

Tiến hóa sao: Cuộc đời của các ngôi sao

John R. Percy

*International Astronomical Union
University of Toronto, Canada*



Tiến hóa sao

- Tiến hóa sao là quá trình sao tiêu tốn “nhiên liệu” từ lúc phát sinh đến lúc tàn lụi.
- Hiểu được quá trình này sẽ giúp ta biết:
 - Bản chất và tương lai của Mặt Trời.
 - Nguồn gốc Hệ Mặt Trời.
 - So sánh Hệ Mặt Trời với các hệ hành tinh khác.
 - Khả năng có sự sống ở nơi nào khác trong Vũ trụ.



Tinh vân Nhẫn, một ngôi sao đang chết.

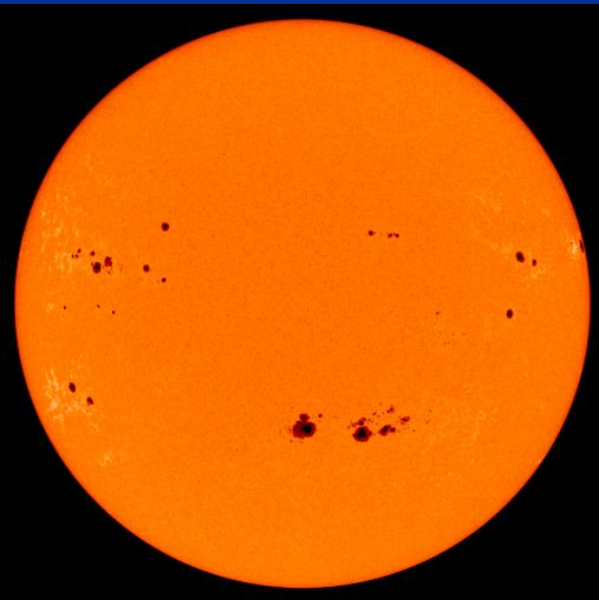
Source: NASA



Các thông số của Mặt Trời

và quan trọng là làm sao đo được chúng!

- **Khoảng cách:** 1.5×10^{11} m, phản xạ song radar từ Sao Thủy và Sao Kim
- **Khối lượng:** 2×10^{30} kg, đo chuyển động các hành tinh quay quanh
- **Đường kính:** 1.4×10^9 m, từ kích thước góc biểu kiến và khoảng cách
- **Công suất:** 4×10^{26} W, từ khoảng cách và công suất đo được trên Trái Đất
- **Thành phần hóa học:** 98% hydro và heli, từ quang phổ



Mặt Trời.

Source: NASA SOHO Satellite



Đặc tính của các sao

và quan trọng là làm sao đo được chúng!

- **Khoảng cách:** phương pháp thị sai hoặc từ độ sáng biểu kiến nếu đã biết công suất
- **Công suất:** từ khoảng cách và độ sáng biểu kiến
- **Nhiệt độ bề mặt:** từ màu và quang phổ
- **Bán kính:** từ công suất và nhiệt độ bề mặt
- **Khối lượng:** từ quan sát hệ sao đôi
- **Thành phần hóa học:** từ quang phổ



Chòm sao Orion.

Source: Hubble, ESA, Akira Fujii

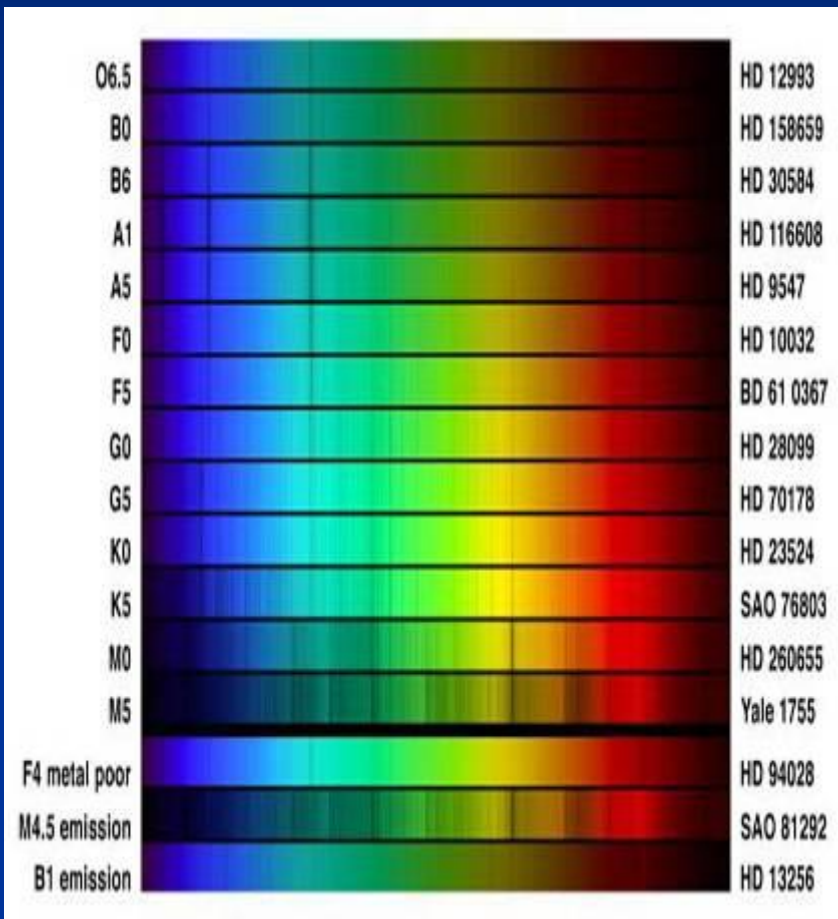


Quang phổ sao:

ánh sáng sao phân tách thành các màu

- Biết về các nguồn sáng bằng việc nghiên cứu ánh sáng chúng phát ra
- Quang phổ cho biết thông tin về thành phần, nhiệt độ và các đặc tính khác của sao

Bên trái: 13 quang phổ của sao với nhiệt độ bề mặt khác nhau (nóng nhất ở trên cùng), 3 quang phổ dưới cùng của các sao có tính chất khác thường



Quang phổ các sao

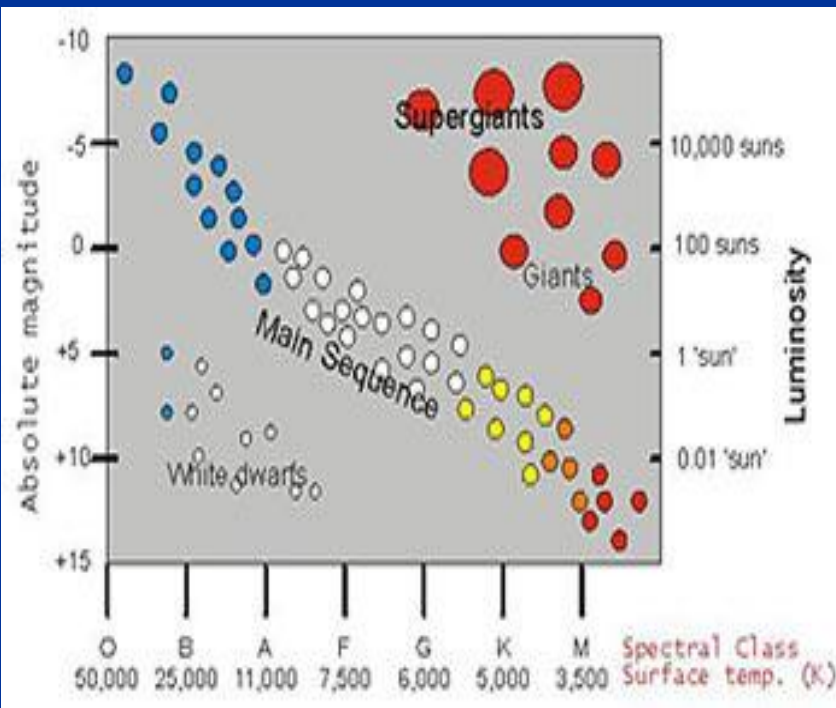
Source: US National Optical Astronomy Observatory



Biểu đồ Hertzsprung-Russell

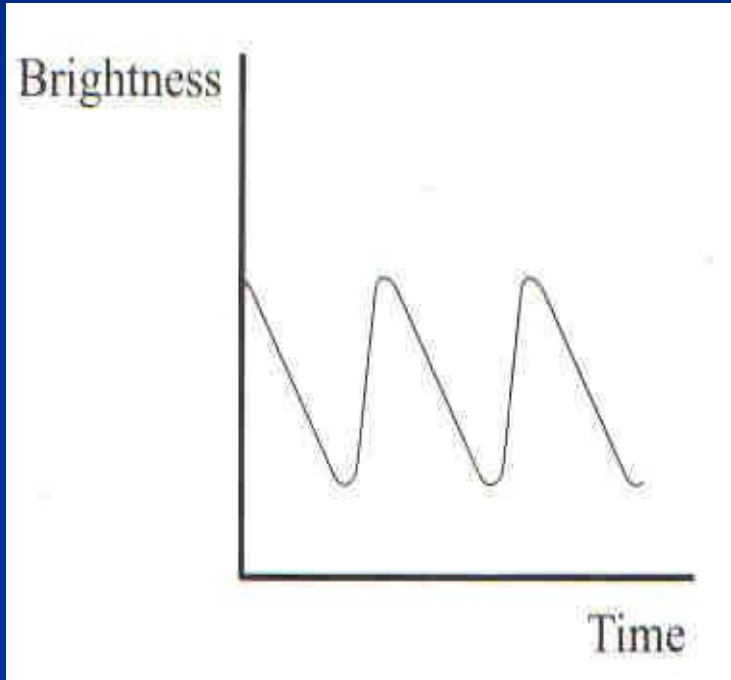
Cách biểu thị đặc tính của sao!

- Biểu đồ Hertzsprung-Russell (HR) biểu diễn công suất (độ sáng) phụ thuộc theo nhiệt độ (quang phổ); “cấp sao tuyệt đối là thang đo logarit của công suất.



- Phần lớn sao nằm ở dãy chính: Các sao lớn thì nóng và công suất cao nằm ở góc trái trên, các sao nhỏ thì nhẹ thì lạnh hơn và công suất thấp hơn, nằm ở góc phải dưới
- Các sao khổng lồ nằm ở góc phải trên còn các sao lùn trắng nằm ở góc trái dưới

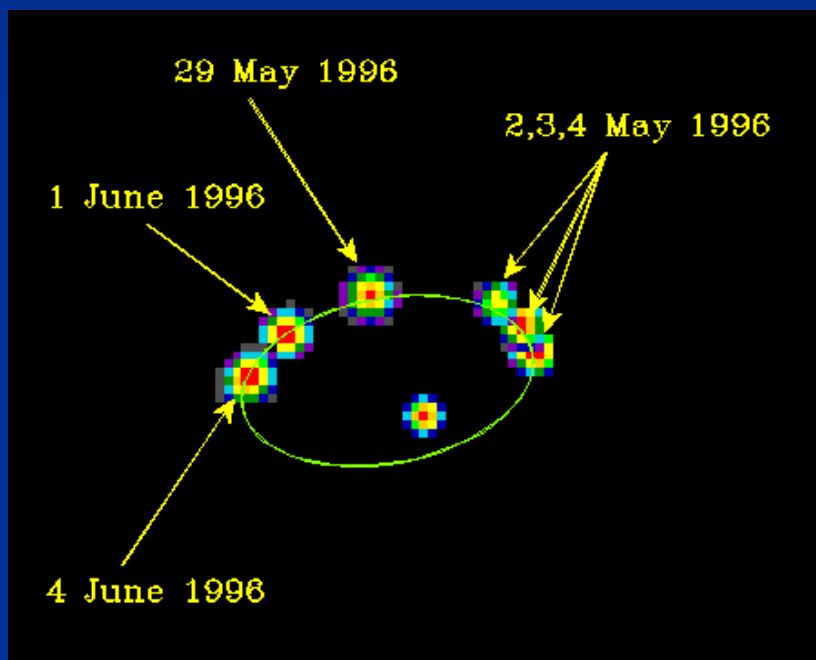
Sao biến quang



Đường cong độ sáng biến đổi theo thời gian

- Sao biến quang thay đổi độ sáng theo thời gian
- Phần lớn các sao đều biến quang, có thể do rung lắc, vụt sáng, lụi tắt, phát nổ hoặc bị sao đồng hành hay hành tinh che khuất một phần
- Sao biến quang cho biết các thông tin quan trọng về bản chất và tiến hóa của sao

Sao đôi và sao phức



Chuyển động trên quỹ đạo của Mizar, ngôi sao trong chòm Gấu Lớn.

Source: NPOI Group, USNO, NRL

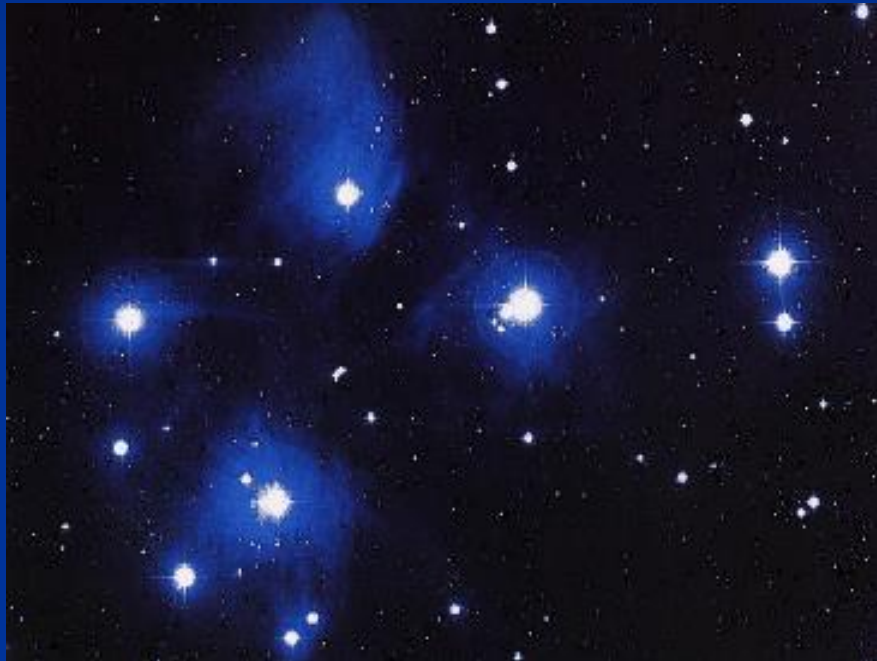
- Sao đôi là cặp sao giữ gần nhau do lực hấp dẫn và quay quanh nhau. Chúng có thể nhìn thấy được trực tiếp (hình bên) hoặc phát hiện được qua quang phổ hay qua hiện tượng che khuất nhau
- Chúng là công cụ quan trọng nhất để đo khối lượng các sao
- Sao phức là từ ba sao trở lên bị giữ lại với nhau do lực hấp dẫn



Cụm sao

“Thí nghiệm của tự nhiên”

- Cụm sao là nhóm sao gần nhau do lực hấp dẫn và di chuyển cùng nhau trong Vũ trụ
- Chúng sinh ra cùng lúc cùng chỗ, từ cùng nguồn vật liệu, cho nên chúng có cùng khoảng cách tới chúng ta, chỉ khác nhau về khối lượng
- Cụm sao là ví dụ về các sao có cùng tuổi nhưng khác khối lượng



Cụm sao mở Tua Rua

Source: Mount Wilson Observatory



Mặt Trời và các sao làm từ gì?



Thành phần nguyên tố trong vũ trụ: các nguyên tố là H (90%), các nguyên tố khác là He (8%), các nguyên tố khác là C, N và O cùng một ít các nguyên tố khác (2%).

- Sử dụng quang phổ và các kỹ thuật khác, các nhà thiên văn có thể tìm ra “nguyên tố khởi thủy” tạo nên các sao
- Hydro (H) và heli (He) là các nguyên tố dồi dào nhất và sinh ra từ thuở sơ khai của vũ trụ
- Các nguyên tố nặng hơn thì hiếm hơn hàng triệu hàng tỷ lần, được tạo ra từ phản ứng nhiệt hạch trong các ngôi sao

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					



Nguyên tố sinh ra từ Big Bang



Nguyên tố sinh ra từ phản ứng tổng hợp hạt nhân ở lõi sao



Nguyên tố sinh ra từ siêu tân tinh



Quy luật cấu trúc các sao

- Càng đi sâu vào lòng các sao, áp suất càng tăng do trọng lượng các lớp ngoài.
- Theo định luật về các chất khí, nhiệt độ và khối lượng riêng tăng khi áp suất tăng.
- Năng lượng sẽ truyền từ phần nóng hơn bên trong ra phần lạnh hơn bên ngoài bằng bức xạ và đối lưu.
- Nếu năng lượng truyền ra ngoài ngôi sao, nó sẽ nguội đi trừ phi có thêm năng lượng được tạo ra bên trong.
- *Các sao đều tuân theo các định luật vật lý đơn giản nhưng bao trùm vạn vật.*



Ví dụ: vì sao Mặt Trời không co lại hay co sụp?



- Thổi một quả bóng bay như hình bên
- Áp suất khí quyển đang ép quả bóng vào trong. Nó không xẹp lại vì áp suất khí bên trong hướng ra ngoài.
- Trong Mặt Trời, lực hấp dẫn ép vật chất vào trong cân bằng với áp suất khí hướng ra ngoài.

Nguồn năng lượng của Mặt Trời và các sao

- Đốt ga, dầu hay than?

Quá trình này hiệu suất rất thấp, chỉ đủ năng lượng cho Mặt Trời trong vài nghìn năm

- Sức nén từ từ do lực hấp dẫn?

Có thể cung cấp năng lượng cho Mặt Trời trong hàng triệu năm, nhưng Mặt Trời lại đã hàng tỷ năm tuổi

- Phân ra hạt nhân (phân hạch)?

Các đồng vị phóng xạ hầu như không tồn tại trong lòng Mặt Trời hay các sao

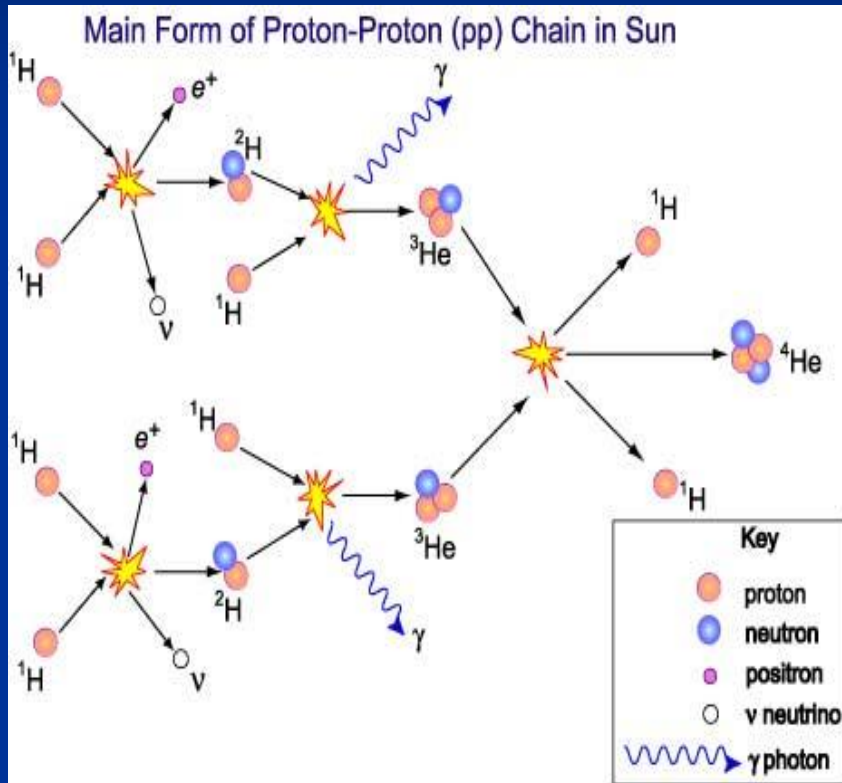
- Tổng hợp hạt nhân nhẹ thành hạt nhân nặng hơn?

Yes! Đây là quá trình có hiệu suất rất cao và các nguyên tố nhẹ như hydro và heli thì chiếm tới 98% Mặt Trời và các sao



Chuỗi phản ứng proton-proton là quá trình tổng hợp chính trong Mặt Trời

- Ở nhiệt độ và mật độ cao trong lòng các ngôi sao như Mặt Trời, proton (màu đỏ trong hình) vượt qua được lực đẩy tĩnh điện lẫn nhau để tạo thành ^2H (deuteri) và neutrino (ν)
- Sau đó, một proton khác kết hợp với deuteri để tạo thành ^3He
- Rồi hạt nhân ^3He kết hợp với nhau để tạo thành hạt nhân ^4He và giải phóng 2 proton
- Kết quả là 4 proton tạo ra heli và năng lượng dưới dạng tia gamma và cơ năng



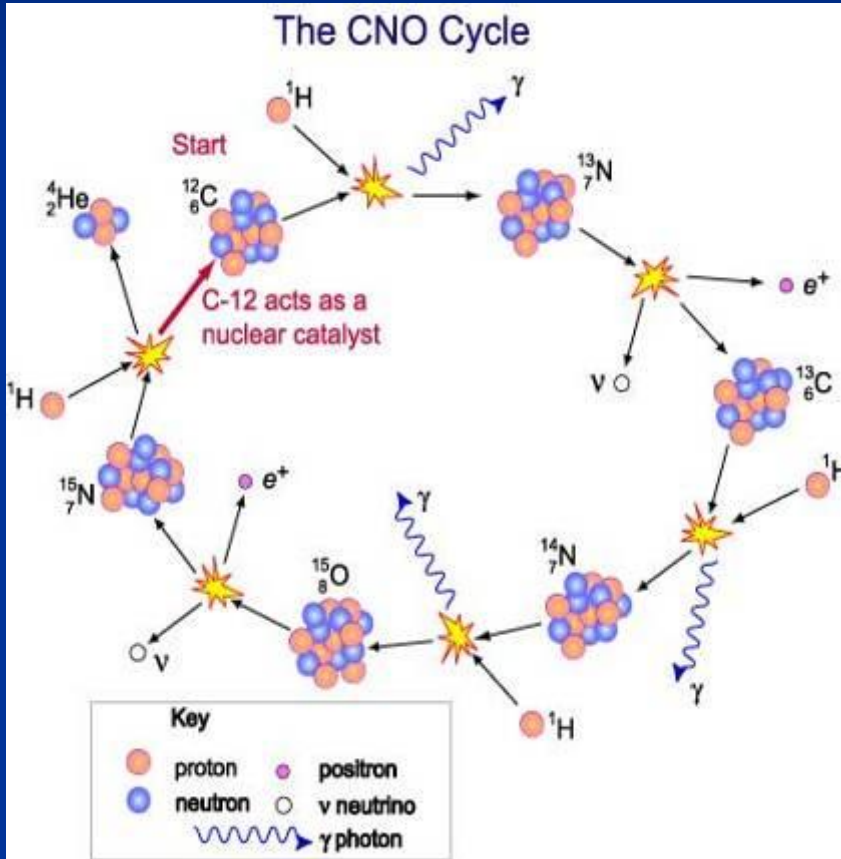
Chu trình proton-proton

Source: Australia National Telescope Facility



Chu trình cacbon – nitơ – oxy (CNO)

- Trong các sao nặng với nhân rất nóng, proton (màu đỏ) va chạm với hạt nhân ^{12}C (cacbon)
- Thế là bắt đầu một chu trình phản ứng mà 4 proton tổng hợp thành 1 hạt nhân heli
- Một hạt nhân ^{12}C được tái tạo sau mỗi chu trình nên được coi là một chất xúc tác cho phản ứng hạt nhân



Chu trình CNO

Source: Australia National Telescope Facility



Mô hình sao

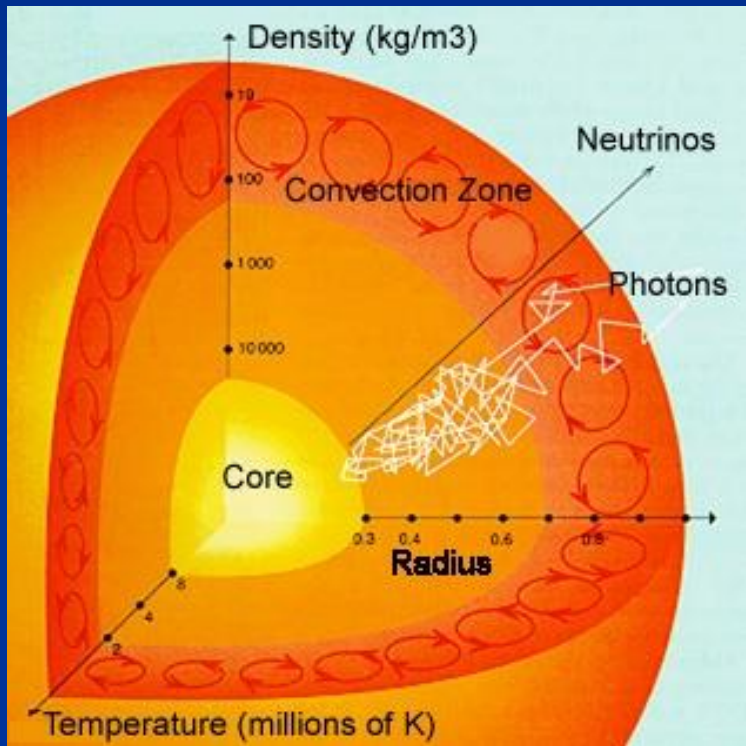
- Các định luật mô tả cấu trúc sao được trình bày bằng các phương trình và được giải bằng máy tính.
- Máy tính tính toán nhiệt độ, khối lượng riêng, áp suất và công suất của mỗi điểm trong lòng Mặt Trời hay các sao, gọi là mô hình.
- Ở tâm Mặt Trời, khối lượng riêng cao gấp 150 lần nước và nhiệt độ là $\sim 15,000,000$ K!



Bên trong Mặt Trời

dựa trên mô hình Mặt Trời trong máy tính

- Trong lõi nóng, phản ứng hạt nhân tạo ra nhiệt độ bằng việc tổng hợp hydro thành heli.
- Ở vùng bức xạ bên ngoài lõi, năng lượng truyền ra ngoài thông qua cơ chế bức xạ.
- Trong vùng đối lưu tiếp theo, năng lượng truyền ra ngoài bằng đối lưu.
- Quang cầu nằm trên bề mặt là lớp mà từ đó ra ngoài là trong suốt



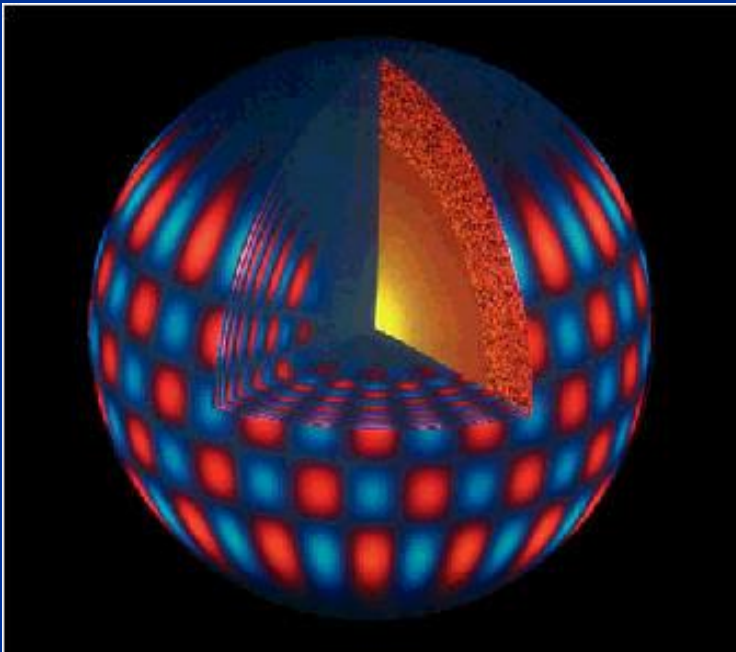
Mô hình sao

Source: Institute of Theoretical Physics,
University of Oslo



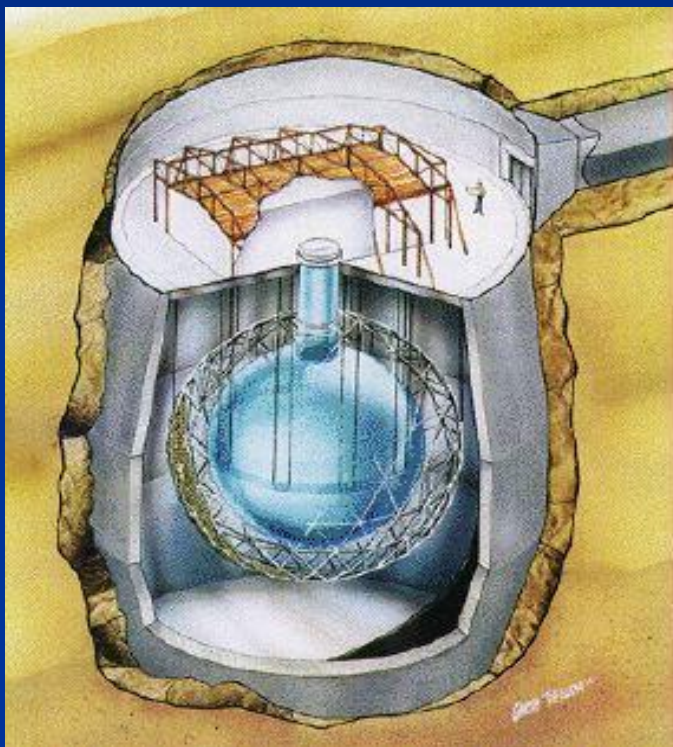
Kiểm tra mô hình bằng nhật chấn học

- Mặt Trời rung lắc nhẹ theo hàng nghìn kiểu. Một trong số chúng được trình bày trong hình bên trái
- Những rung động này có thể quan sát được và ta có thể qua đó suy luận ra cấu trúc bên trong của Mặt Trời, kiểm tra lại các mô hình cấu trúc Mặt Trời đang có. Đó là môn nhật chấn học.
- Các rung động tương tự có thể quan sát được trên các sao, gọi là môn tinh chấn học.



Mô phỏng rung động trong Mặt Trời.
Source: US National Optical Astronomy
Observatory

Kiểm tra mô hình bằng neutrino



- Phản ứng tổng hợp hạt nhân tạo ra các hạt cơ bản gọi là neutrino.
- Chúng có khối lượng rất nhỏ và hiếm khi tương tác với vật chất.
- Khối lượng của chúng được phát hiện và đo đạc nhờ vào các đài quan sát đặc biệt, ví dụ như Đài quan sát Sudbury. Kết quả phù hợp với dự đoán thu được trong các mô hình.

Đài quan sát neutrino ở Sudbury
Source: Sudbury Neutrino Observatory



Tuổi thọ sao

- Tuổi thọ một ngôi sao phụ thuộc vào nó có bao nhiêu nhiên liệu hạt nhân (hydro) và tiêu tốn chúng nhanh hay chậm (công suất).
- Các sao nhẹ hơn Mặt Trời là đông đảo nhất. Chúng có ít nhiên liệu hơn và công suất thấp hơn nhiều, nên tuổi thọ sẽ dài hơn.
- Các sao nặng hơn Mặt Trời thì ít gặp hơn. Chúng có nhiều nhiên liệu hơn nhưng công suất cao hơn nhiều, nên tuổi thọ sẽ ngắn hơn.



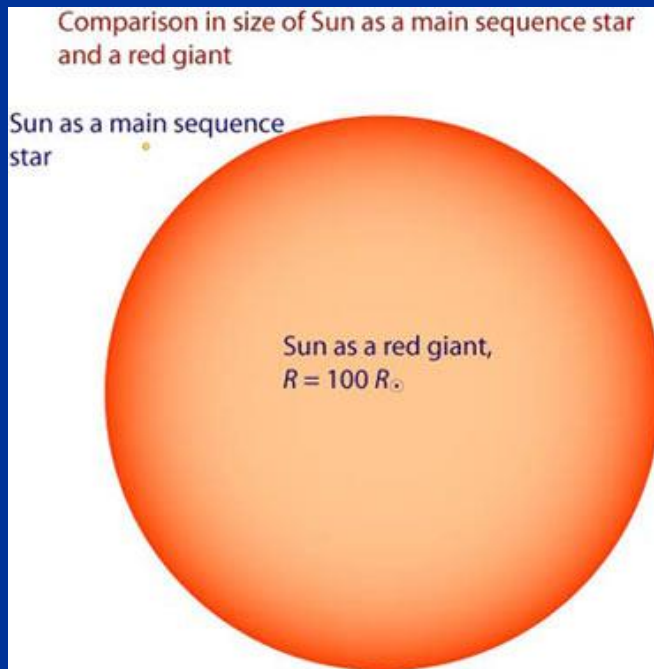
Các nhà thiên văn nghiên cứu tiến hóa sao như thế nào?

- Quan sát sao trong nhiều giai đoạn cuộc đời và xếp chúng theo một dãy tiến hóa hợp lý.
- Lập mô hình bằng máy tính sử dụng các định luật vật lý và tính toán các thay đổi về thành phần trong ngôi sao sẽ xảy ra do tổng hợp hạt nhân.
- Nghiên cứu cụm hoặc nhóm sao cùng tuổi nhưng có khối lượng khác nhau.
- Nghiên cứu các giai đoạn nhanh và lạ thường trong cuộc đời sao (ví dụ tân tinh và siêu tân tinh).
- Nghiên cứu các sao xung biến quang, đo đạc các thay đổi chậm trong chu kỳ co bóp khi chúng tiến hóa.



Tiến hóa của sao kiểu Mặt Trời

- Các sao kiểu Mặt Trời không thay đổi nhiều trong 90% cuộc đời, chừng nào chúng còn đủ nhiên liệu hydro để duy trì phản ứng nhiệt hạch. Chúng được gọi là sao dãy chính.



- Khi hydro cạn kiệt, chúng phình to thành một sao khổng lồ đỏ.
- Trong lõi, nhiệt độ có thể tăng cao đến mức tạo ra năng lượng bằng cách tổng hợp heli thành cacbon.
- Khi heli cạn kiệt, ngôi sao lại phồng lên lớn hơn nữa, gấp hàng trăm lần Mặt Trời bây giờ.

Cái chết của sao kiểu Mặt Trời



Tinh vân hành tinh Helix
Source: NASA

- Khi thành sao khổng lồ đỏ, ngôi sao bắt đầu co bóp (rung động), gọi là sao kiểu Mira
- Xung động khiến lớp ngoài của sao tách ra, tạo ra một tinh vân hành tinh đẹp (hình bên)
- Lõi của sao là một sao lùn đặc, trắng, nhỏ và không còn nhiên liệu

Sao lùn trắng

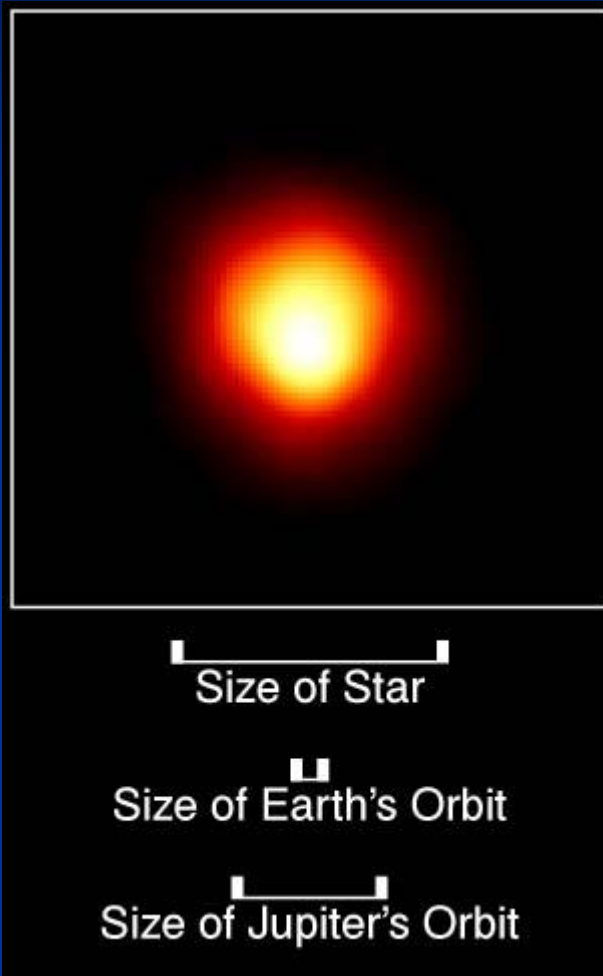


Sao lùn trắng (dưới) đồng hành với
Sao Sirius (trên)
Source NASA

- Sao lùn trắng là lõi của một sao kiểu Mặt Trời đã chết
- Sao lùn trắng có khối lượng tương đương Mặt Trời nhưng thể tích chỉ tương đương Trái Đất, nên có khối lượng riêng lớn hơn nước hàng triệu lần.
- Trong sao lùn trắng, lực hấp dẫn hướng tâm cân bằng với áp suất lượng tử hướng ngoại của electron bên trong.
- Nhiều sao lân cận chúng ta, bao gồm Sirius (hình bên) và Procyon có sao lùn trắng đồng hành.



Tiến hóa của sao nặng



- Sao nặng hiếm gặp, sáng mạnh và tiêu tốn nhiên liệu nhanh chóng chỉ trong vài triệu năm.
- Khi tiêu tốn hết nhiên liệu, chúng phình to trở thành sao siêu khổng lồ đỏ.
- Lõi của chúng rất nóng, tới mức tạo ra các nguyên tố nặng hơn cho tới Sắt (Fe).
- Betelgeuse (hình bên) trong chòm sao Orion là một sao siêu khổng lồ đỏ sáng, có kích thước lớn hơn cả quỹ đạo Sao Mộc.

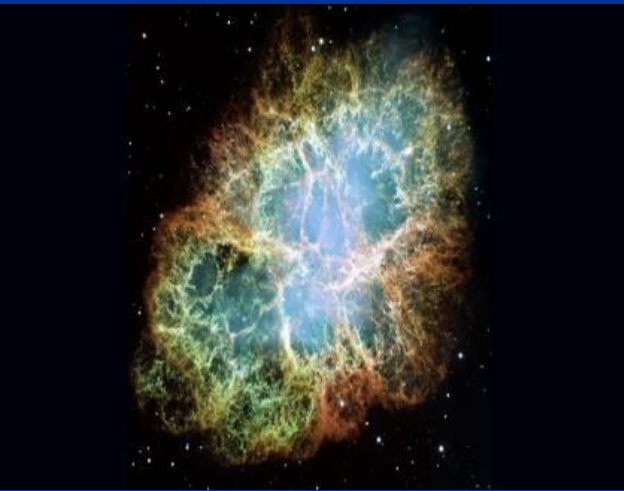
Betelgeuse.

Source: NASA/ESA/HST



Cái chết của sao nặng

- Khi lõi sao nặng chủ yếu đã thành sắt thì không còn nhiên liệu hạt nhân để tiếp tục tổng hợp và không thể giữ được sức nóng nữa.
- Lực hấp dẫn nén nhân sao thành một sao neutron, giải phóng năng lượng trọng trường khổng khiếp và khiến ngôi sao phát nổ thành siêu tân tinh (hình bên)
- Siêu tân tinh tạo ra các nguyên tố nặng hơn sắt và đẩy chúng cùng các nguyên tố khác vào vũ trụ, trở thành nguyên liệu tạo thành các sao và hành tinh mới, thậm chí cả sự sống.



Tinh vân Cua, tàn dư của một vụ nổ siêu tân tinh được thấy vào năm 1054.

Source: NASA



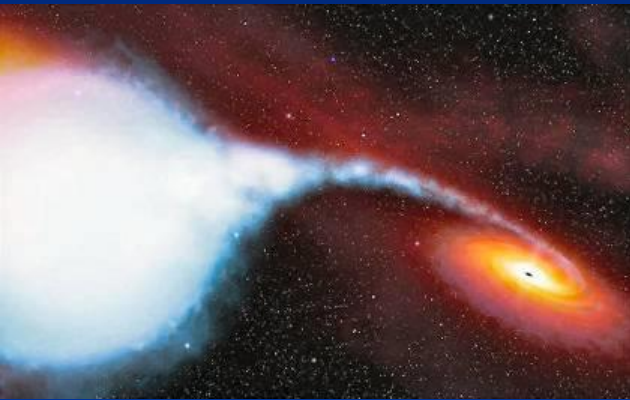
Sao neutron



- Lõi các sao có khối lượng từ 1,5 đến 3 lần Mặt Trời sẽ co sụp lại và trở thành một sao neutron vào cuối đời của ngôi sao.
- Chúng có đường kính khoảng 10 km và khối lượng riêng gấp nghìn tỉ lần nước.
- Chúng tạo thành từ neutron và các hạt ít gặp khác.
- Sao neutron trẻ quay nhanh và phát xung đều đặn ở bước sóng vô tuyến, gọi là pulsar.

Pulsar, sao neutron ở tâm của tinh vân Cua.
Source: NASA/ESA/HST

Lỗ đen



Minh họa cho Cygnus X-1, một sao sáng (trái) và một lỗ đen (phải) nằm giữa một đĩa bồi tụ.

Source: NASA.

- Lỗ đen là một thiên thể có lực hấp dẫn mạnh đến mức không gì có thể thoát khỏi nó, kể cả ánh sáng.
- Lõi của một ngôi sao lớn bất thường (hơn 30 lần Mặt Trời) sẽ trở thành lỗ đen khi hết nhiên liệu.
- Lỗ đen có thể được phát hiện khi một ngôi sao sáng quay quanh nó (hình bên).

Trường hợp đặc biệt sao biến quang

- Nhiều tàn dư của sao (sao lùn trắng, lỗ đen, sao neutron) có một sao sáng bình thường quay quanh chúng.
- Nếu khí của ngôi sao thường đó bị cuốn vào tàn dư sao thì sẽ hình thành một đĩa bồi tụ (hình bên).
- Khi khí bị cuốn vào tàn dư sao, nó có thể bùng phát hoặc phát nổ thành một sao biến quang đột biến.



Một cặp sao thường (trái) và một sao lùn trắng với một đĩa bồi tụ (phải) thu hút khí từ sao đồng hành.

Source: NASA



Phát sinh sao



Tinh vân Orion
Source: NASA

- Sao được hình thành trong mây phân tử (tinh vân) tạo thành từ khí và bụi lạnh.
- Bụi và khí liên sao chiếm khoảng 10% vật chất trong thiên hà chúng ta.
- Các sao trẻ thường nằm trong hoặc gần tinh vân mà chúng phát sinh.
- Ví dụ gần và rõ nhất là vùng hình thành sao trong tinh vân Orion (trái), cách chúng ta khoảng 1500 năm ánh sáng.



Khí liên sao



Tinh vân Orion.

Khí được kích thích bằng tia cực tím từ các sao trong tinh vân.

Source: NASA

- Khí liên sao (gồm nguyên tử hay phân tử) có thể được kích thích bằng tia cực tím từ các sao lân cận, tạo thành tinh vân phát xạ (bên trái).
- Khí lạnh giữa các sao phát ra sóng vô tuyến mà các kính thiên văn vô tuyến có thể thu được.
- 98% khí liên sao tạo thành từ hydro và heli.



Bụi liên sao



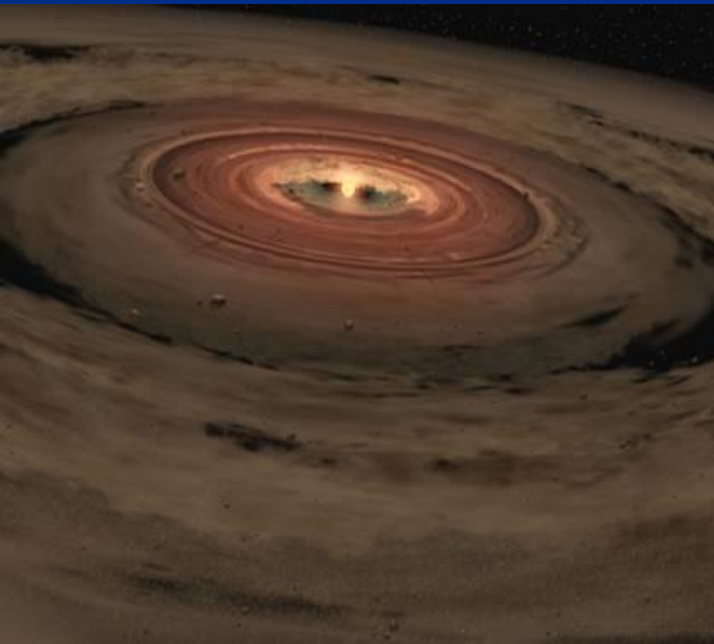
M16

Soruce: NASA/ESA/HST

- Có thể nhìn thấy được bụi liên sao gần các sao sáng.
- Bụi có thể che khuất ánh sáng từ các sao và khí ở sau (hình bên). Các sao được tạo thành trong các đám mây này.
- Chỉ 1% vật liệu giữa các sao là bụi. Các hạt bụi chỉ cỡ vài trăm nanomet và chủ yếu là silicat hoặc graphit.



Hình thành sao



- Các sao hình thành trong các phần gọi là nhân trong tinh vân, nơi đậm đặc và bị nén bởi lực hấp dẫn.
- Bảo toàn momen động lượng quay khiến nhân quay nhanh hơn, dẹt ra và cuối cùng trở thành dạng đĩa.
- Các sao hình thành ở tâm đĩa. Các hành tinh hình thành ở các vùng lạnh hơn bên ngoài của đĩa.

Minh họa hệ hành tinh đang hình thành.
Source: NASA



Đĩa tiền hành tinh

Hệ hành tinh đang hình thành



- Các đĩa tiền hành tinh đang được quan sát trong tinh vân Orion (hình bên).
- Sao có thể khó nhìn ra ở tâm đĩa vì bụi che khuất ánh sáng ở sau.
- Các quan sát này là bằng chứng trực tiếp cho sự hình thành của một hệ hành tinh.

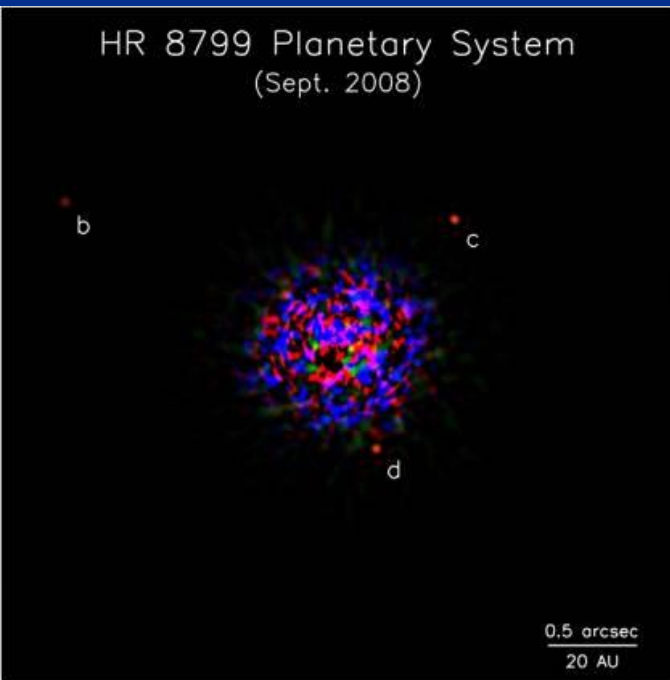
Đĩa tiền hành tinh

Source: NASA/ESA/HST



Ngoại hành tinh = hành tinh ngoài hệ Mặt Trời

- Ngoại hành tinh thường được phát hiện và nghiên cứu thông qua hiệu ứng hấp dẫn giữa nó và sao chủ hoặc ánh sáng sao chủ bị mờ đi khi nó đi qua phía trước.
- Đã chụp ảnh được rất ít ngoại hành tinh (hình bên).
- Không giống các hành tinh trong Hệ Mặt Trời, nhiều ngoại hành tinh rất lớn và rất gần sao chủ, cho phép các nhà thiên văn điều chỉnh lý thuyết về sự hình thành hệ hành tinh



Hệ ngoại hành tinh HR 8799

Source: C. Marois et al., NRC Canada



Lời kết

- “Lực hấp dẫn dẫn dắt quá trình sinh diệt của các sao” [GS. R.L. Bishop]
- Sự hình thành một ngôi sao giải thích nguồn gốc Hệ Mặt Trời và các hệ hành tinh khác.
- Cuộc đời của ngôi sao giải thích nguồn năng lượng cho phép ra đời sự sống trên Trái Đất.
- Sao sinh diệt tạo ra các nguyên tố hóa học nặng hơn hydro tạo nên sao, hành tinh và sự sống.
- Khi một ngôi sao chết, lực hấp dẫn tạo ra những thiên thể kỳ lạ nhất trong vũ trụ: sao lùn trắng, sao neutron và lỗ đen.



Cảm ơn đã lắng nghe!

