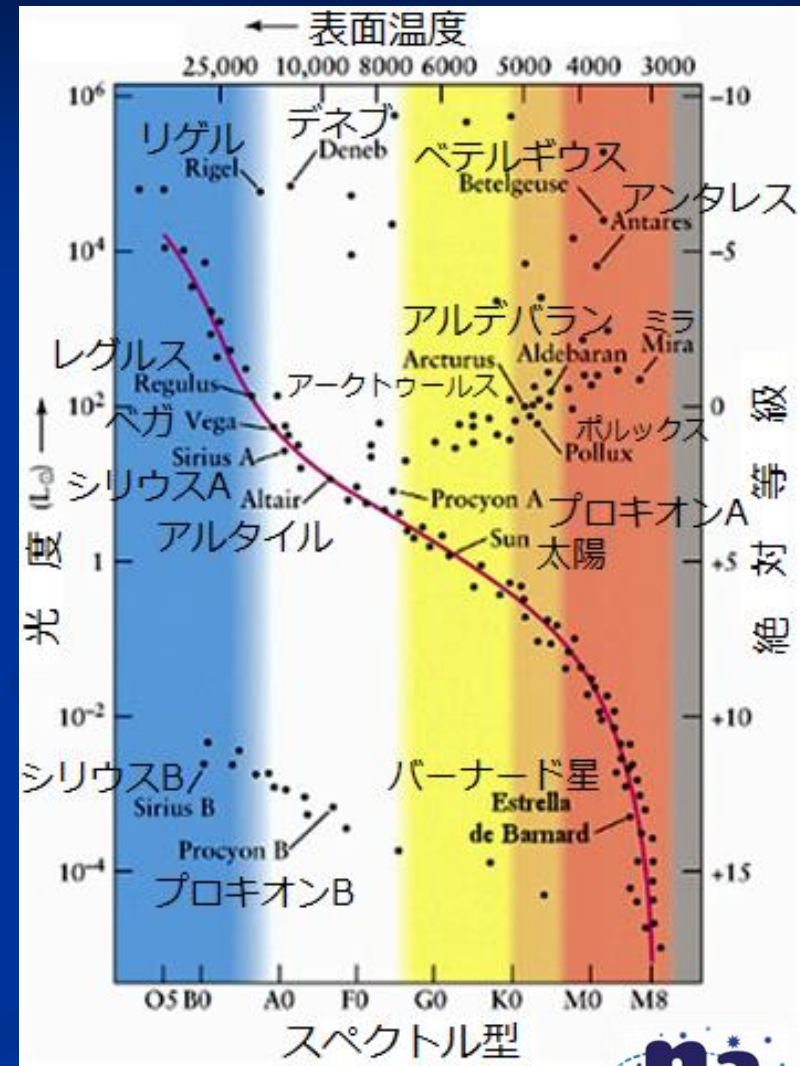


# ヘルツシュプルング - ラッセル図

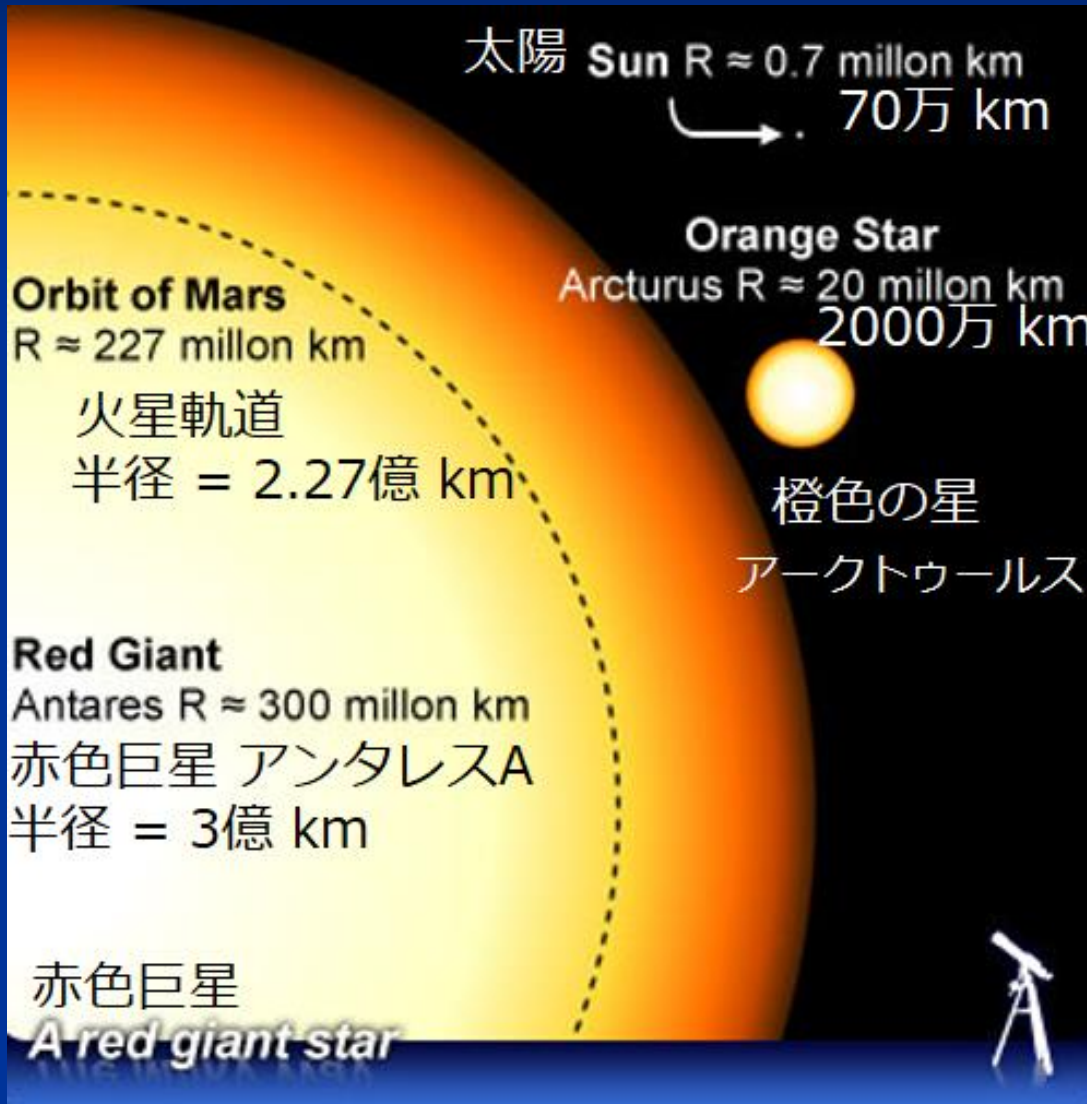
表面温度（またはスペクトル型）と、明るさ（または絶対等級）を軸にとって、星を分類する図。

星は図中の特定の領域に集まって分布する。

図上の位置から、星の種類とその進化の段階を知ることができる。



# 恒星の進化 赤色巨星の形成



質量によって、  
星の進化が異  
なる。

# 恒星の進化 白色矮星の形成



太陽のような小質量または中質量の星は、白色矮星に進化する。  
後で述べる、超新星爆発のような爆発的な最期ではない。



# 惑星状星雲：らせん星雲



中心の天体は、小さい半径の白色矮星であり、核融合によってエネルギーを生み出すことのない死んだ天体である。まだ非常に温度が高いために光っているだけである。

# 惑星状星雲：キヤッツアイ星雲



キヤッツアイ星雲は大変美しい姿の惑星状星雲である。写真はそれぞれ、可視光領域（左、ハッブル宇宙望遠鏡）とX線（右、チャンドラ望遠鏡）撮影によるものである。

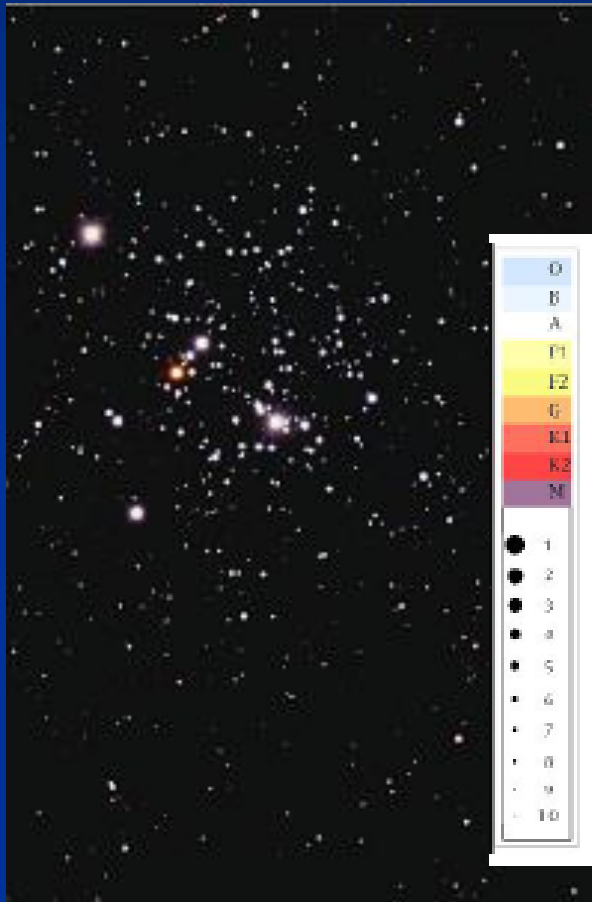
訳注：X線写真は疑似カラー写真であるが、可視光写真といえども、特殊なフィルターを通した写真で、目に見える色とは違っている。一般に、物理的状況を説明するために、天体写真では特殊なカラー処理を行っている例が多い。

## 活動 4：散開星団の年齢

星団の年齢は、その星団のHR図と、  
年齢がわかっている他の星団のHR図  
とを比較して決定できる。



# 活動 4 : 散開星団の年齢

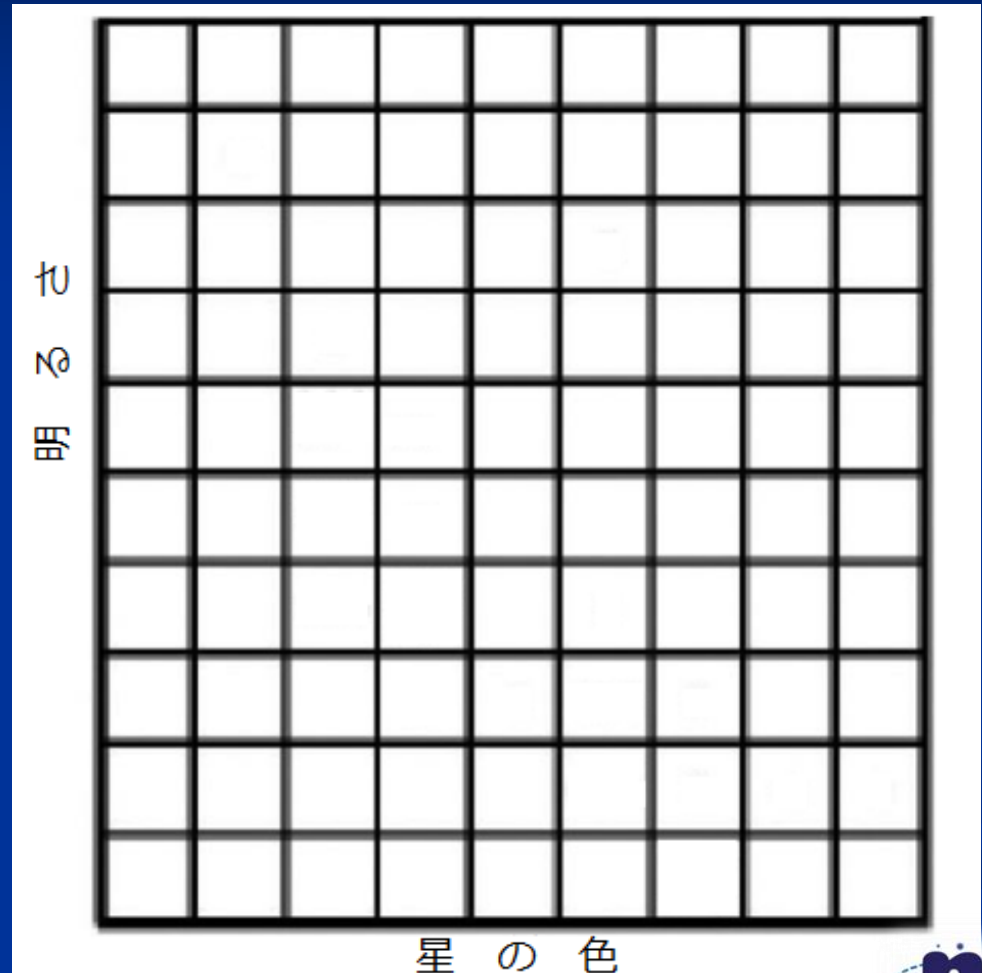


みなみじゅうじ座 カップ星団

- 星団を中心にして一辺 4 cm の正方形を描く。
- ガイドの点の大きさと比較して星の明るさを割り出す。
- 比較用カラーガイドを使用して星の色を割り出す。

# 活動 4 : 散開星団の年齢

- 右の座標に星をプロットする。
- 他の星で同じことを繰り返す。

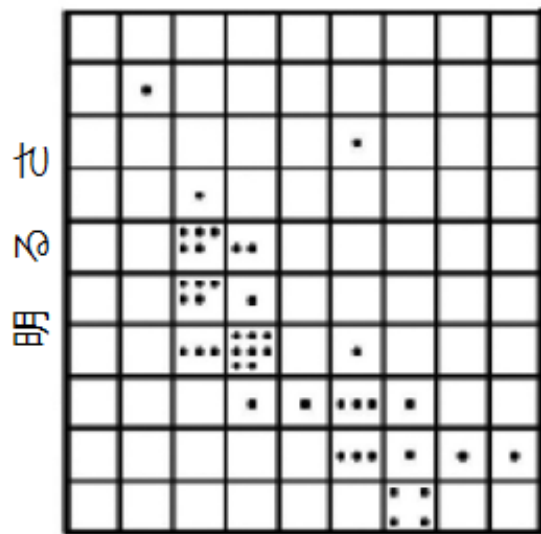




# 活動 4：散開星団の年齢

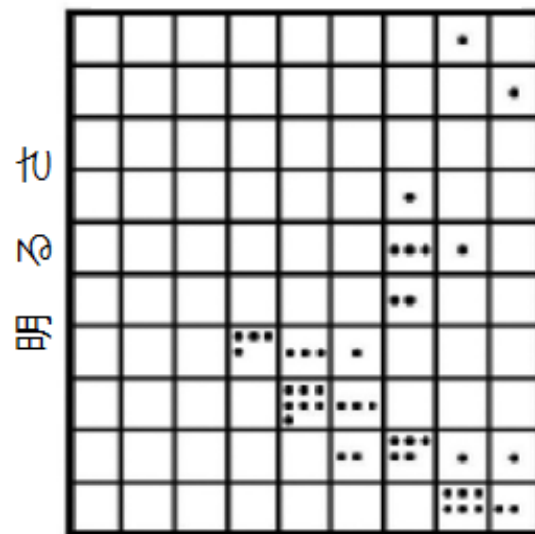
得られた図と下記の図を比較しよう。  
年齢はどうなるだろう。

若い星団 (< 1億年)



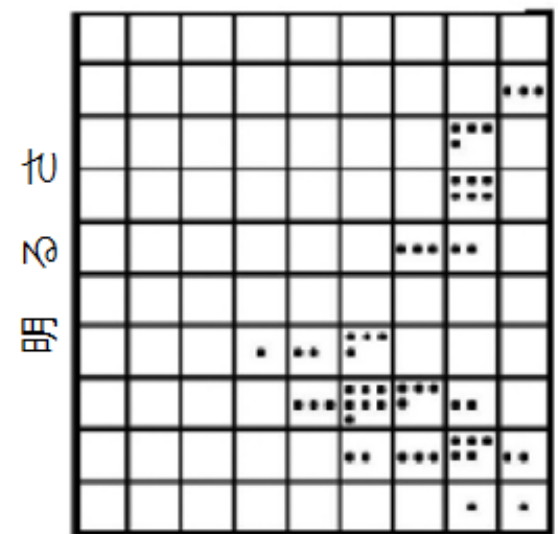
星の色

中くらいの年齢の星団 (1-30億年)



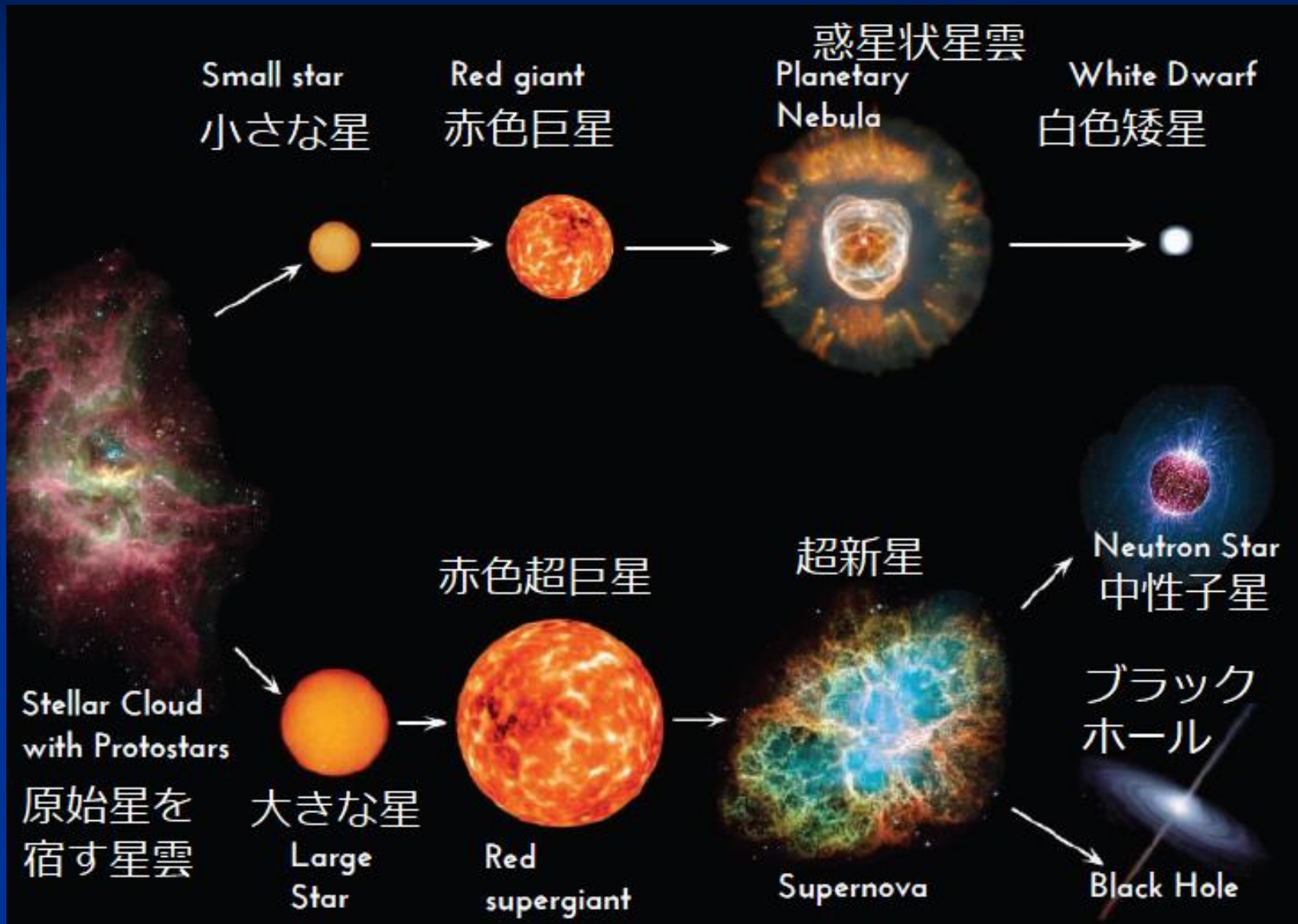
星の色

老いた星団 (> 30億年)

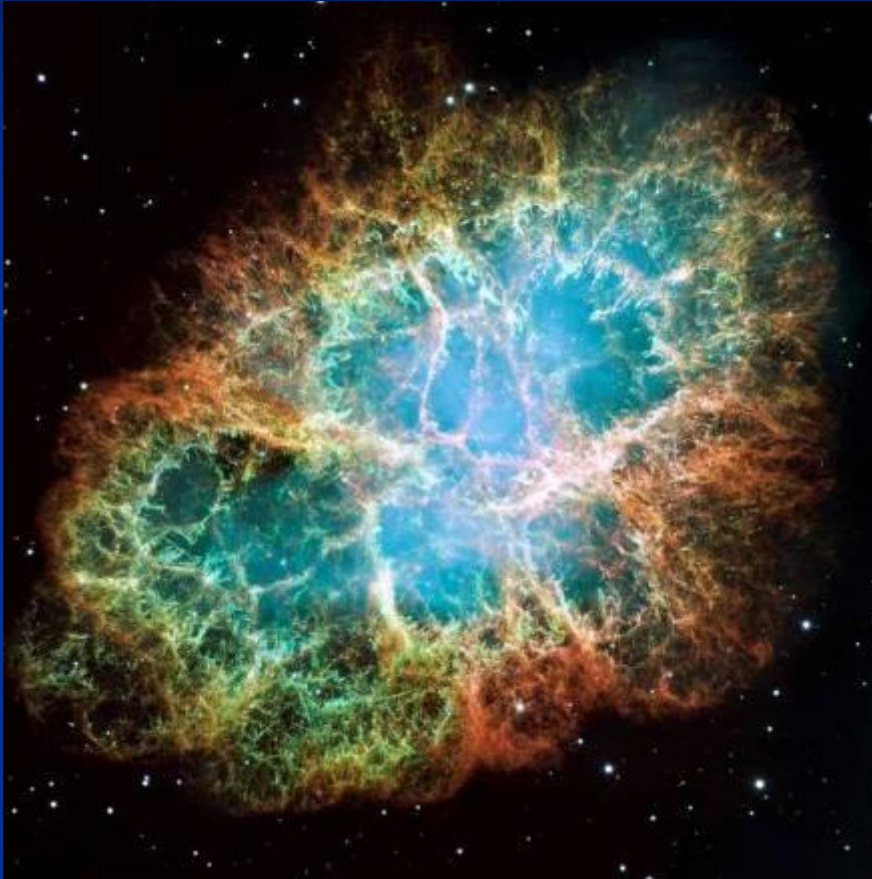


星の色

# 質量と星の死の関係



# 大質量星の死

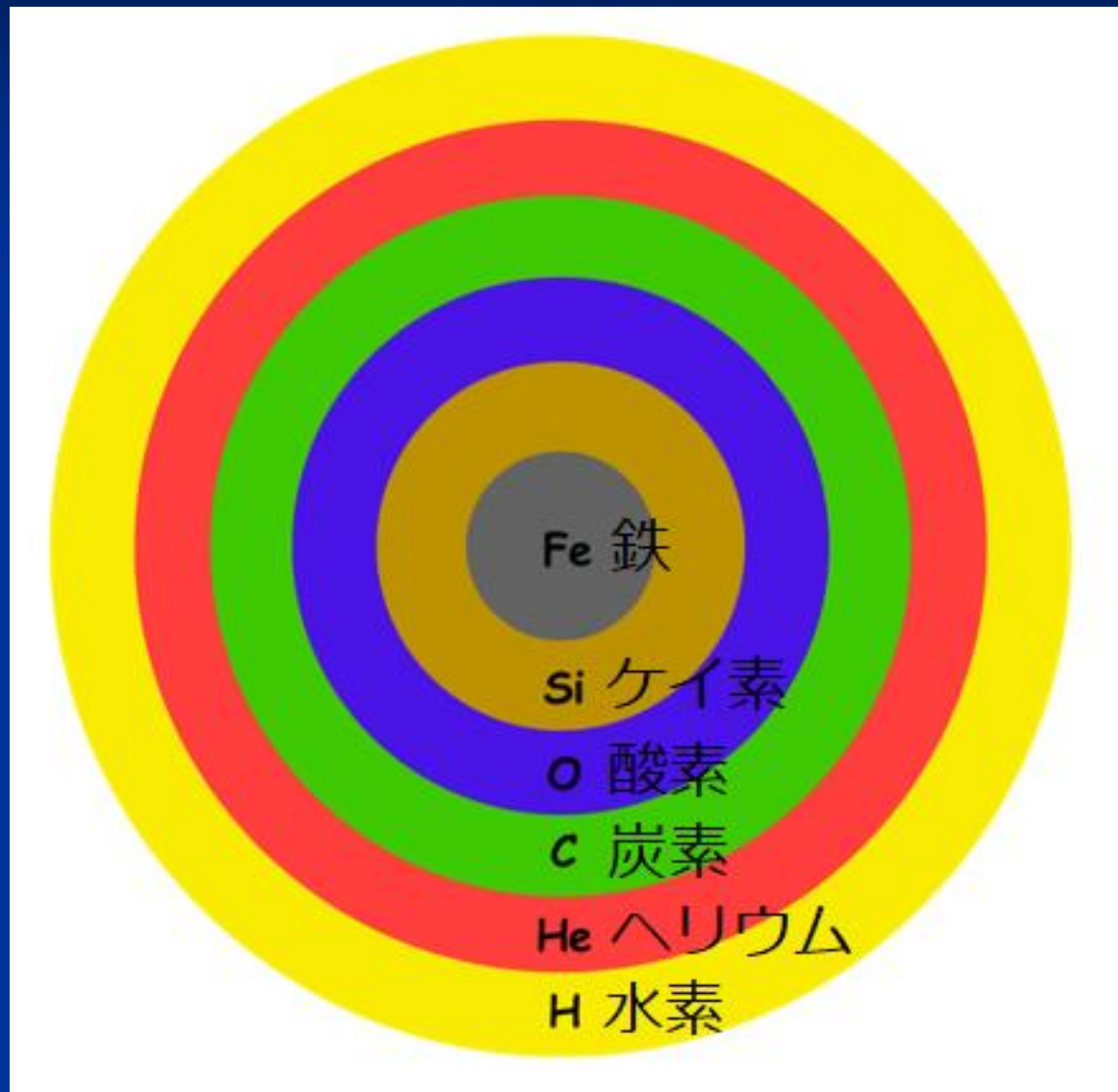


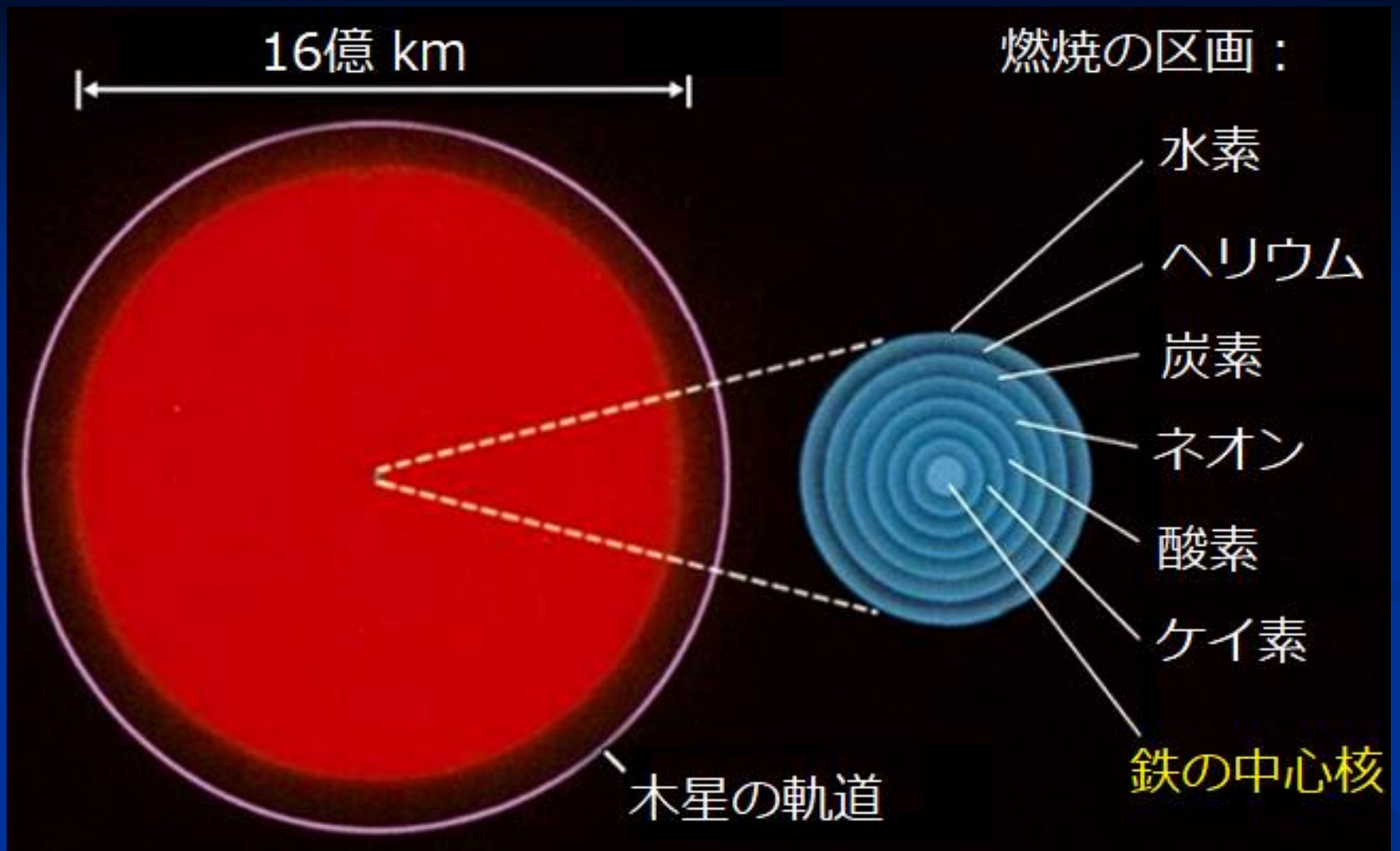
M 1 : おうし座のかに星雲は、  
1054年に観測された超新星  
爆発の残骸である。

訳注 : 1054年のこの超新星を含め、望遠鏡発明前に観測された超新星などの  
天文現象の記録がある藤原定家の日記「明月記」は、日本天文学会  
から日本天文遺産のひとつとして認定された (2019年3月) 。



# 超新星として爆発する寸前の星





超新星として爆発する寸前の星の特徴



# 20太陽質量の星の各段階での経過時間

- 中心核で水素を燃焼させる1000万年（主系列）
- 100万年のヘリウム燃焼
- 300年の炭素燃焼
- 200日間の酸素燃焼
- 2日間のケイ素燃焼：超新星の爆発が差し迫っている。



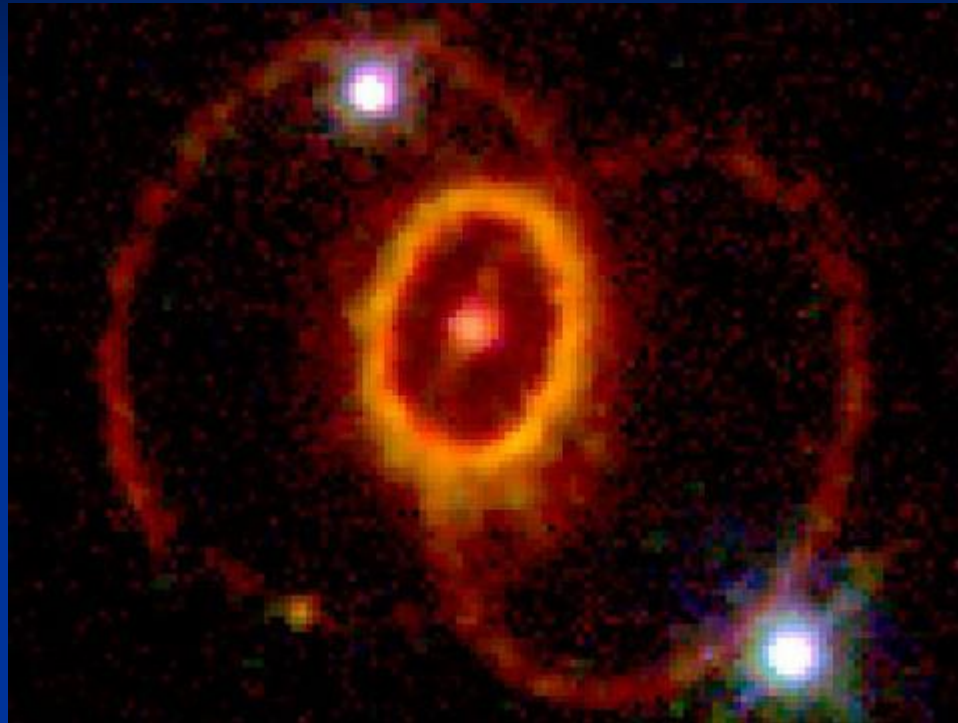
# 超新星 1987A



超新星1987A は1987年に大マゼラン雲で発見された。大マゼラン雲は16万8000光年のところにある（光が地球に到達するために16万8000年かかった）。



# 超新星 1987A の 10年後



爆発後、放出された物質は、高速で星から遠ざかる。

超新星1987A (SN1987A) のこの写真は、1997年にハッブル宇宙望遠鏡によって撮影された。







遠くの銀河における超新星の例。各銀河で、平均して100年に1つの超新星が出現する。

天の川銀河（銀河系）では、この400年間、超新星は見つかっていない。



# 活動 5：超新星爆発の実験

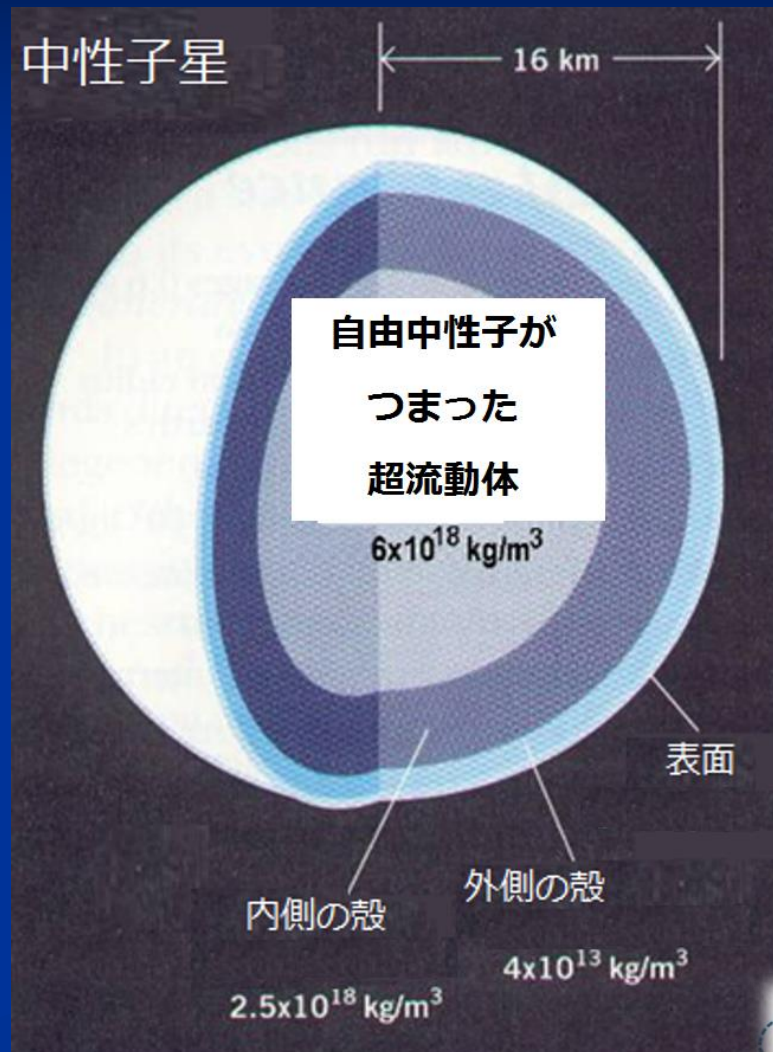
星が超新星として爆発するとき、層が次々と、内側へ落ちていこうとする。中心には硬い芯ができています。その芯に跳ね返されて、外側の層が次々に跳ね返されていく。



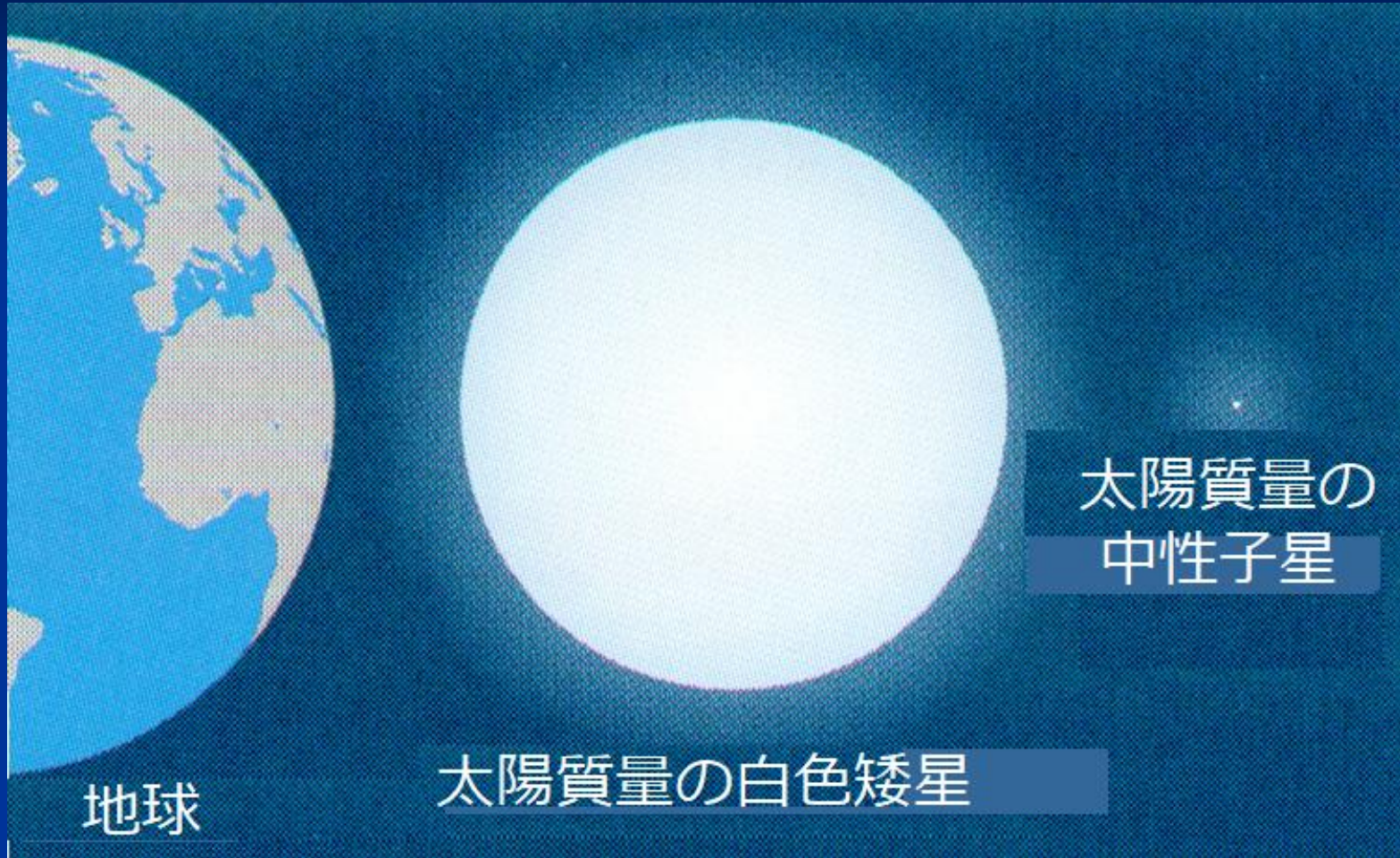
このモデルでは、床は中性子星の硬い芯を表し、バスケットボールは跳ね返される重い原子の層を、それによってさらに跳ね返されるテニスボールは外側の軽い原子の層を表す。

# 中性子星

恒星の死の別の形態として、中性子星やパルサーがある。

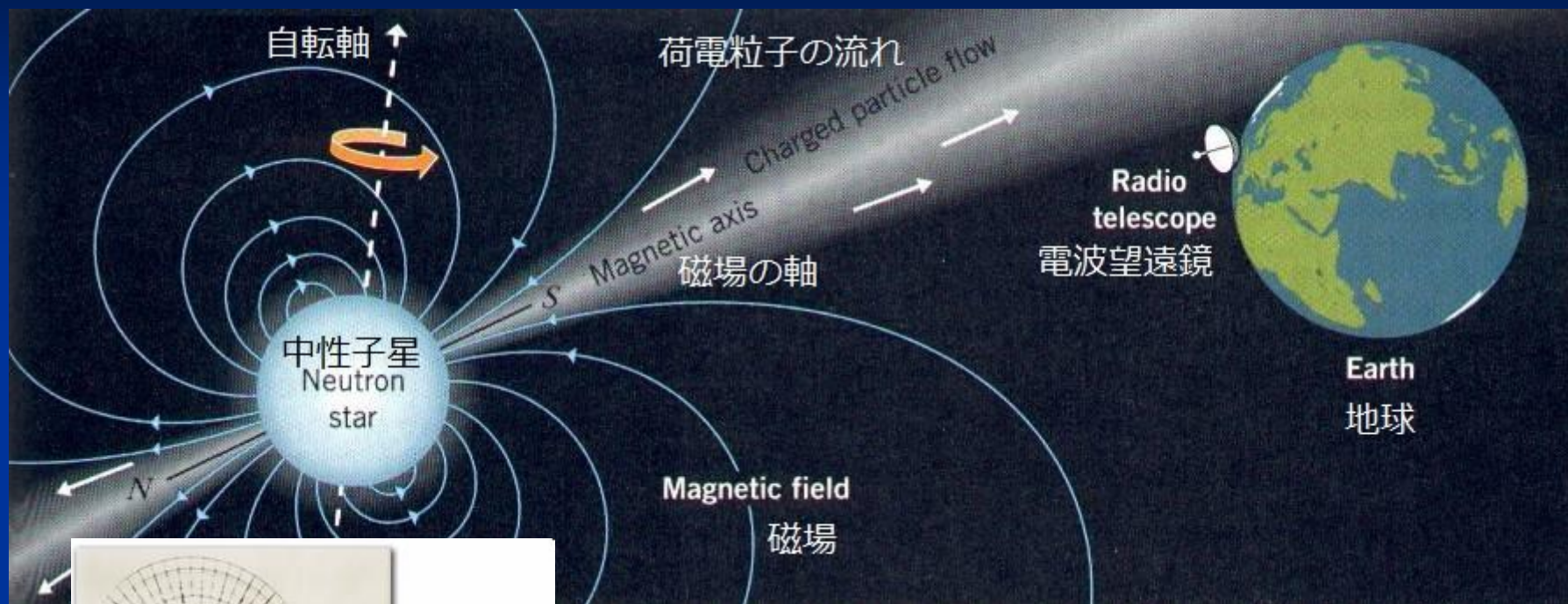


# 中性子星



サイズの比較

# パルサー



パルサーによって放出された放射が地球からどのように見えるか。

ジョスリン・ベル、パルサーの発見者。



# 活動 6：パルサーの実験

パルサーは中性子星で非常に質量が大きく高速で回転している。ビーム状に放射を放っているが、放射源は回転軸と完全には一致していないので、自転によって放射は灯台のように回転して見える。

それが地球の方に向いている時は、毎秒数回の周期で変動する放射が見える。



取り付け

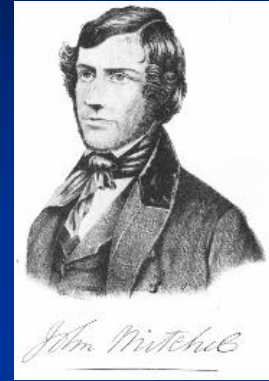


旋回



# 星の死の第3形態：ブラックホール

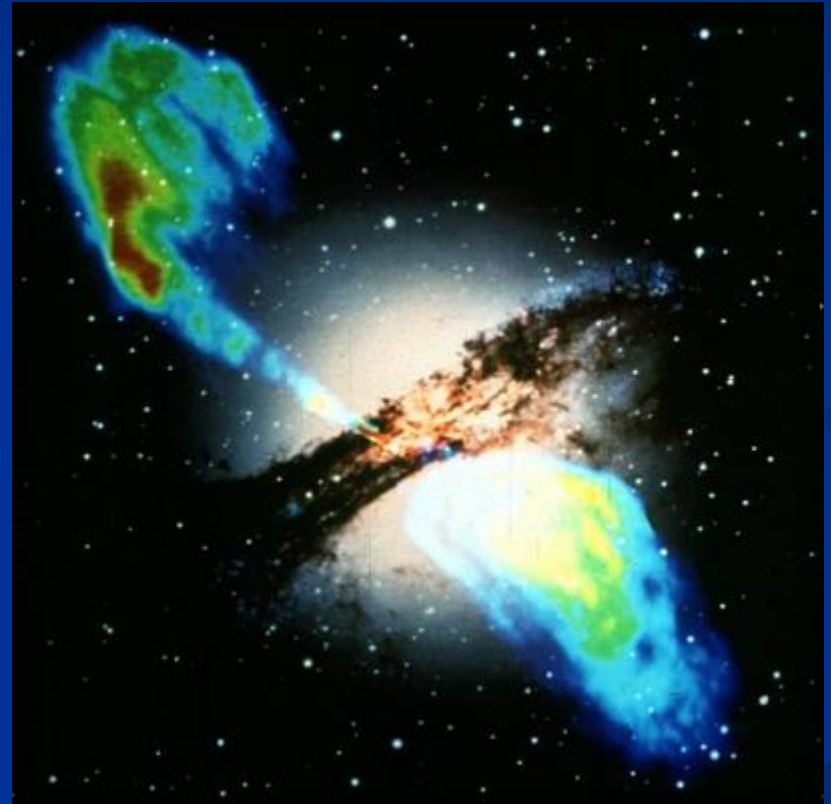
18世紀末、ジョン・ミッチェル  
（英）やサイモン・ラプラス（仏）  
は、脱出速度が光速度を越える天体  
の存在について考えた。



20世紀に入り、アインシュタインの  
一般相対性理論のもと、星が無限小  
に重力崩壊で収縮することで、光さ  
え脱出できない天体となることにつ  
いて議論が進んだ。



# 星の進化：ブラックホール



銀河の中心には、超大質量ブラックホールが存在する



# 活動 7：空間の曲率と ブラックホールの実験

弾性布（ライクラ）、  
ポリウレタンと水球  
を使用して、ブラッ  
クホールによって曲  
がる空間を模してみ  
ることができる。



テニスボールの軌道は直線ではなく  
曲線となる。

# 活動 7：空間の曲率と ブラックホールの実験

薬局で販売されている弾性ネットも使用できる。

弾性ネットを緩めると窪みが大きくなり、ブラックホールを模倣することができる。



ありがとうございました