

宇宙科学I (文科生)

星

土井靖生

2019/10/11

今回のポイント

- 星の“見かけの明るさ”は「等級」により表す
 - 1等星は6等星の100倍の明るさ
- 星までの距離は「年周視差」により測る
 - 単位は“パーセク”(pc)
 - 近くの星は遠くの星より明るく見える
 - 星までの距離を測定して“本当の明るさ”を知る
- 星の“本当の明るさ”は星の重さにより決まる
 - 重い星ほど中心部が高温・高圧
 - 核融合が活発に進みエネルギーをより多く発生
 - 重い星ほど高温・大きい・明るい
 - 重い星ほど短命
- つまり、星の一生は“星の重さ”で決まる

星の明るさ

ヒッパルコスによる定義

- Hipparchus(*Ἰππάρχος*; 紀元前190年ごろ - 紀元前120年ごろ): 古代ギリシャの天文学者
- 恒星を見かけの明るさに応じ1等星から6等星までの6段階に分類。
 - 1等星: 夜空で最も明るい星々
 - 6等星: 肉眼で見える最も暗い星々



Wikimedia Commons

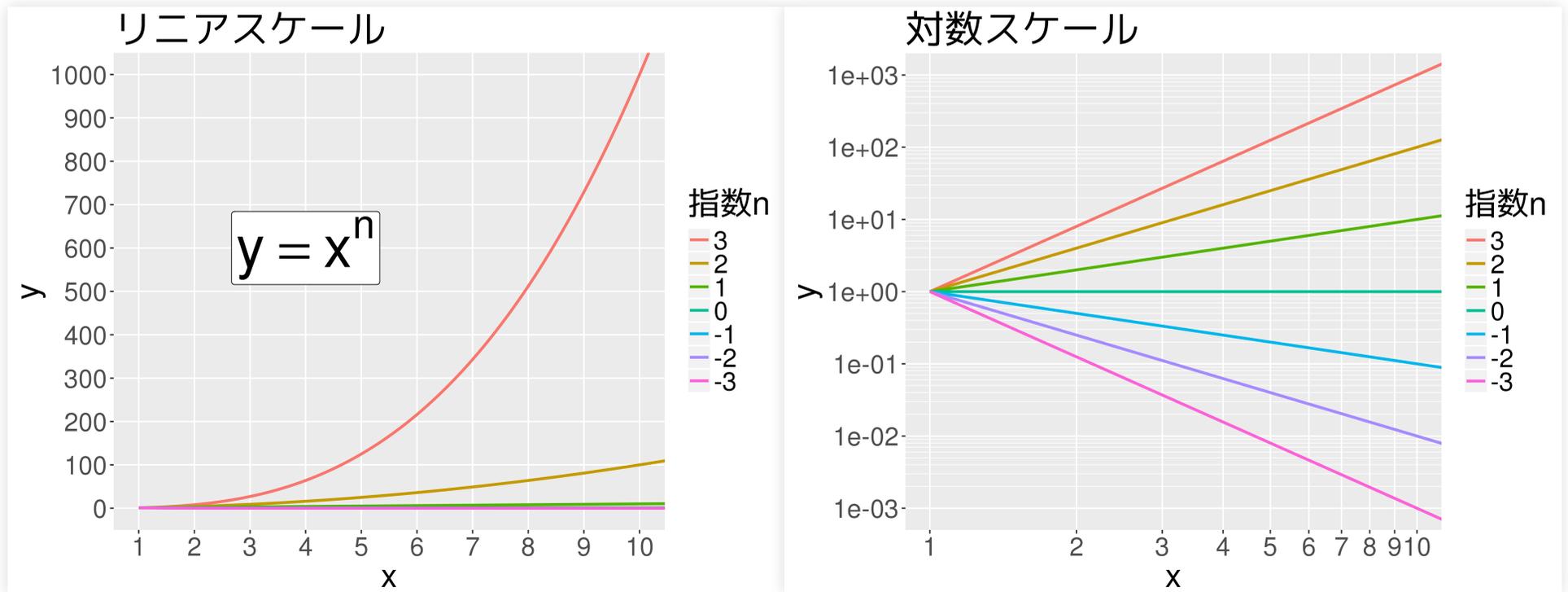
現代の定義：等級 (stellar magnitudes)

- ヒッパルコスの定義をほぼそのまま受け継ぐ
- 1等星は6等星の100倍明るいとする
- 1等級異なる毎に明るさは $\sqrt[5]{100} = 2.51$ 倍ずつ異なる

天体	等級	明るさの比
太陽	-26.7	1.20e+13
金星の最大の明るさ	-4.7	1.91e+4
シリウス	-1.46	964
アンドロメダ銀河	3.4	11.0
肉眼で見える最も暗い恒星	6	1.00
すばる望遠鏡で観測出来る最も暗い天体	29	6.31e-10

マグニチュード(等級)

- 地震のマグニチュードと語義は同じ
- 「対数スケール」である点に注意
- 人間の感覚に近いスケール
 - ホン(音圧)も対数スケール



星の(見かけの)
明るさを決める要因I
星までの距離

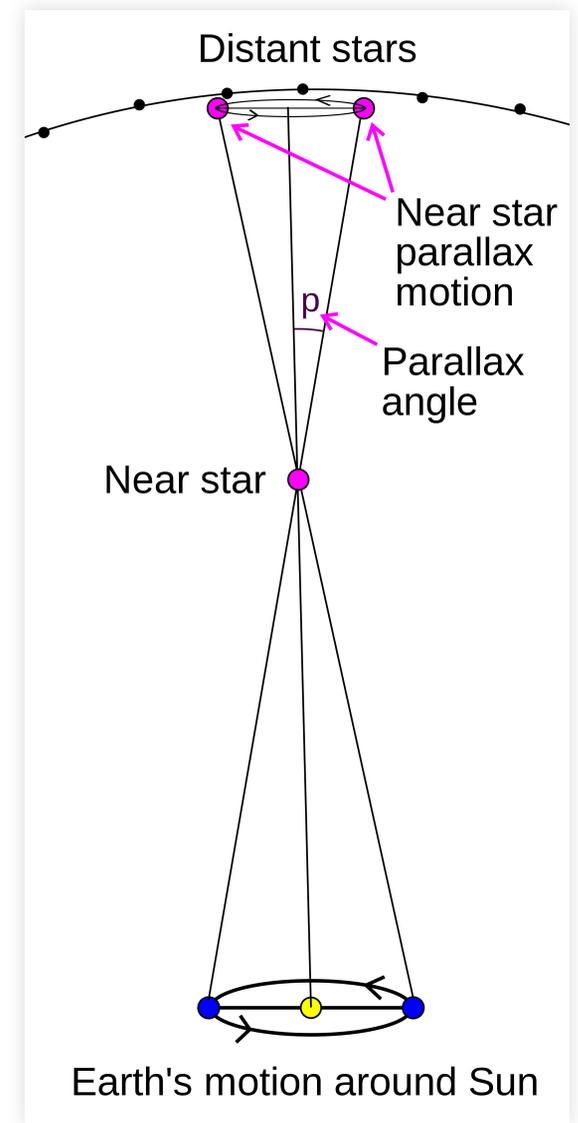
星までの距離の測り方

天文学は究極のリモートセンシング(“絶対に”行けない場所の研究)→まずは対象までの距離を知る必要

- 月や惑星についてはレーザー測距
- 太陽までの距離：ケプラーの法則
- 星までの距離：地球-太陽間を用いた三角測量
- より遠くの距離測定(銀河など)については銀河の回で解説します

地球の公転を用いた三角測量

- 地球の公転に応じ、星の見える位置が変化
 - 年周視差(annual parallax)
- 遠くの星はほとんど動かない
- 近くの星は背景の星に対して変化
- 変化する角度の大きさが距離に対応
- 年周視差 = 1秒角となる距離を「1パーセク」(1 parsec)と定義する
 - 1分角(arc-minute) = $1/60$ 度
 - 1秒角(arc-second) = $1/60$ 分



パーセクと距離の対応

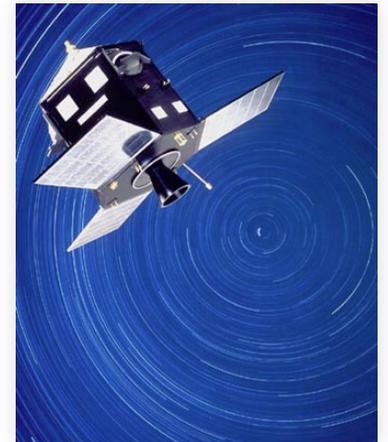
- 1パーセク = 3.26光年 \leftrightarrow 年周視差1秒角
- 10パーセク = 32.6光年 \leftrightarrow 年周視差0.1秒角
- 100パーセク = 326光年 \leftrightarrow 年周視差0.01秒角



- 遠くの星ほど距離測定の為には精密な角度の測定が必要
 - *cf.* 視力1.0 \leftrightarrow 空間分解能1.0分角

高精度年周視差観測衛星

- Hipparcos 衛星 (High Precision PARallax COllecting Satellite)
- 欧州宇宙機関 (ESA) により1989年に打ち上げ
→ 1993年に運用終了
- ミッション総額 €600 million
- 地球大気の影響を避け、高精度の星位置測定・カタログ作成を行う
 - 2,539,913個の星の位置カタログを2000年に公表



ESA

Hipparcos 衛星による年周視差の観測



シリウス(Sirius, 2.6pc)



γ Dra (45.2pc)



アルクトゥルス(Arcturus, 11.3pc)

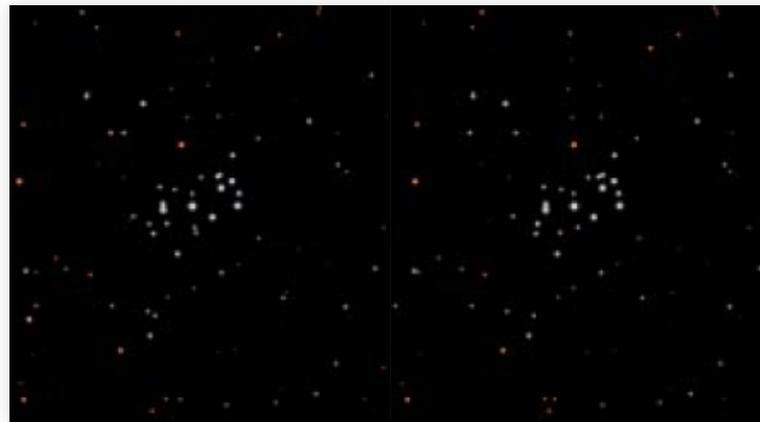


β Hya (112pc)

星団の観測



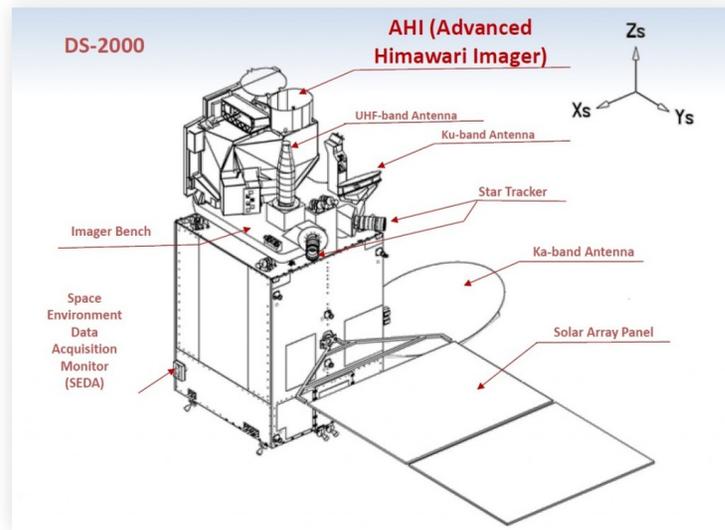
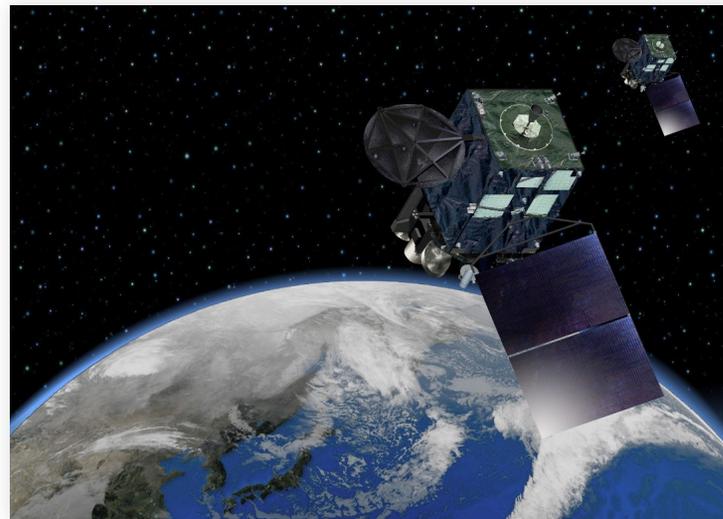
ヒアデス星団(Hyades, 45pc)



プレアデス星団 (Pleiades, 112pc)

星カタログの意義1

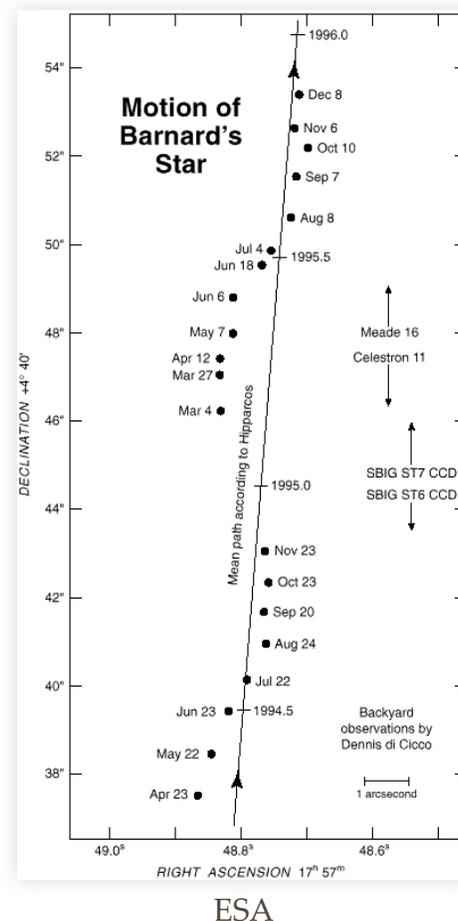
- 星の位置のリスト
 - 宇宙航行←星の位置から自分の位置・姿勢を知る
- 例：ひまわり8号
 - AHI 画像解像度 0.5km ~ 2km
 - 高度36,000kmでの姿勢精度 2.9 ~ 11秒角



ひまわり8号(気象庁)

星カタログの意義2

- 星までの距離のリスト
 - 星の本当の明るさ、放出している本当のエネルギーを知る
- 星の3次元空間分布
 - 銀河系の構造の推定 (ただし Hipparcos ではまだ不十分)
- 星の「固有運動」により作成後時間が経つにつれて精度が悪化することに注意
- GAIA 2018年4月25日データリリース
- 日本でもJASMINE計画が進行中
 - 明るい星の高精度の位置決定
 - ダストに隠された星を近赤外線で観測



GAIAにより観測された全天の星の分布

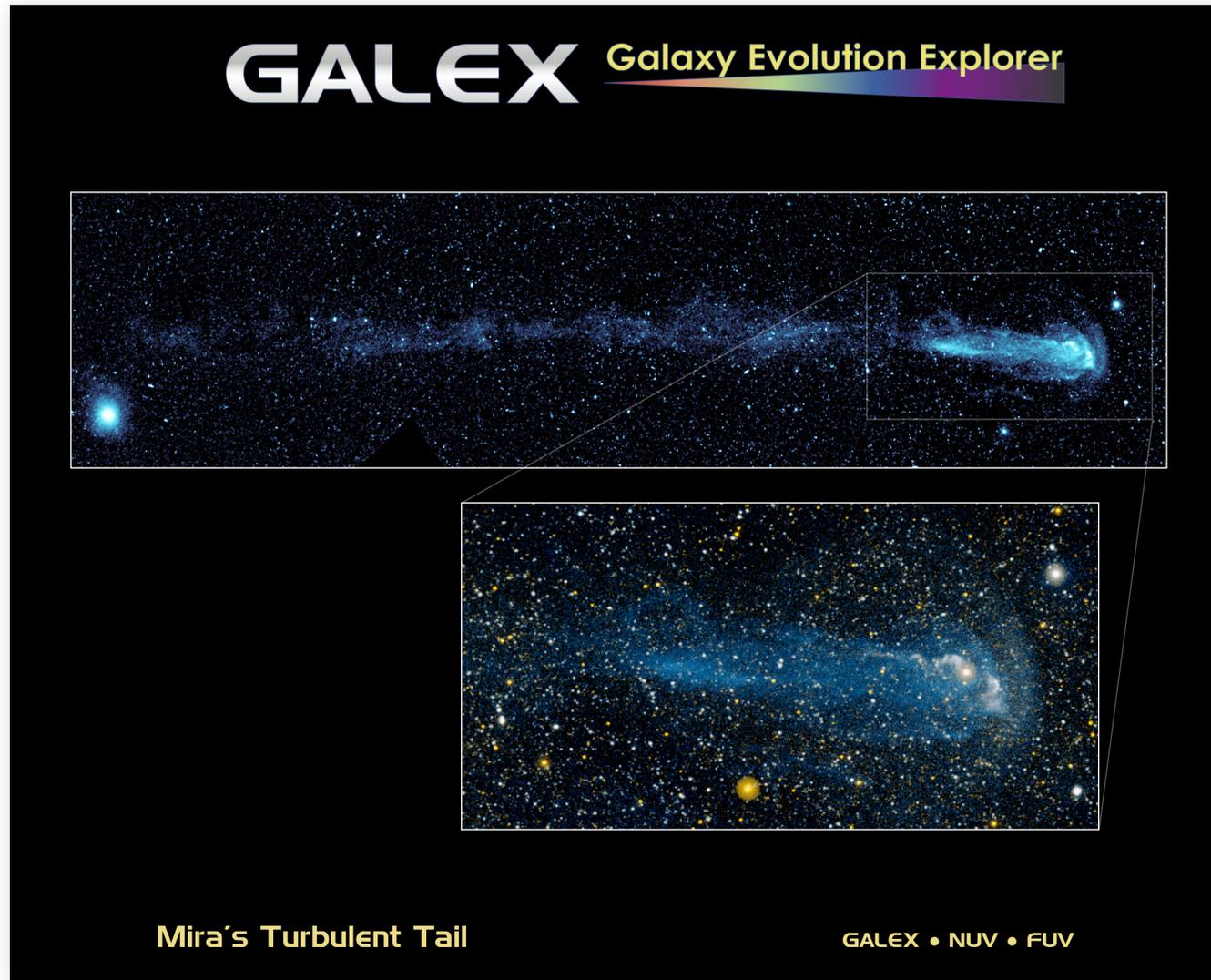
360° view of Gaia's sky



ESA Science & Technology

星の固有運動

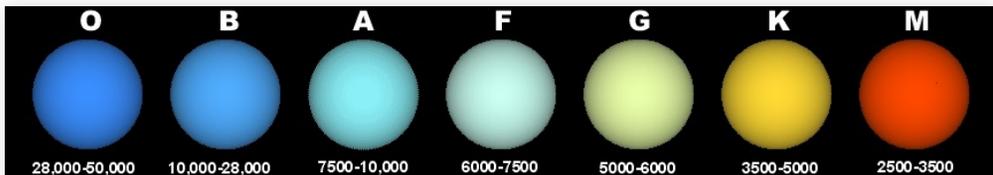
- ミラの星風によるtail(紫外線衛星GALEXの観測データ)



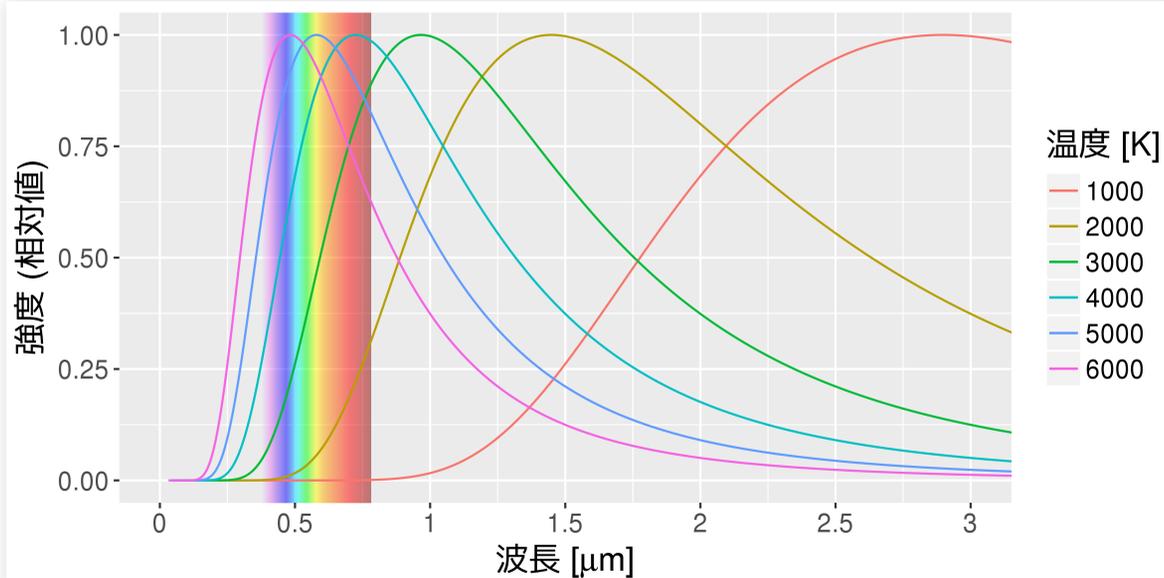
星の“本当の”明るさ

明るい星はより近くの星か？

- 星の色が異なる



Hanson, Astronomy course at U of Cincinnati

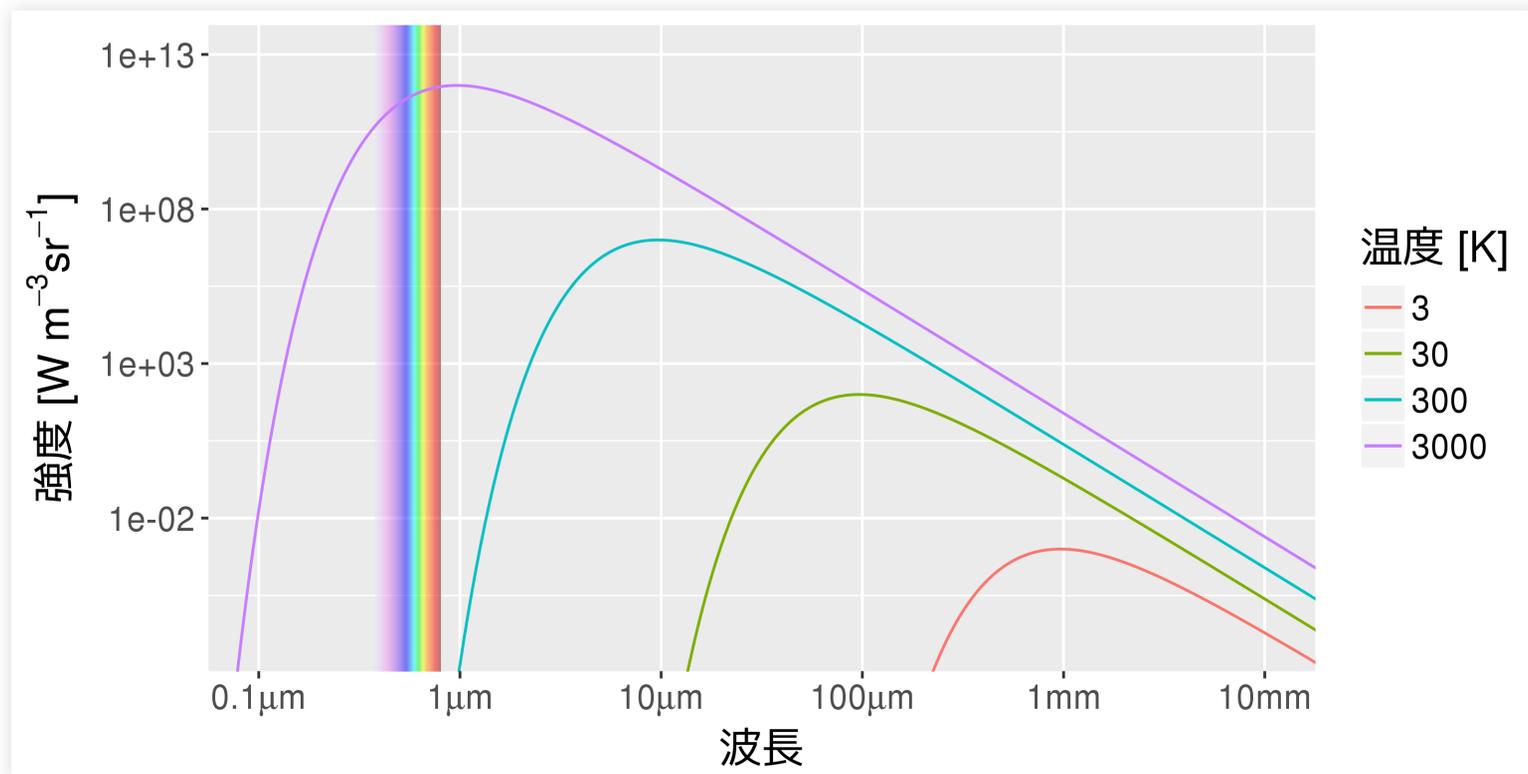


Wikimedia commons

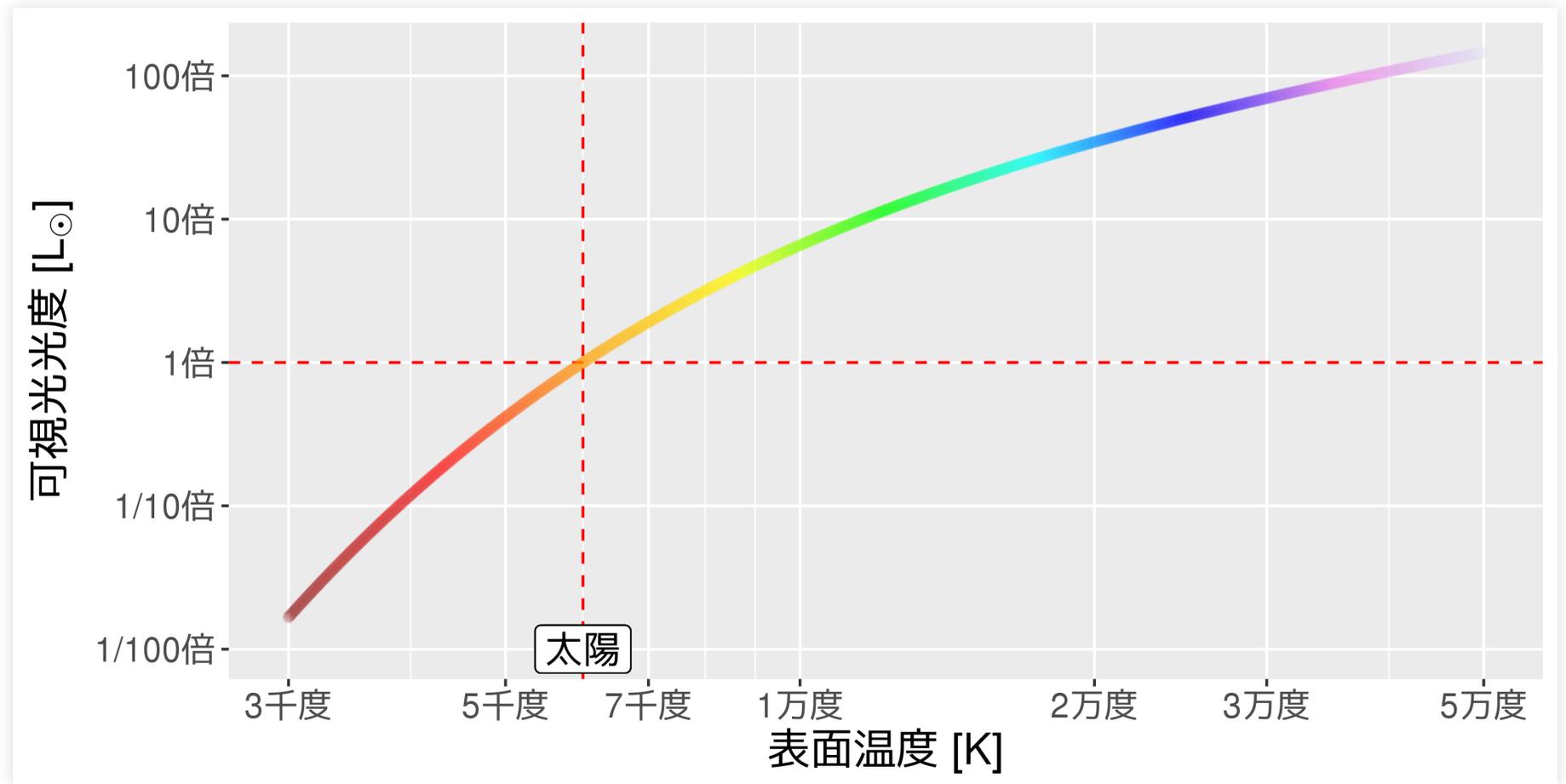
星の(見かけの)明るさを決める要因II

星の(表面)温度

- 星の色の違いは温度の違い
- 温度が高いものほどより明るくなる
→ より近くに見える



星の表面温度と明るさの関係 (星の大きさを一定とした場合)



星の真の明るさ

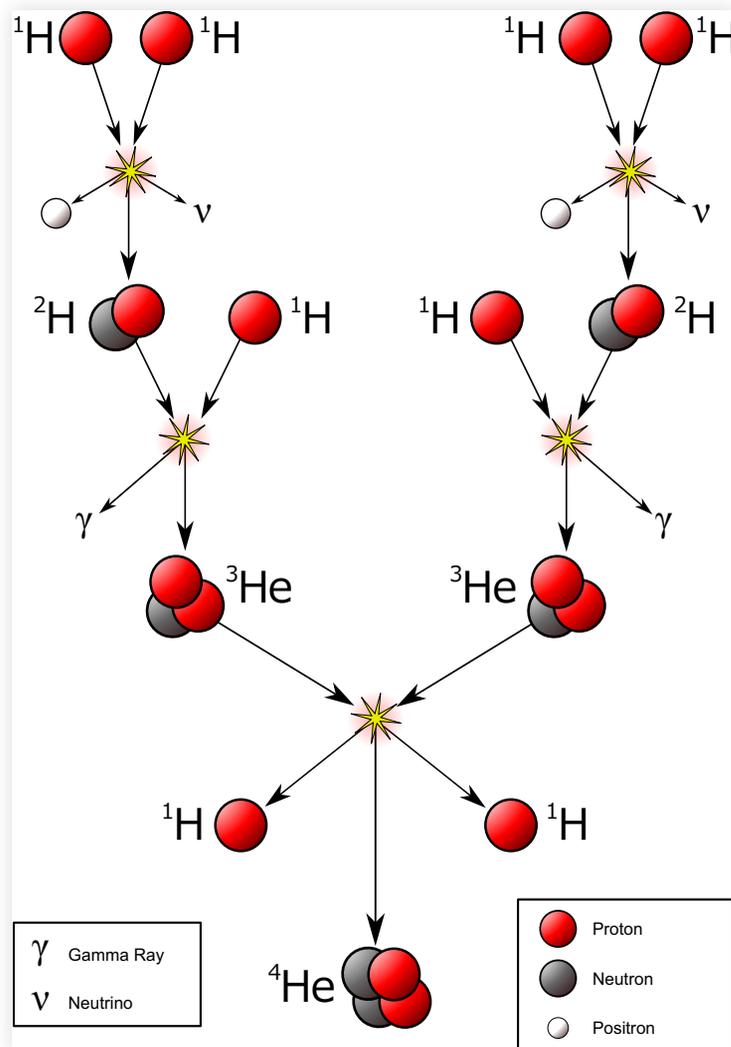
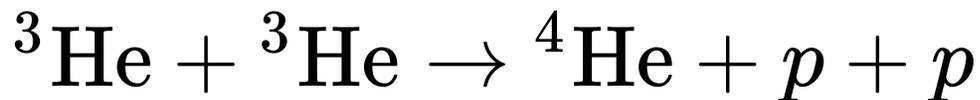
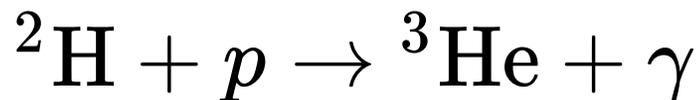
- 遠くにある星でも温度が高い(= 大きい)と明るく見える
- 星の見かけの明るさと真の明るさを区別する必要
- 見かけの明るさ：apparent magnitude
- 真の明るさ：絶対等級 (absolute magunitude)
 - 距離10パーセクに置いた時の明るさを絶対等級と定義

星の燃焼

中心核に於ける水素の核融合

- 陽子4つからヘリウム原子核1つが作られる

- “pp chain” と呼ばれる



Borb via Wikimedia Commons

ppチェーン

- 全体で陽子4つからヘリウム原子核1つが生成
 - 陽子6つからヘリウム原子核1つ+陽子2つに変換
 - より正確にはこの道筋に加え、BやBeが介在する道筋も存在
- 合計質量は0.7%軽くなる → エネルギーに変換される
 - $E = mc^2$
- 太陽の場合、毎秒に430万トンの質量が 3.8×10^{26} Jのエネルギーに変換されている

核融合の反応レート

星の中心部の圧力で決まる

(圧力は「自分の上にどれだけ物が乗っているか」)

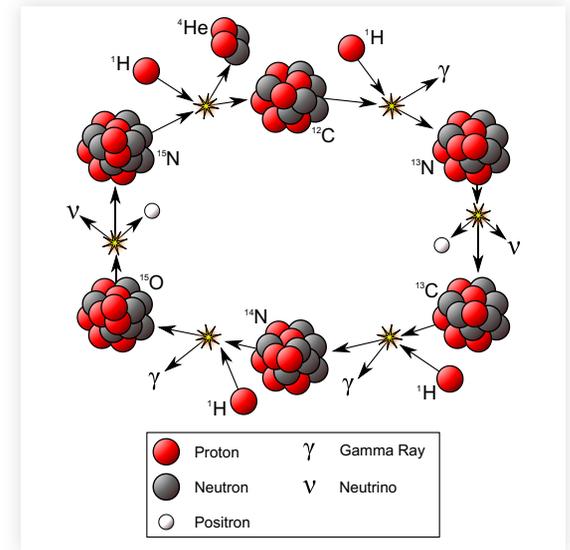
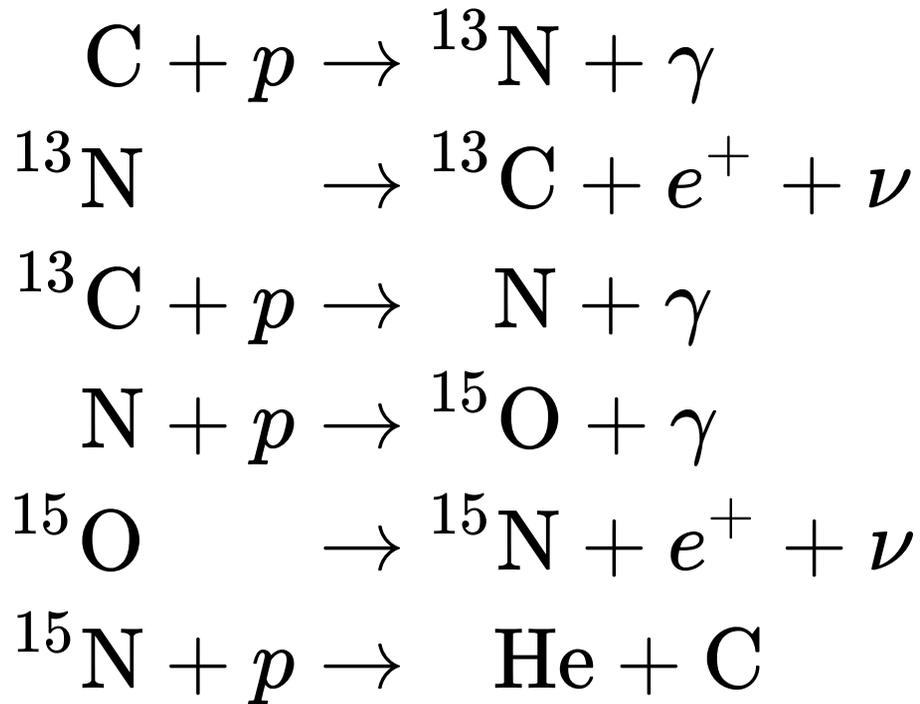
- 星を重くすれば中心部の圧はより高まる
- 水素が良く燃え、高温になる



- 重たい星(大きい星)ほど高温になる

重たい星の燃焼

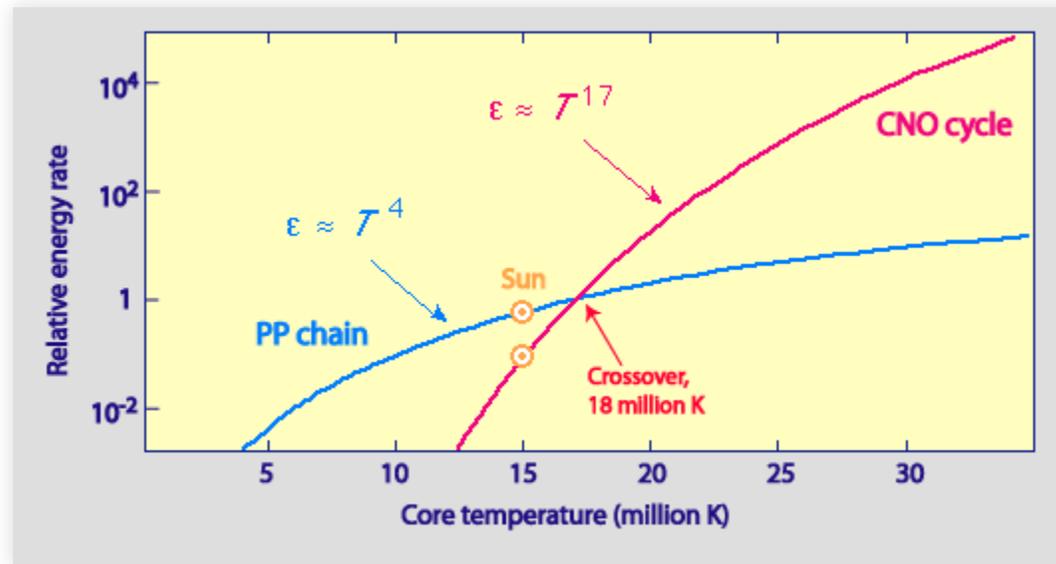
CNOサイクル



Borb via Wikimedia Commons

- CNOを触媒として4つの陽子がヘリウムに変換される
- ppチェーンよりも高い温度で有効に働く
- 太陽より重い質量の星で有効
 - 太陽ではエネルギー発生量の1.6%に寄与

ppチェーンとCNOサイクルの比較

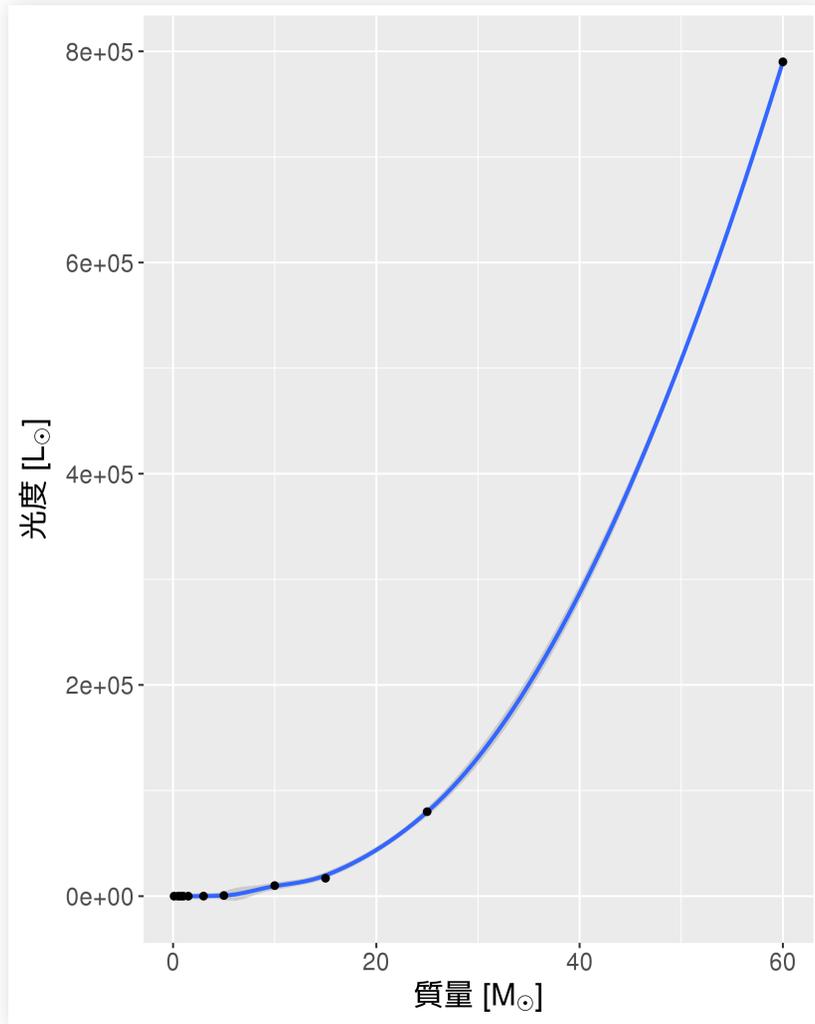


Credit: Adapted from an image by Mike Guidry, University of Tennessee

- 星の質量が大きい→中心核の圧力が上昇↔温度が上昇
- 質量の大きな星はエネルギー生成が急激に増大する

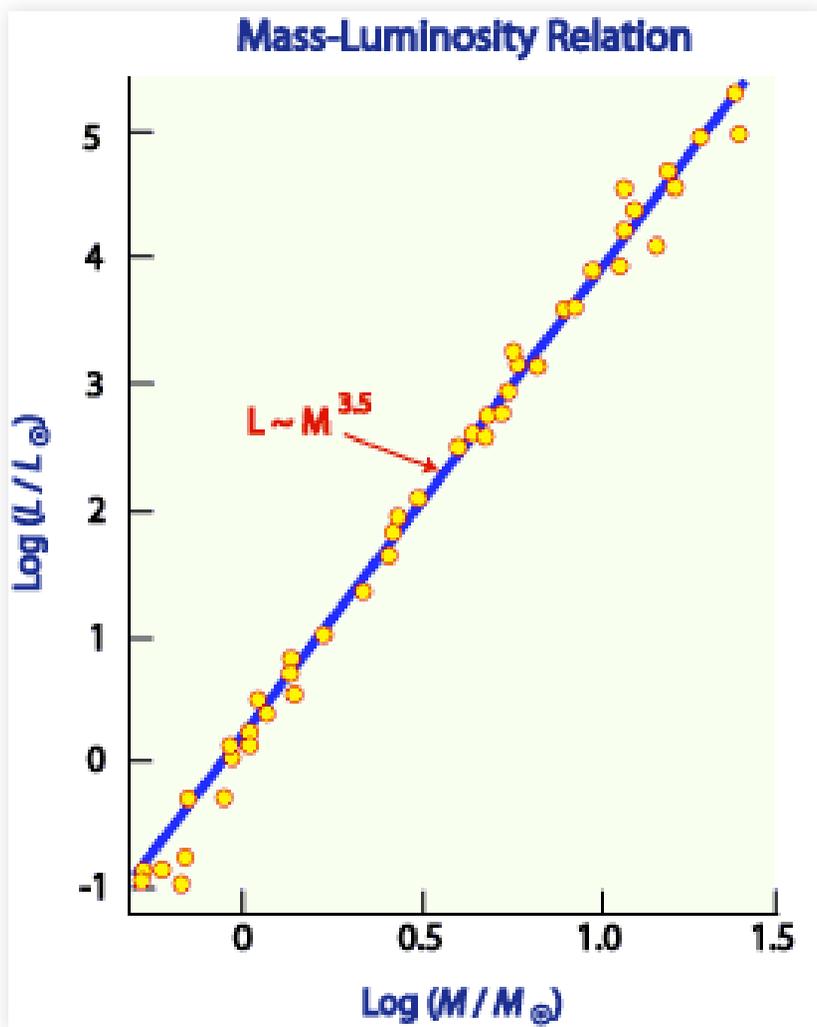
質量による星の違い

主系列星の質量-光度関係



- 星の光度(明るさ)は質量の3.5乗に比例して増大
 - $L \propto M^{3.5}$
 - 質量が2倍の星は、元の星の11.3倍明るい
 - 質量が5倍の星は、元の星の280倍明るい
- 質量の大きな星ほど中心部の水素原子を急激に消費する
- 重い星ほど寿命が短い

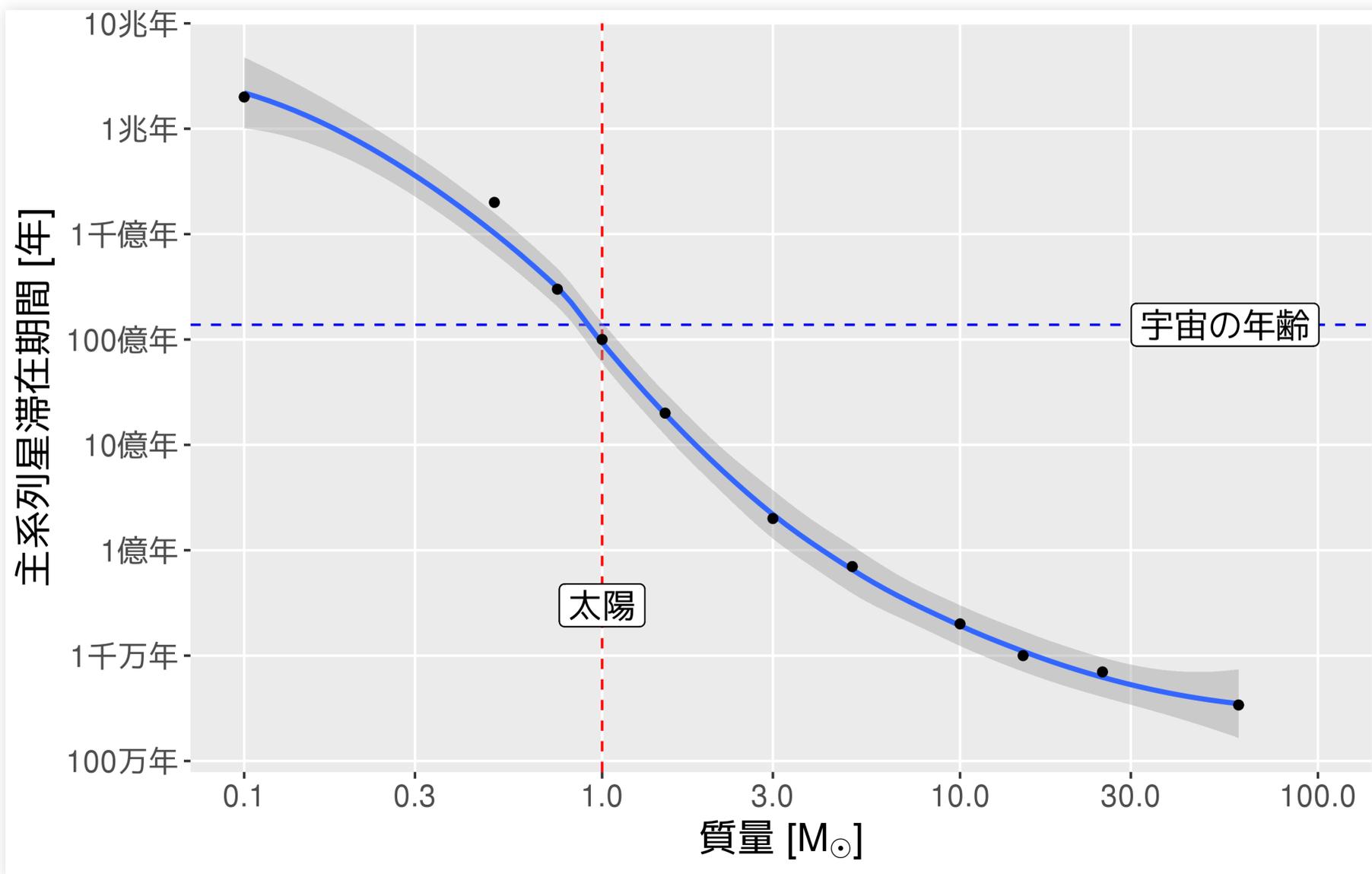
主系列星の質量-光度関係



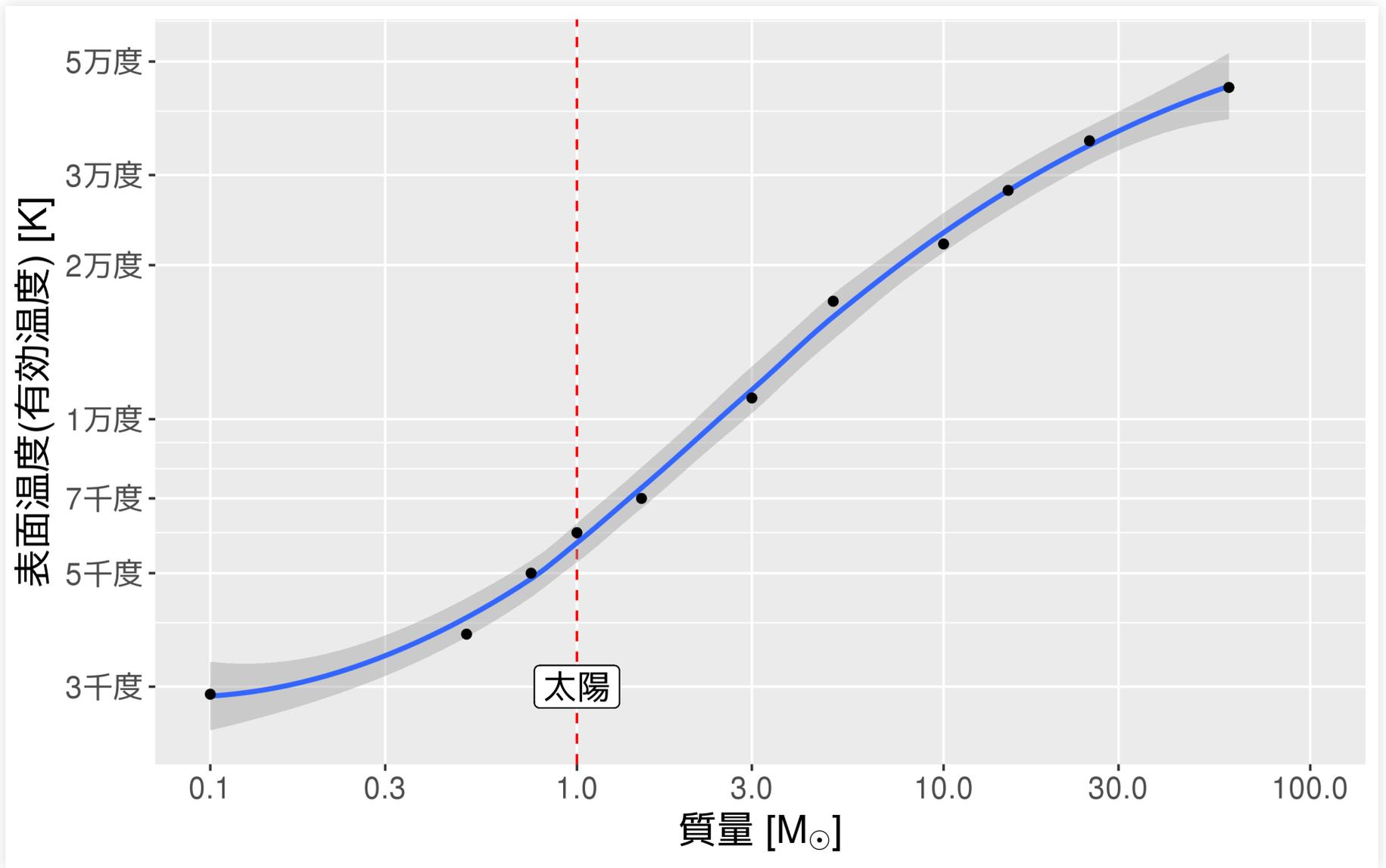
Australia Telescope National Facility

- 星の光度(明るさ)は質量の3.5乗に比例して増大
 - $L \propto M^{3.5}$
 - 質量が2倍の星は、元の星の11.3倍明るい
 - 質量が5倍の星は、元の星の280倍明るい
- 質量の大きな星ほど中心部の水素原子を急激に消費する
- 重い星ほど寿命が短い

星の質量と主系列星としての寿命



主系列星の質量と表面温度の関係



星の表面温度と明るさの関係

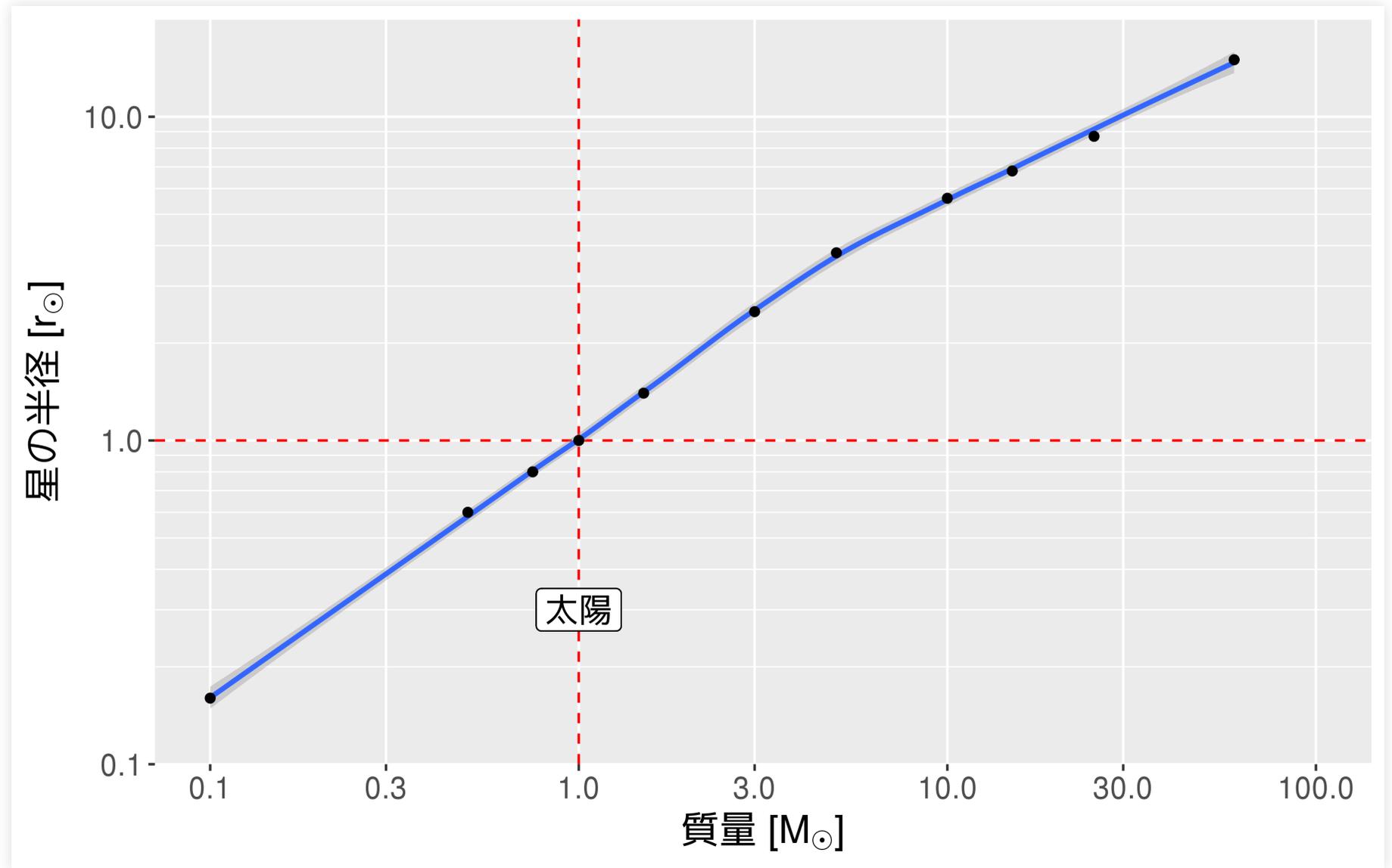
質量による表面温度と明るさの変化

- 質量が大きいほど明るい ($L \propto M^{3.5}$)
- 質量が大きいほど高温 & 半径大

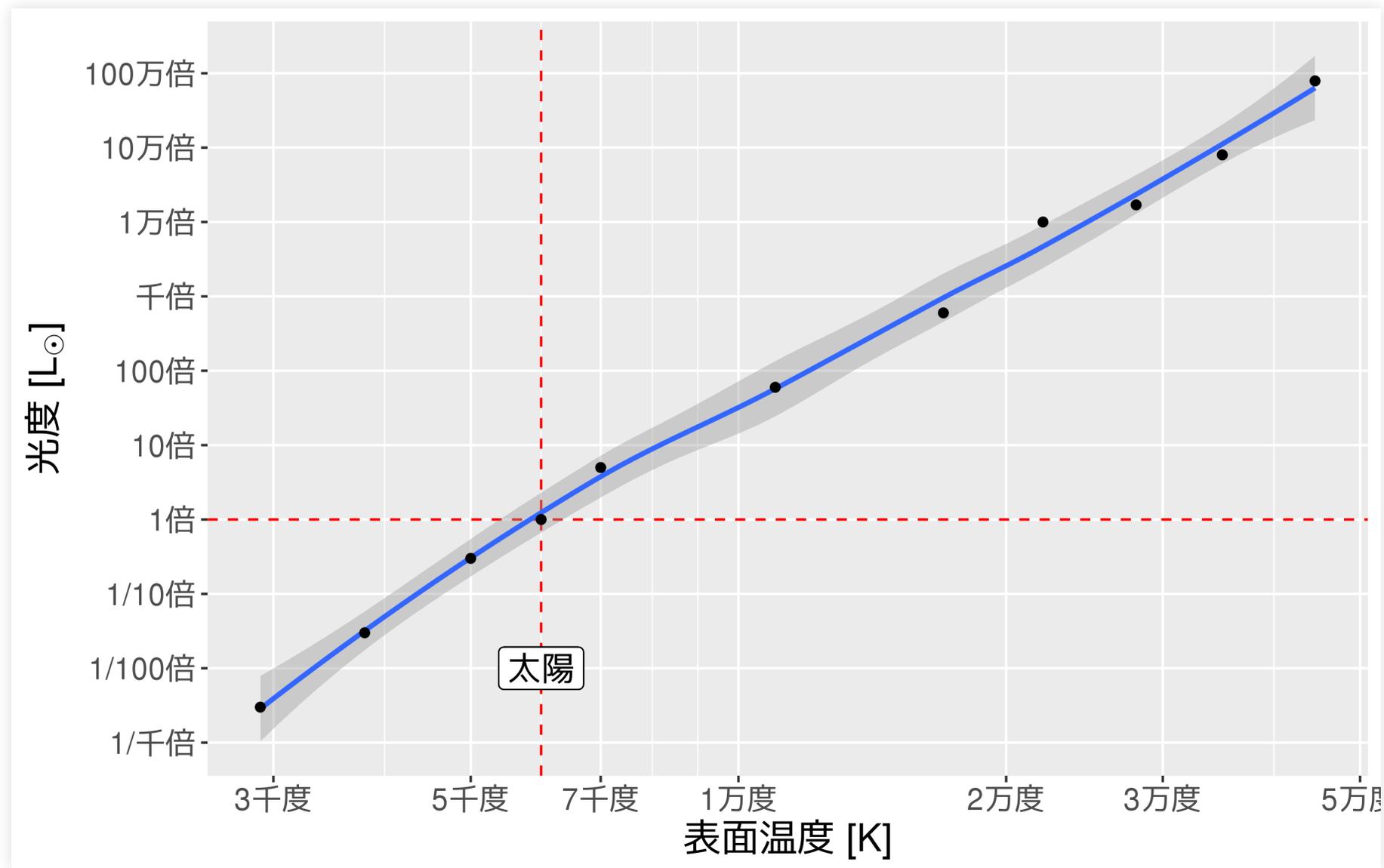


“高温の星ほど明るい”という関係として観測される

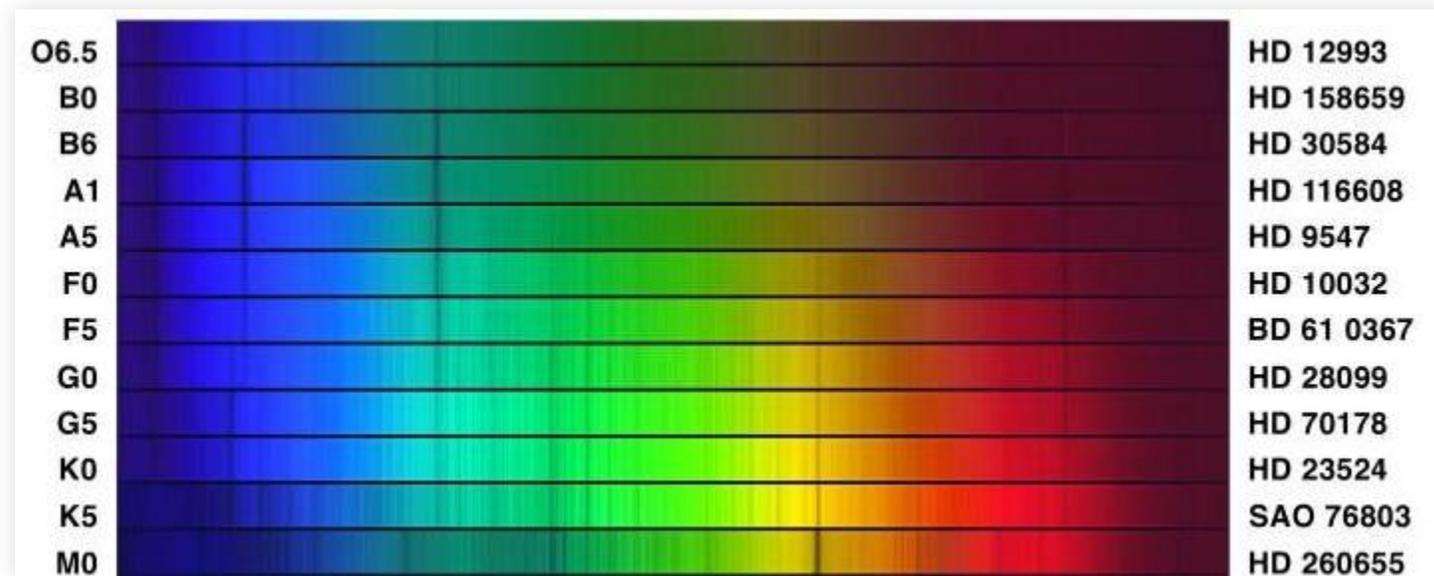
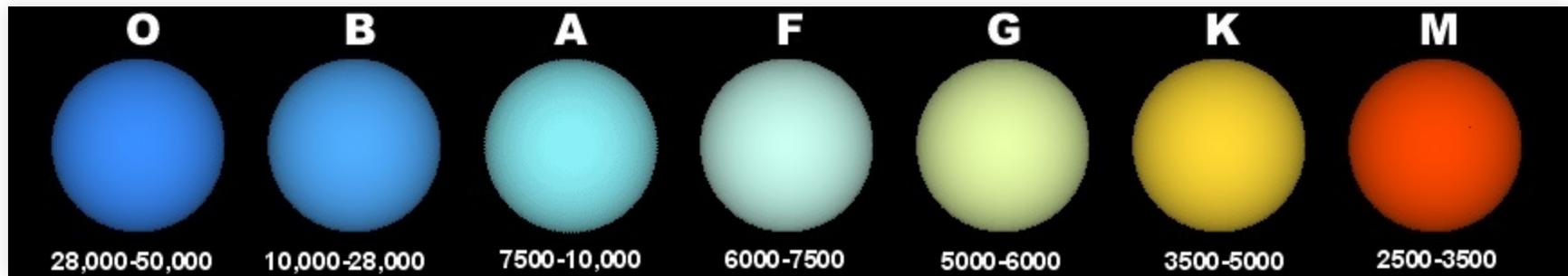
星の質量と大きさの関係



表面温度と明るさの関係

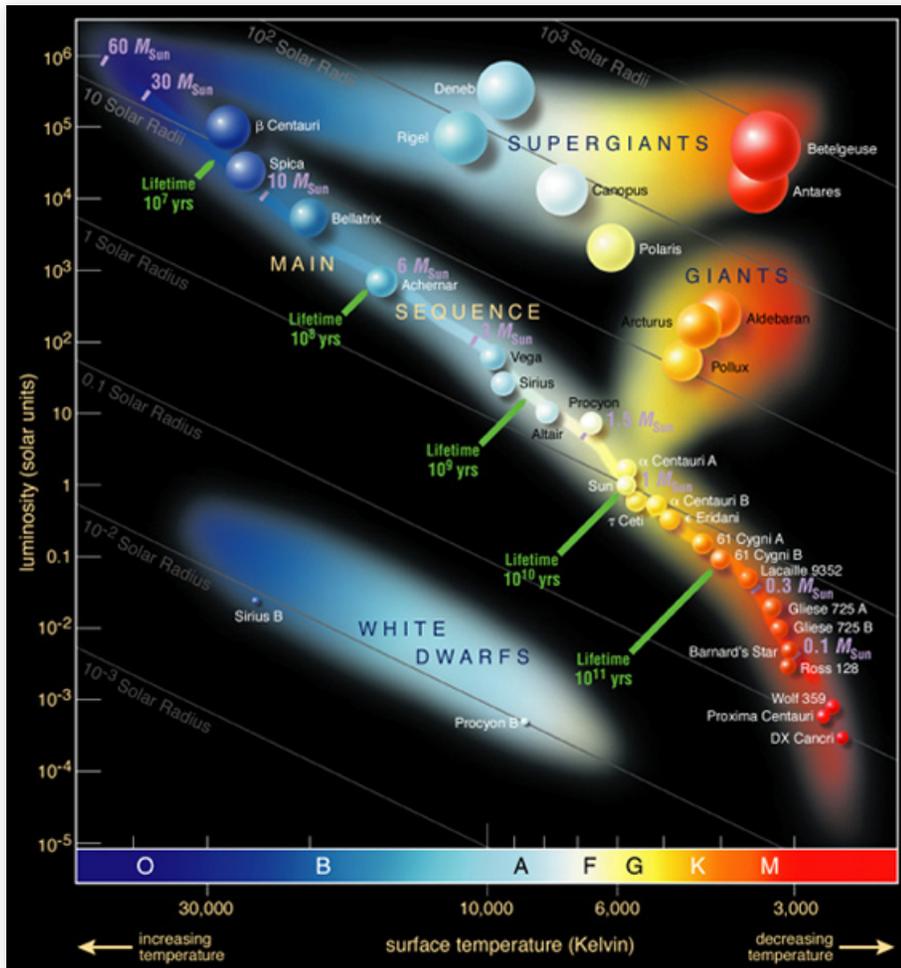


星の表面温度と色(スペクトル型)との関係



Hanson, Astronomy course at U of Cincinnati

H-R図 (Hertzsprung-Russell Diagram)

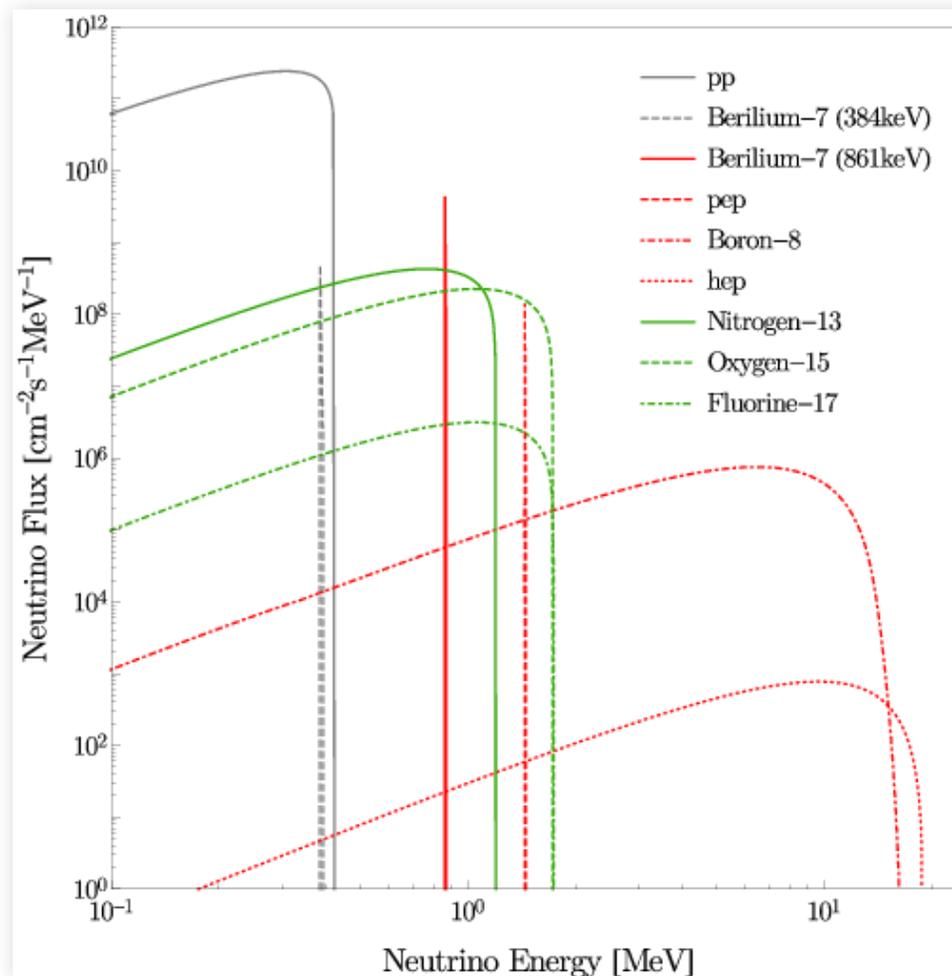


- 縦軸は星の絶対等級 (若しくは光度)
- 横軸は星の表面温度 (色・スペクトル型)
 - 横軸の向きは反転 (歴史的経緯による)
- 様々なタイプの星がH-R図上でうまく分かれる
- 星までの距離測定に使える

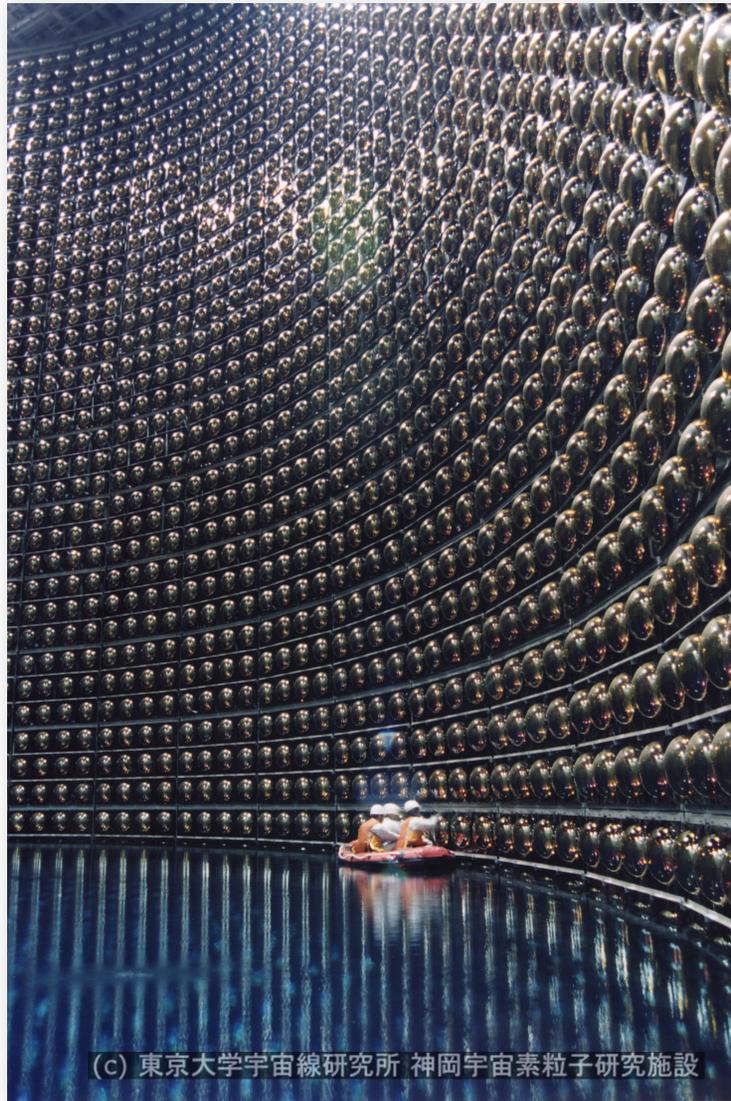
太陽ニュートリノ(問題)

核融合反応によるニュートリノ生成

- pp chain や CNO cycle によるニュートリノ放射
- エネルギーの2%を持ち去る



スーパーカミオカンデによるニュートリノ観測



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

東京大学宇宙線研究所

スーパーカミオカンデ

ノーベル賞への企業の貢献

スーパーカミオカンデの模式図

タンク上部ドーム

光電子増倍管 (外向き)

内水槽

ステンレス板

光電子増倍管 (内向き)

外水槽

制御室

長崎水装置

オルガン

コンピュータシステムの変遷

世代	1993~97年 第1世代	97~2002 第2世代	02~07 第3世代	07~12 第4世代	12~17 第5世代
計算装置の数	—	—	200 基	540 基	1704 基
記憶容量 (テラバイト)	12.8	200	440	700	3100 (3.1ペタバイト)

光電子増倍管のしくみ 浜松ホトニクス

光 (チェレンコフ光)

光電面 光を電子に変える

電子増倍部 電子が集まる

電子は1000万倍以上に増幅される

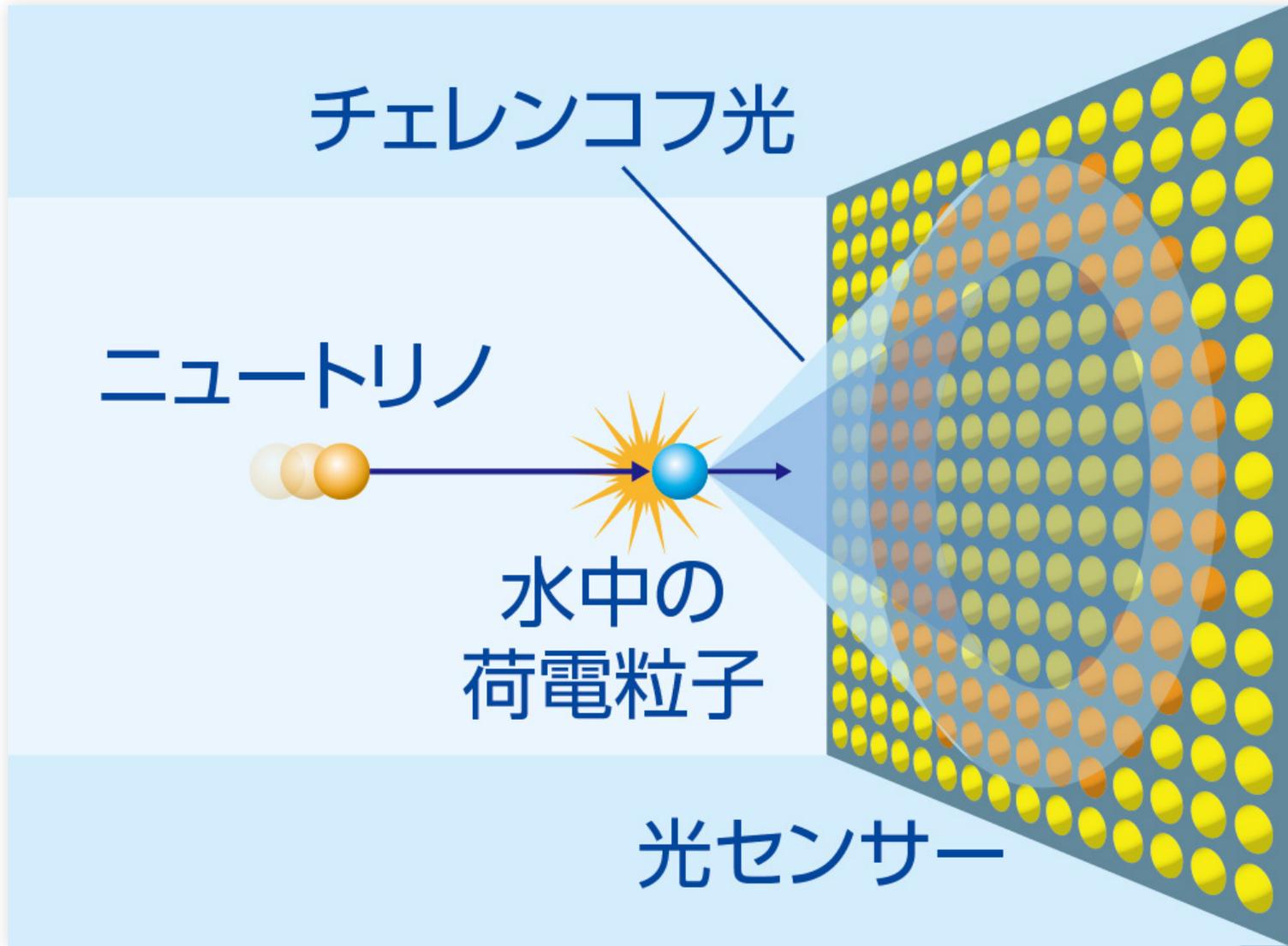
カミオカンデの規模の変遷

カミオカンデ (1983~1996年)	スーパーカミオカンデ (1996~現在)	ハイパーカミオカンデ (予定) 2026~
タンクの容積 水 3000 ³ /分	5万 ³ /分	水櫃を段階的に2つ建設 1つ 26万 ³ /分
光電子増倍管 1000本	1万1000本	1つ 4万本
直径 約16m	直径 41.4m	直径 約90m
高さ 約16m	高さ 39.3m	高さ 約74m

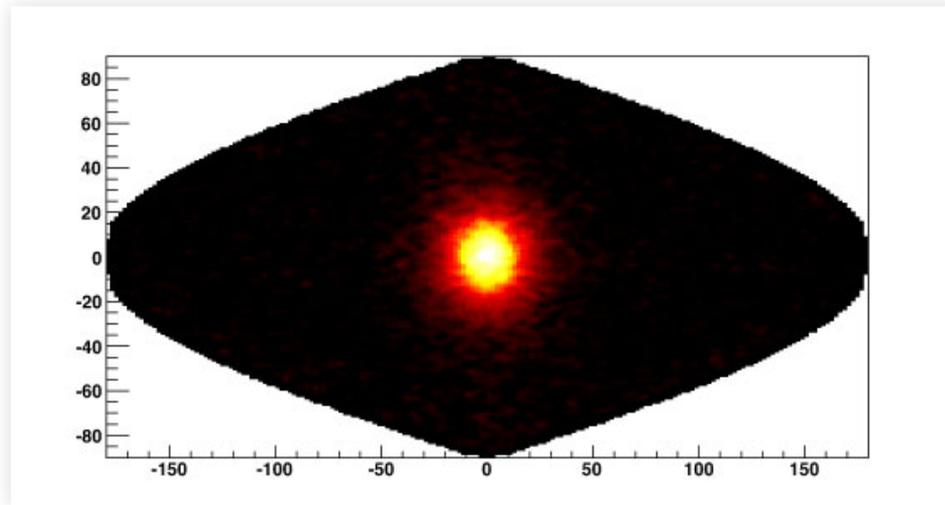
グラフィック・大原 啓輔

asahi.com

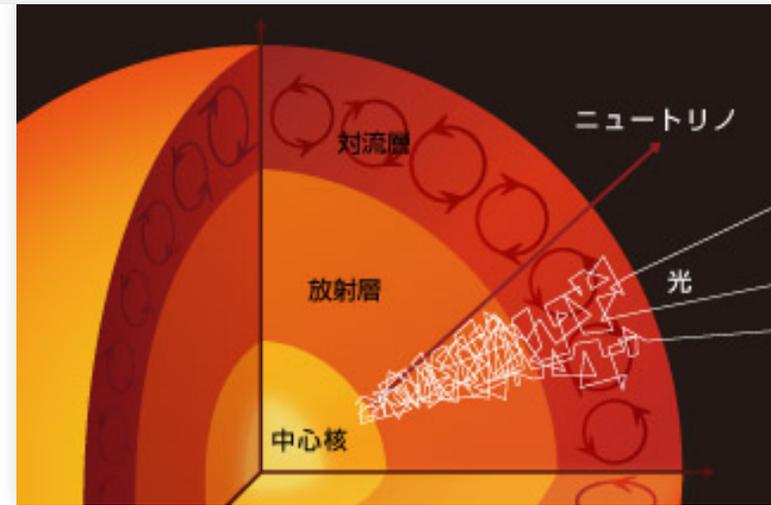
チェレンコフ光



ニュートリノで見た太陽



東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設



ISAS/JAXA

- 観測されるニュートリノ強度は理論予想値の約半分(45%)
- “ニュートリノ振動”により ν_e が ν_μ , ν_τ と(振動的に)変換

日本のニュートリノ研究によるノーベル賞

【仕事とは?】

Vol.54 ノーベル物理学賞受賞者

小柴昌俊

見えないものを見てこそ
科学は一步前進する

実験物理学の分野で国内外の数々のプロジェクトのリーダーとしても活躍し、2002年にノーベル物理学賞を受賞。受賞理由は「宇宙ニュートリノの検出」だが、その検出を実現した実験装置は当初は別の目的で造ったものだった。



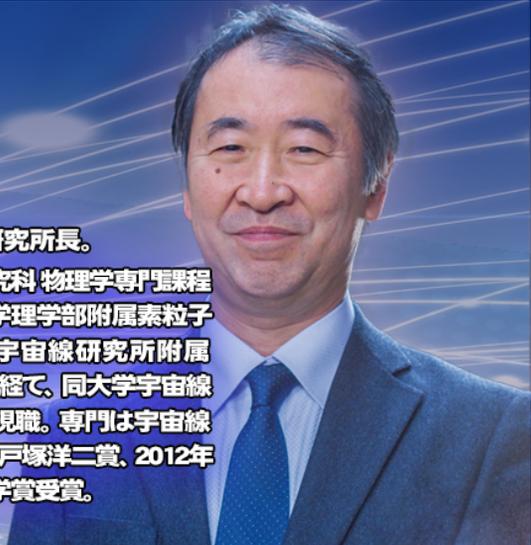
リクナビホームページより

梶田 隆章

(かじた たかあき)

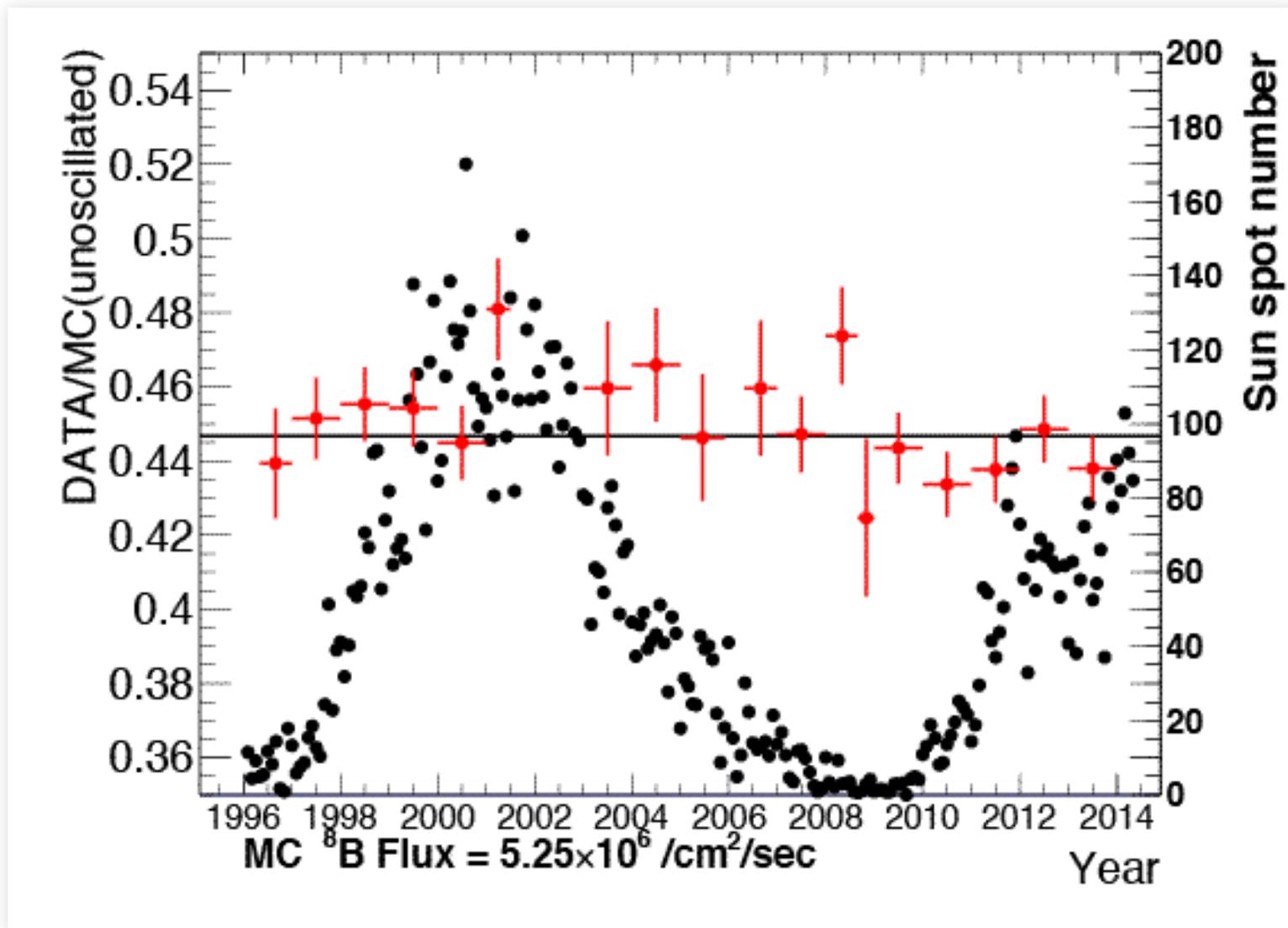
東京大学 特別荣誉教授、宇宙線研究所長。

1986年に東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専門課程 博士課程修了、理学博士。東京大学理学部附属素粒子物理国際センター・助手、同大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設・助教授を経て、同大学宇宙線研究所教授となる。2008年4月より現職。専門は宇宙線物理学。1999年仁科記念賞、2010年戸塚洋二賞、2012年日本学士院賞、2015年ノーベル物理学賞受賞。



J-PARC

太陽活動の11年周期とニュートリノ



Hyper-Kamiokande

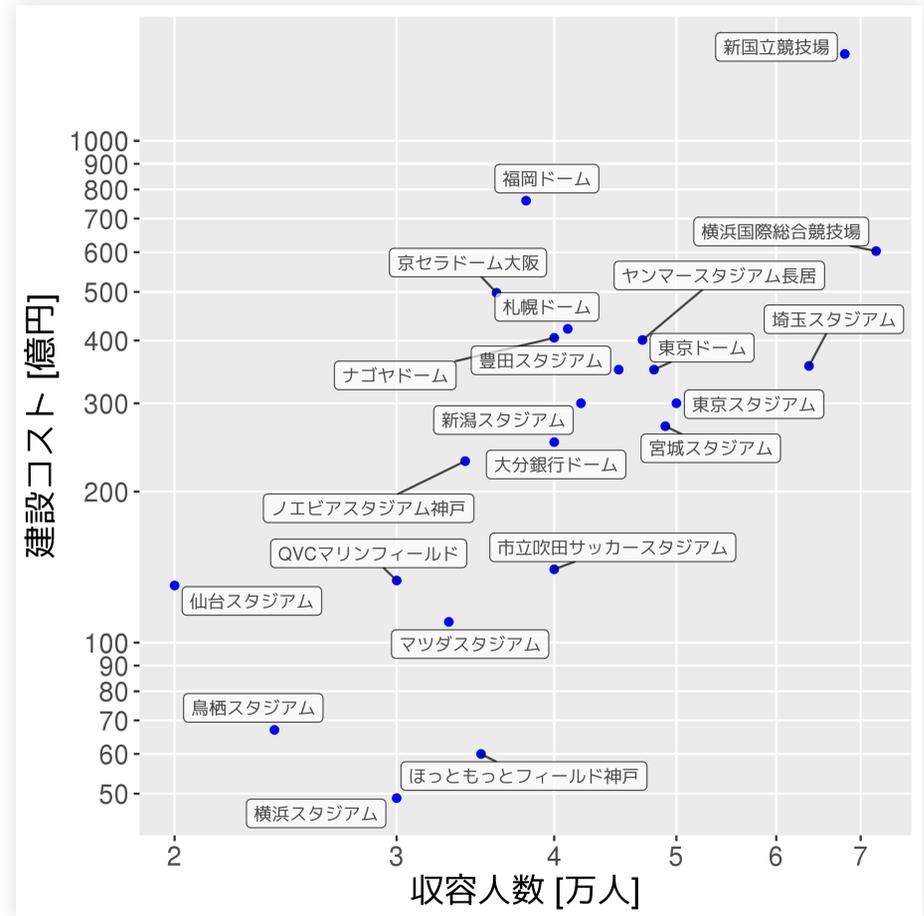
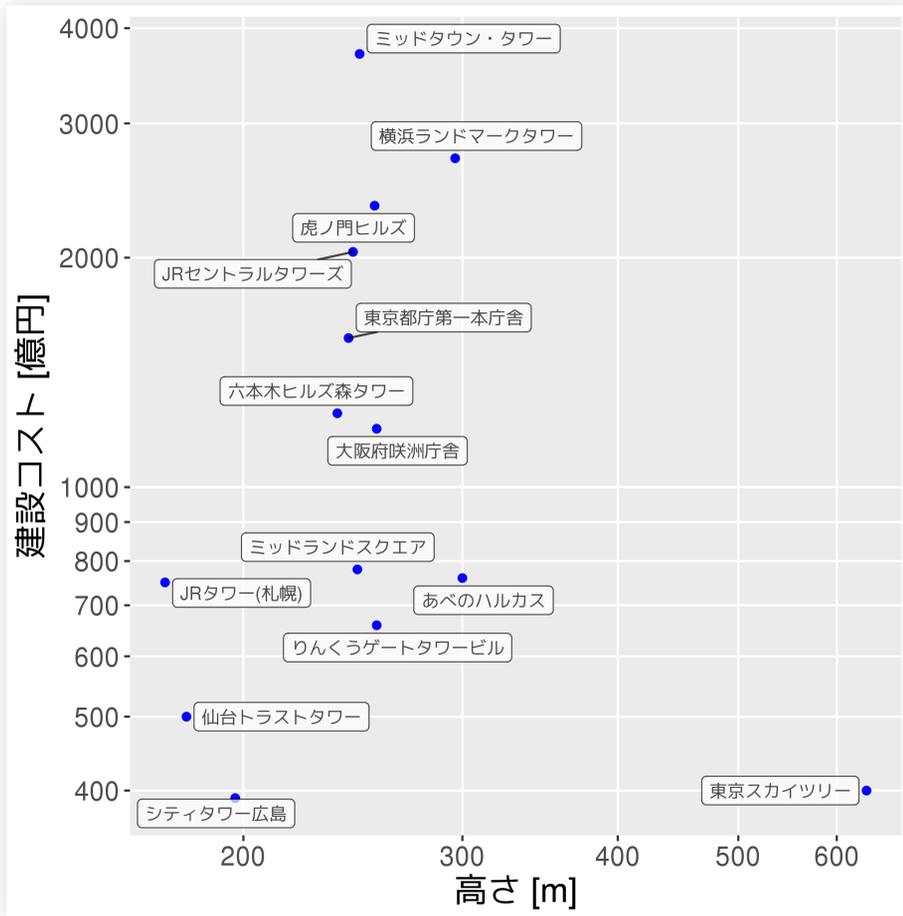
学術研究の大型プロジェクト の推進に関する基本構想 「ロードマップ」

日本学術会議

- 内閣総理大臣の所轄の下、政府から独立して職務を行う「特別の機関」として1949年に設立
- 科学に関する重要事項を審議し、政府への提言を行う
- 数年ごとに「マスタープラン」(学術の大型研究計画に関するマスタープラン)を策定
- マスタープランに基づく「ロードマップ」を策定

(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1388523.htm)

いろいろなものの予算



- 東京ゲートブリッジ 東京港臨海道路II期事業の総事業費は約1,125億円
- 地下鉄の建設費 概ね1km当り200億円前後
- 大田区の予算(平成29年度)一般会計総額2600億円
- 目黒区の予算(平成29年度)一般会計総額927億円、特別会計総額570億円