



Kosmiczne kino: narodziny gwiazd



Miljenko Čemeljić, 席門傑

Kolegium Astronomii i Nauk Przyrodniczych, SGMK,
Toruń & Warszawa, Polska



&

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, Polska



&

Institut fyziky, Univerzita Šlaski w Opavi, Czechy

&

Academia Sinica Institute of Astronomy and
Astrophysics, Taipei, Taiwan



&

European Talent Centre Croatia, Varaždin



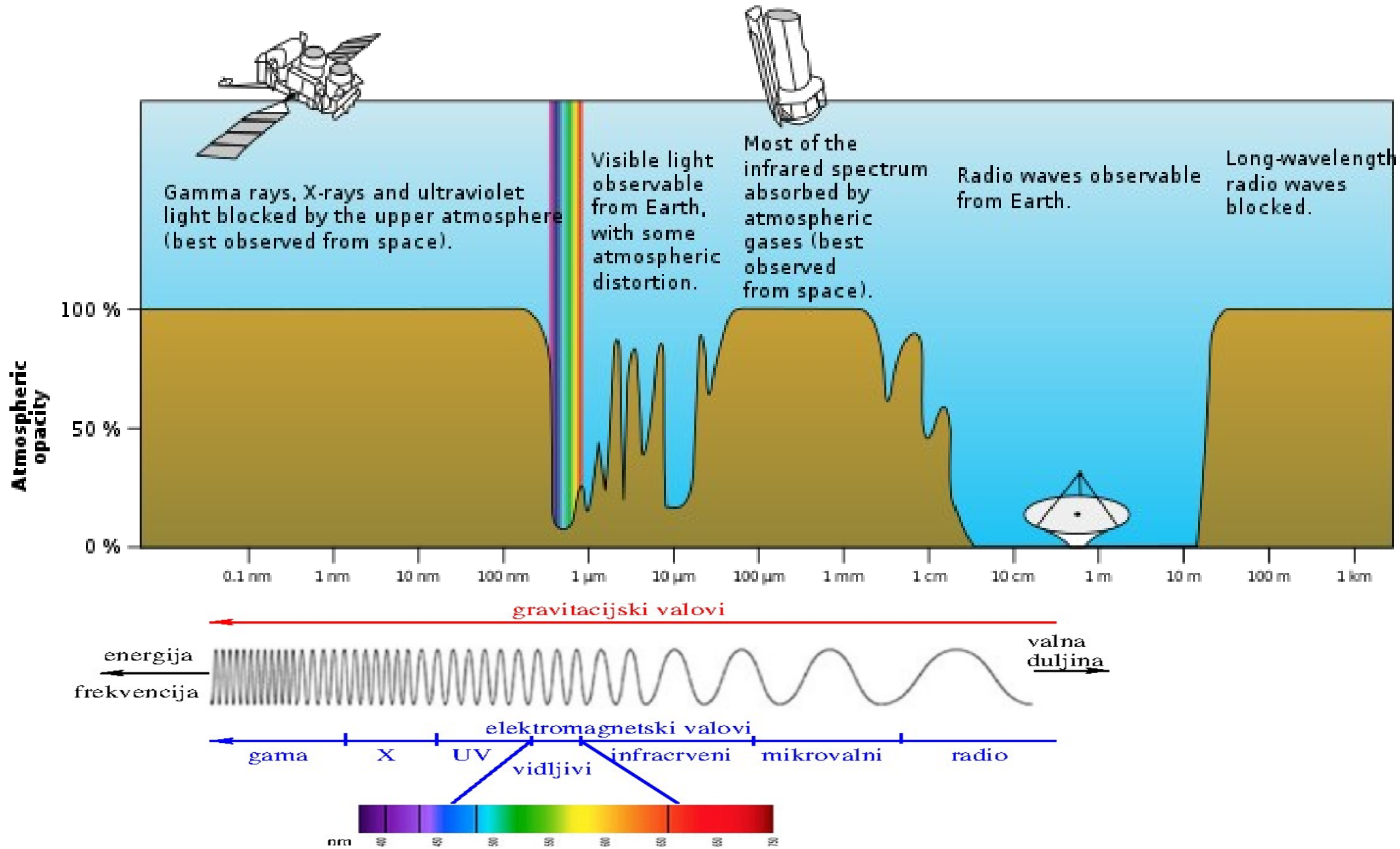
**SILESIA
UNIVERSITY**
INSTITUTE OF PHYSICS
IN OPAVA

- Nowoczesne teleskopy, po co nam tak dokładne mapy nieba?
- Nowoczesne badania nad powstawaniem gwiazd
- Jak rodzą się gwiazdy?
- Symulacje zbierania masy przez gwiazdę, strugi materii
- Sztuka wyprzedzająca naukę

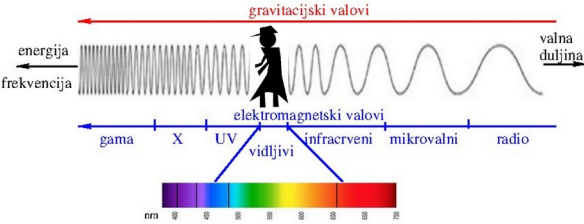
It is full of stars!



Przepustowość atmosfery



•Atmosfera ziemska jest nieprzezroczysta dla większości promieniowania.



Astronomia w widocznej części widma

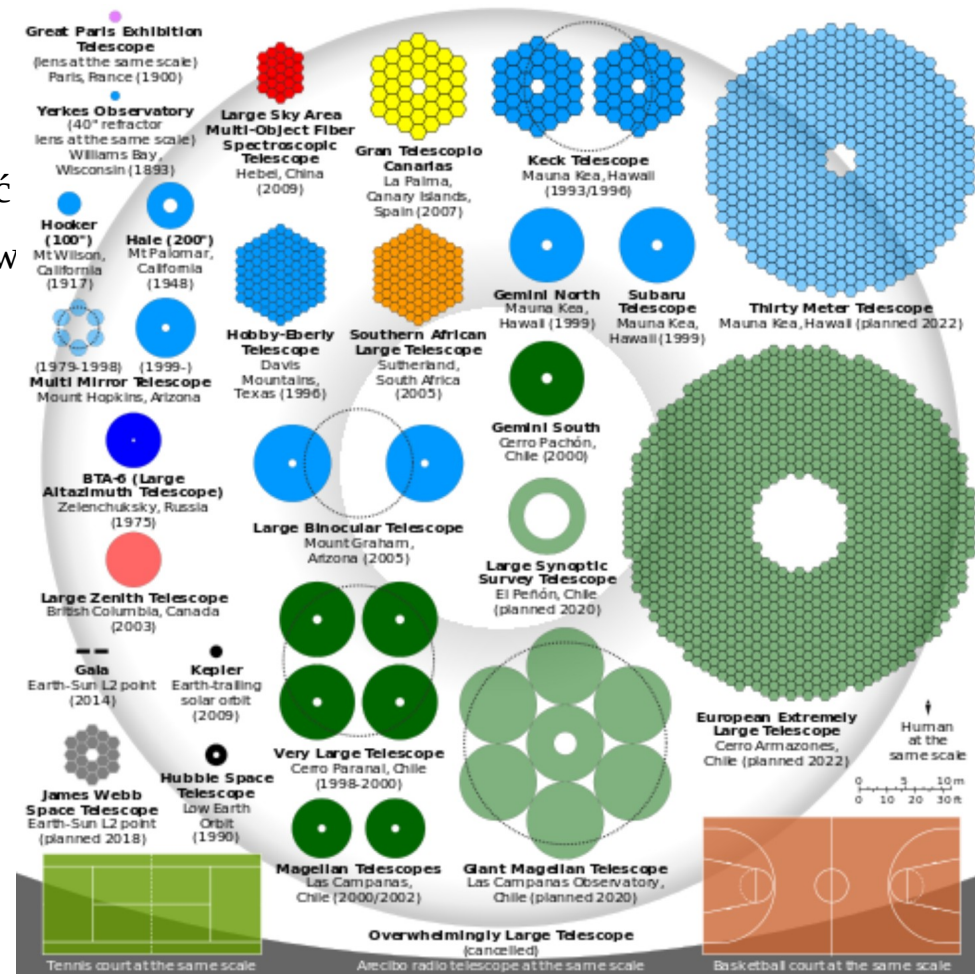
Widoczna część widma: **380-700 nm** ($1\text{nm}=10^{-9}$ metrów). Największy postęp w klasycznej astronomii optycznej polega na tym, że obecnie możemy w czasie rzeczywistym korygować zakłócenia pochodzące z atmosfery (optyka adaptacyjna), a teleskopy naziemne dzięki swoim rozmiarom mogą konkurować z teleskopami kosmicznymi. Dlatego obecnie nie ma planów wysłania w przestrzeń kosmiczną większego teleskopu optycznego.

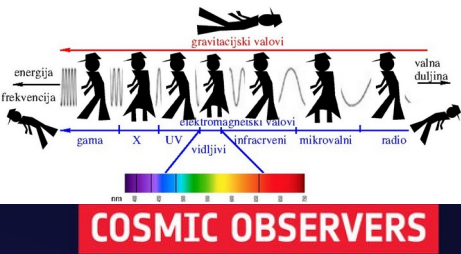
•Dzisiejsze teleskopy to często spektrografy tzn.każdy piksel kamery jest połączony kablem optycznym i natychmiast mierzy widmo – ilość danych jest niesamowita. To, co kiedyś trzeba było mierzyć tysiącami obserwacji, dziś mierzy się jedną!

•Największy teleskop w budowie (2027) ma 39m średnicy i znajduje się w Cerro Armazones, Chile. Jest większy niż Koloseum w Rzymie!

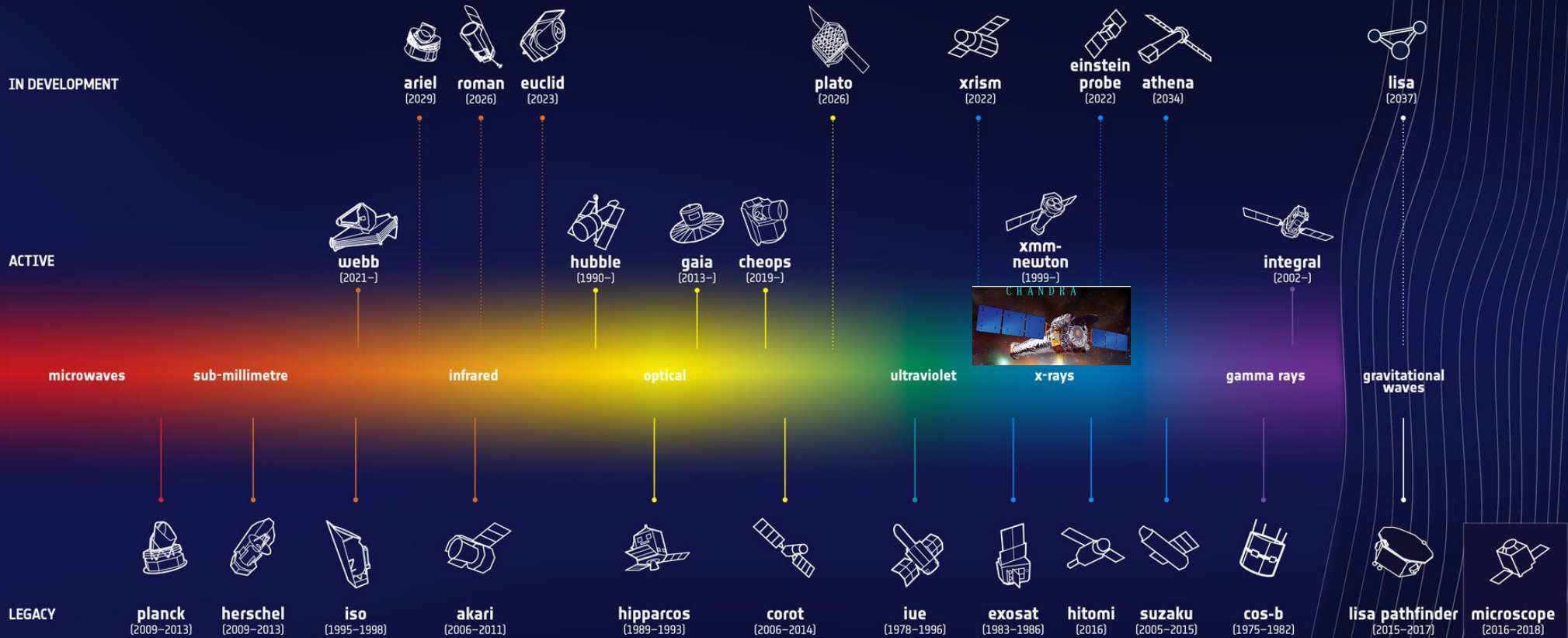
Istniejące i planowane teleskopy ze wskazanymi rozmiarami i rodzajami lustra są pokazane na rysunku po prawej.

Niektóre są dopiero w budowie, część jest dopiero planowana, a część pozostała tylko w planach. Poniżej porównanie rozmiarów teleskopów do wielkości boiska do tenisa i koszykówki.





COSMIC OBSERVERS



Wszystkie instrumenty kosmiczne są zautomatyzowane, podobnie jak zdecydowana większość współczesnych instrumentów naziemnych. Nie z powodu lenistwa astronomów czy niedostępnej lokalizacji na szczytach gór czy na pustyni, ale dlatego, że niezbędne operacje wymagają większej precyzji, szybkości i niezawodności. Do skutecznego działania tych instrumentów potrzebna jest precyzyjna mapa nieba, aby możliwie najdokładniej nimi kierować. Wraz ze wzrostem precyzji instrumentów wzrasta potrzeba dokładniejszej mapy nieba.



Astrometria, ESA: Hipparcos → Gaia

Do końca 1888 roku odległość do gwiazd zmierzono jedynie dla 34 gwiazd metodą paralaksy. Za pomocą ukończonego w 1888 roku teleskopu Jamesa Licka o średnicy 0.9m widać było 43 miliony gwiazd. Dziś widzimy kilka miliardów galaktyk.

- ESA wniosła ogromny wkład w astrometrię, konstruując najbardziej precyzyjne urządzenia do mapowania nieba. Precyzja pomiarów jest stale udoskonalana. Umożliwia to dalszy rozwój obserwacji zrobotyzowanych, które stanowią podstawę astronomii wielu nośników (multimessenger astronomy- astronomia wieloaspektowa).

The image shows two space telescopes against a starry background. On the left is Hipparcos, a smaller satellite with a boxy body and two large solar panels. On the right is Gaia, a larger satellite with a cylindrical body and a large, flat, octagonal sunshield. A small circular logo for 'THE SHAW PRIZE' is visible in the top right corner of the image area.

| HIPPARCOS | | GAIA | |
|--|-------------|---|--|
| 08 Aug 1989 | Launch Date | 19 Dec 2013 | |
| Aug 1993 | Mission End | Normal mission ended on Jul 2019, extended to 31 Dec 2025 (subject to a review in 2022) | |
| Hipparcos mission opens up the era of precision space astrometry. It catalogued over 100,000 bright stars and determined distances to over 20,000 stars with uncertainties of less than 10%. | | Significance | Gaia has measured the positions of 10,000 times as many stars as Hipparcos with accuracies 100 times higher. It has catalogued almost 1% of all the stars in the Milky Way, and so far has measured parallax-based distances to over 50 million stars with uncertainties of less than 10%. |



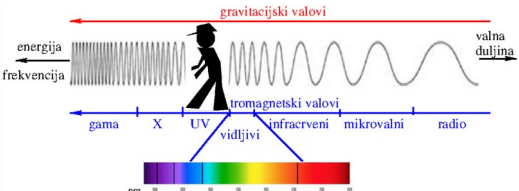
Od czasów Ptolemeusza powstało wiele map nieba. Są wśród nas tacy, którzy pamiętają katalogi Yale (Katalog Bright Star, Pickering 1884 i późniejsze dodatki, dla obiektów widzialnych do 6,5mag) i katalogi Dreyera NGC (New General Catalogue) (z 1888, obejmujące obiekty o słabszej jasności, co byłoby zwane dziś obiektami „głębokiego nieba”), które rozszerzyły i ujednoliciły dzieło „dynastii” Herschelów. To wystarczało aż do pojawienia się nowoczesnych teleskopów, z rozdzielczością sięgającą sekund łuku, ale przy wykorzystaniu interferometrii, w przypadku mikrosekund i obiektów o znacznie słabszej jasności, okazało się to niewystarczające.

Satelita Hipparcos (1989-1993) miał za zadanie precyzyjnie zmierzyć pozycje (do 2-4 milisekund łuku), odległości (paralaksy), ruchy własne, jasność i barwę gwiazd dla 120 tysięcy gwiazd w ciągu 2 i pół roku działania. Dla dodatkowych 400 000 gwiazd wykonał te pomiary z nieco niższą precyzją astrometryczną (w ramach programu trafnie nazwanego Tycho).

Satelita Gaia (2013-) (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics w ostatecznej wersji nie ma interferometru, ale nazwa pozostaje) tworzy bardzo precyzyjną mapę 3D ponad miliarda gwiazd Drogi Mlecznej (czyli około 1%), rejestrując ich ruch, jasność, temperaturę i skład. Ten satelita został zaprojektowany do przetwarzania 10 tysięcy razy większej liczby gwiazd i ze 100 razy większą precyzją niż Hipparcos. Oprócz gwiazd rejestruje parametry planet, komet, asteroid i kwazarów.

Co oznacza „wysoka precyzja”? Nie jest taka sama dla różnych gwiazd/obiektów, ale np. dla gwiazd o wielkości 10mag i jaśniejszych, 7 mikrosekund łuku – czyli np. grubość ludzkiego włosa w odległości 100 km . Do 15mag pomiary są wykonywane z dokładnością 12-25 mikrosekund łuku, a do 20mag 100-300 mikrosekund łuku, w zależności od koloru gwiazdy. Oprócz astrometrii dokonano pomiarów całej listy właściwości chemicznych i fizycznych gwiazd. Gaia nadal dokonuje rewolucji w astrometrii i katalogowaniu populacji obiektów, poprzez wyspecjalizowane katalogi niektórych typów obiektów. To „NGC” dla naszych dzieci i wnuków.

Widzialna część widma-observacje w czasie rzeczywistym

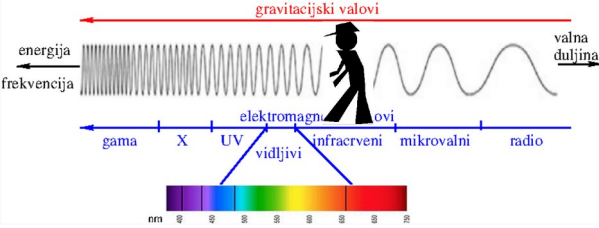


Największym instrumentem astronomicznym w czasie rzeczywistym będzie (2025 r.) LSST w Chile, o średnicy 8,4 m (Large-->Legacy Synoptic Survey Telescope), przemianowany na Obserwatorium Vera C. Rubin (astronomka z USA, zmierzyła krzywą rotacji galaktyk). Teleskop będzie działać w zakresie (320-1060) nm, rozdzielczość 0,7". Buduje go Fundacja Charlesa i Lisy Simonyi +SLAC. Jego poprzednikiem był SDSS (Sloan Digital Sky Survey, 1998-2009), wykonany za pomocą 2,5-metrowego teleskopu w Apache Point w Nowym Meksyku, USA. [Alfred P. Sloan (fundacja założona w 1934 r.) był bogatym przemysłowcem, dyrektorem generalnym General Motors.] Odpowiednikiem tego teleskopu dla nieba północnego jest WFST w Chinach.

LSSTCam to największy aparat cyfrowy (jest wielkości samochodu) jaki kiedykolwiek zbudowano do zastosowań astronomicznych; kamera szerokokątna m.in. zarejestruje całe (widzialne) niebo w 3 noce. 20 TB danych każdej nocy, w ciągu 10 lat programu do przetworzenia będzie 500PB, dlatego część informatyczna jest największym wyzwaniem.



Astronomia w podczerwieni

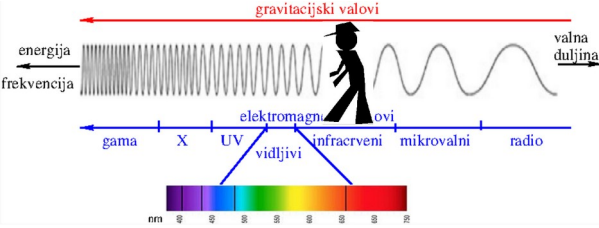


Do podczerwonej części widma nadają się te same zwierciadła stosowane w teleskopów optycznych. Problemem są detektory: aby móc mierzyć niskie temperatury (i niewielkie różnice temperatur), należy je schłodzić do jeszcze niższych temperatur, w przeciwnym razie generowałyby one szum znacznie silniejszy niż sygnał. Teleskopy muszą także znajdować się poza wpływem atmosfery, która pochłania promieniowanie podczerwone. Dlatego też pierwsze teleskopy umieszczano wysoko w górach lub przenoszono za pomocą balonów, rakiet, samolotów, możliwie jak najwyżej w atmosferze. Poniżej SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, 2010-2022), misja na zmodyfikowanym Jumbo Jet (Boeing 747, wysokość do 12 km) z lustrem o średnicy 2,5 m. Była to kontynuacja podobnych programów z lat 60. XX wieku, na samolotach Lockheed.



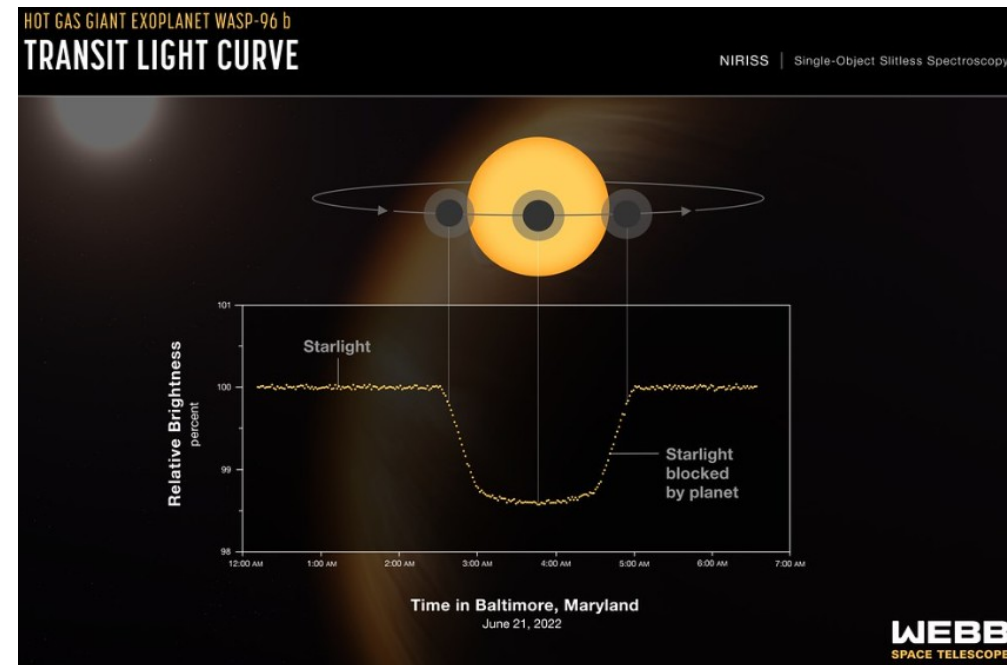
Pierwszym kosmicznym teleskopem w podczerwieni był IRAS z lustrem o średnicy 22 cali (57 cm), wystrzelony w 1983 roku i działający przez 10 miesięcy — na tyle czasu wystarczył przesłany wraz z nim gaz chłodzący (ciekły hel). To wystarczyło, aby zaobserwować około 250 tysięcy obiektów. Ponadto w ramach projektu Spacelab 2 promu kosmicznego NASA „Challenger” w 1985 r. wykorzystano 6-calowy (15,2 cm) teleskop w podczerwieni IRT, który obserwował około 60% dysku naszej Galaktyki. W latach 1995-1998 działało Obserwatorium Kosmiczne w podczerwieni (ISO) z 60-centymetrowym teleskopem we współpracy z ESA, NASA i Japonią, WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, 2009–2011) z 16-calowym (40 cm) teleskopem wykonał mapę całego nieba w podczerwieni, a później został ponownie wykorzystany jako wyszukiwarka obiektów bliskich Ziemi w misji NEOWISE (misja rozszerzona do 2023).

Astronomia w podczerwieni



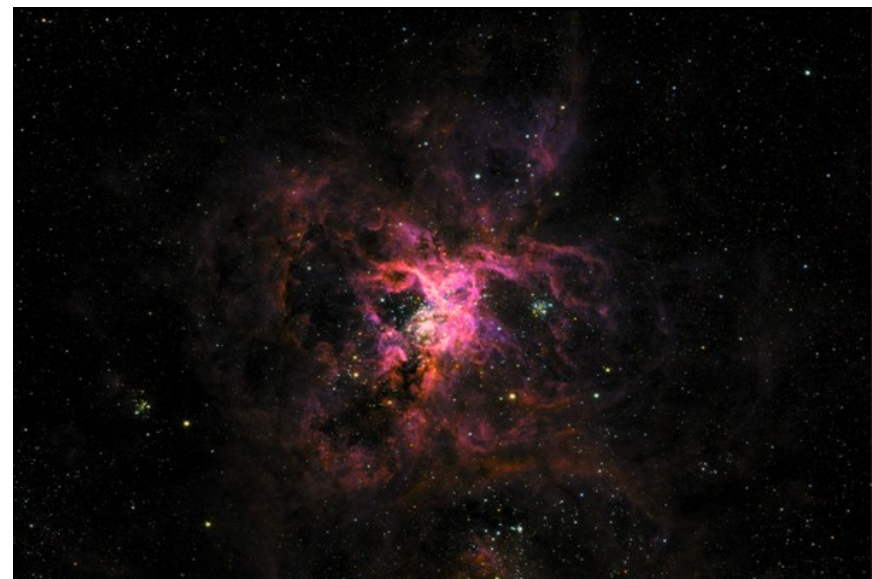
Następny był teleskop Spitzera o średnicy 85 cm, który działał w latach 2003–2009, do wykorzystania całego ciekłego helu do chłodzenia, z przedłużeniem „cieplej” części misji do 2020 r., kiedy to dwa kanały krótkofalowe mogły nadal działać prawidłowo i bez chłodzenia.

•Po nim był teleskop Herschela o średnicy 3,5 m, który był największym dotychczas teleskopem w podczerwieni (2009–2013) i został umieszczony w punkcie L2, podobnie jak jego następca, Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba (JWST), który ma lustro o średnicy 6,5 m (2022). Jednym z jego zadań jest badanie planet poza Układem Słonecznym (egzoplanet). Jest wystarczająco dokładny, aby zmierzyć przyciemnienie gwiazdy, gdy planeta przechodzi przez dysk!

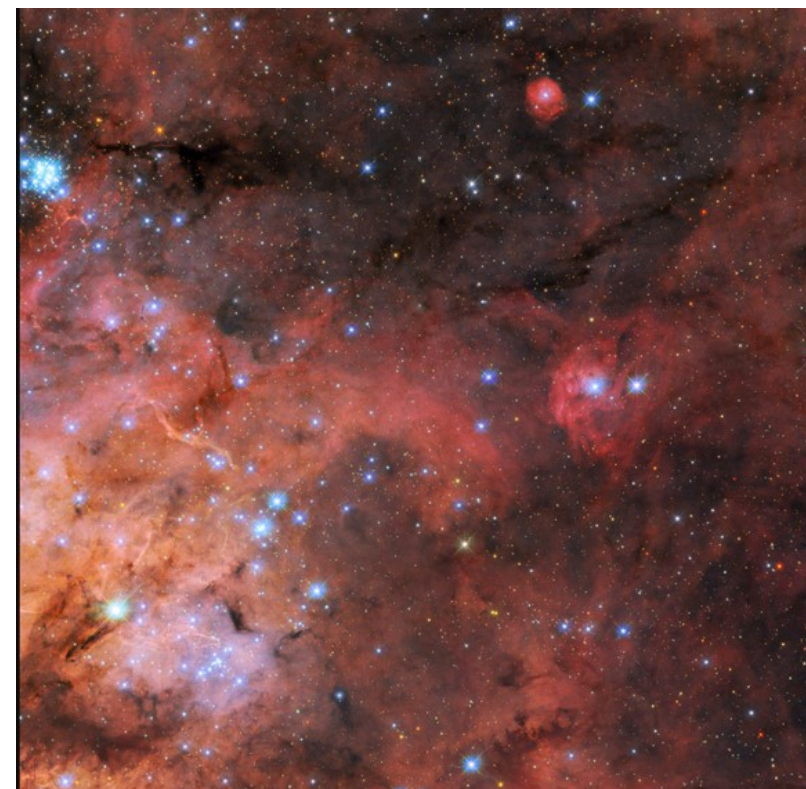


Astronomia w ultrafiolecie (UV)

Obecnie nie mamy satelity pracującego w zakresie UV, ale mamy... balony! „Super Pressure Balloon Imaging Telescope” (SuperBIT, 0.5m), który został wystrzelony 16 kwietnia 2023 roku z Nowej Zelandii latał wokół Ziemi aż przez 100 dni na wysokości około 30 km zbierając dane. Poniżej pierwsze zdjęcie przesłane przez ten instrument, Mgławica Tarantula (30 Doradus), 161 tysięcy lat świetlnych od nas, w Wielkim Obłoku Magellana. Poniżej znajduje się zdjęcie z JWST, po prawej stronie powiększenie wykonane za pomocą MIRI, instrumentu w średniej podczerwieni na JWST, na którym młode, gorące gwiazdy świecą słabo, a także widzimy gaz i pył lub węglowodory.



Zaletą balonu jest niższa cena oraz możliwość napraw, zmian, testowania, eksperymentowania ze sprzętem. Teleskop ten mieści się w granicach HST jeśli chodzi o długości fal, ale ma szersze pole widzenia. Zdjęcie z HST:



W CAMK możemy, po latach, pochwalić się nowym projektorem, to skorzystam z okazji i w końcu pokażę piękne rysunki z obserwacji i animacje wyników symulacji numerycznych. W poprzednich prezentacjach unikałem tego, ponieważ kolory nie były dobrej jakości.

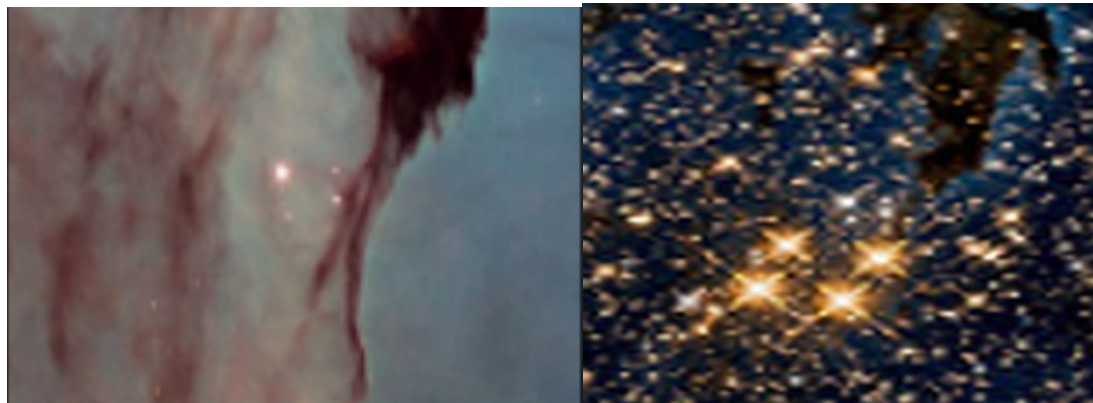
W czasach AI niby wszystko można dostać na zamówienie, ale Copilot AI Microsoftu nie potrafiła wykonać rysunku o jaki poprosiłem: “Make me a drawing of a cradle in which instead of a baby is a star. Let the background be Pillars of Creation by JWST”. Otrzymałem, między innymi, rysunek na dole. **1:0** dla ludzkości, jeszcze jesteśmy potrzebni...



“Filary Stworzenia” znajdują się wewnątrz mgławicy Orła, M16 w Smoku, swoiste gwiazdne przedszkole, na odległości około 6500 ly od nas. Hubble głównie widzi w widocznej części spektrum, ale po zainstalowaniu Wide Field 3 kamery mógł lepiej obserwować też w podczerwieni, w której JWST widzi najlepiej. W tej części spektrum widzimy przez pył, czyli widzimy więcej detali wokół rodzących się gwiazd. HST JWST



Wyciąłem detal żeby lepiej pokazać jaką różnicę robi prawie 3m większa średnica lustra.



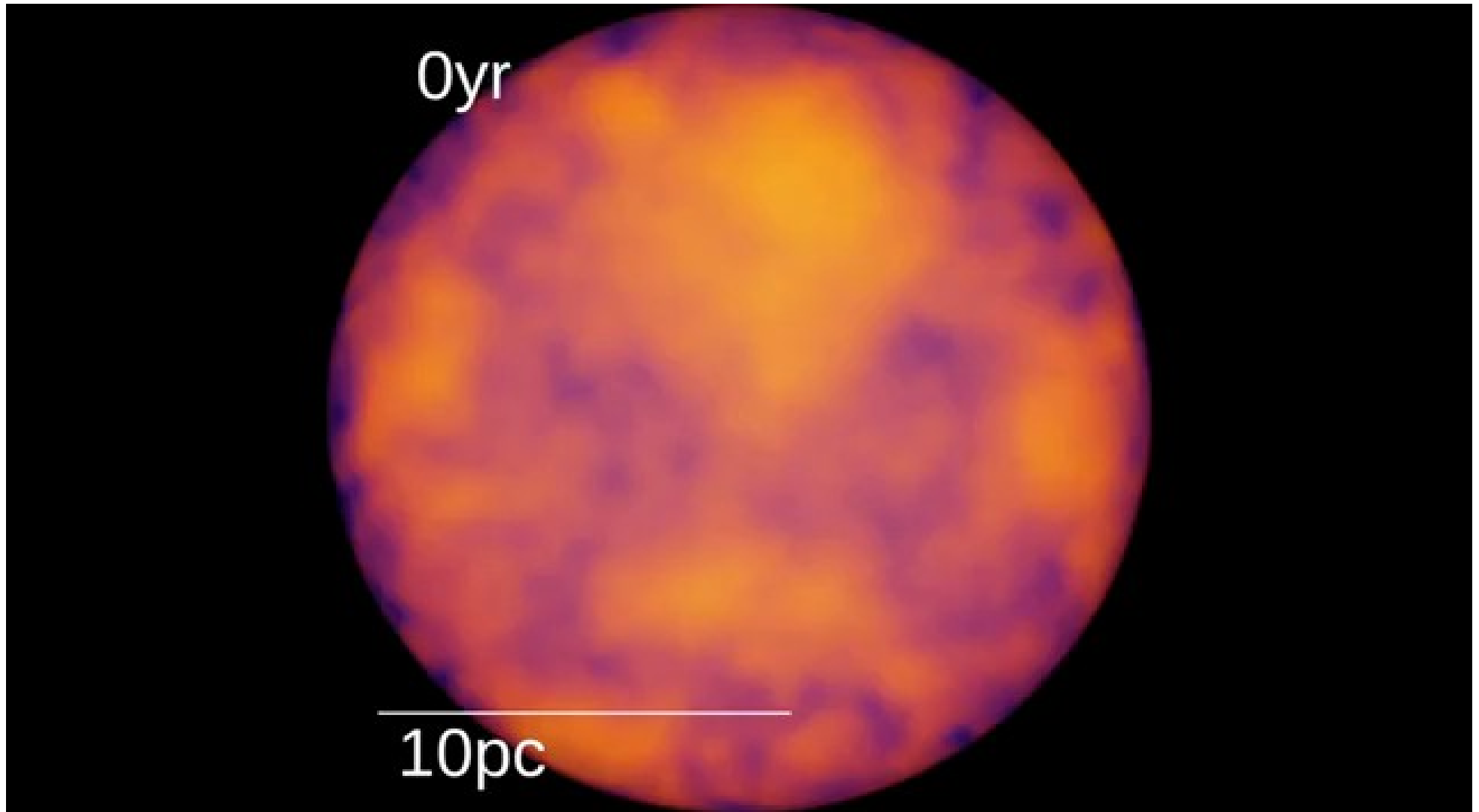
Swoją drogą, AI nie potrafiła narysować kołyski z gwiazdą nawet po 10 próbach poprawienia: “Make me a drawing of a cradle in which is a star” dało coś co tylko starodawną metodą copy-paste mogłem przerobić na rysunek, o który mi chodziło. **2:0** dla ludzkości, jeszcze.



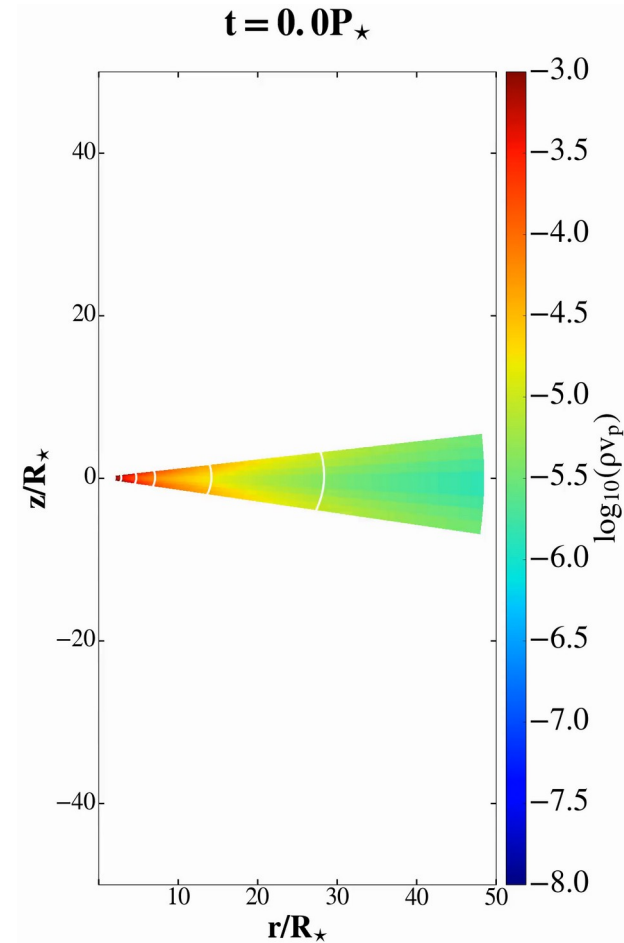
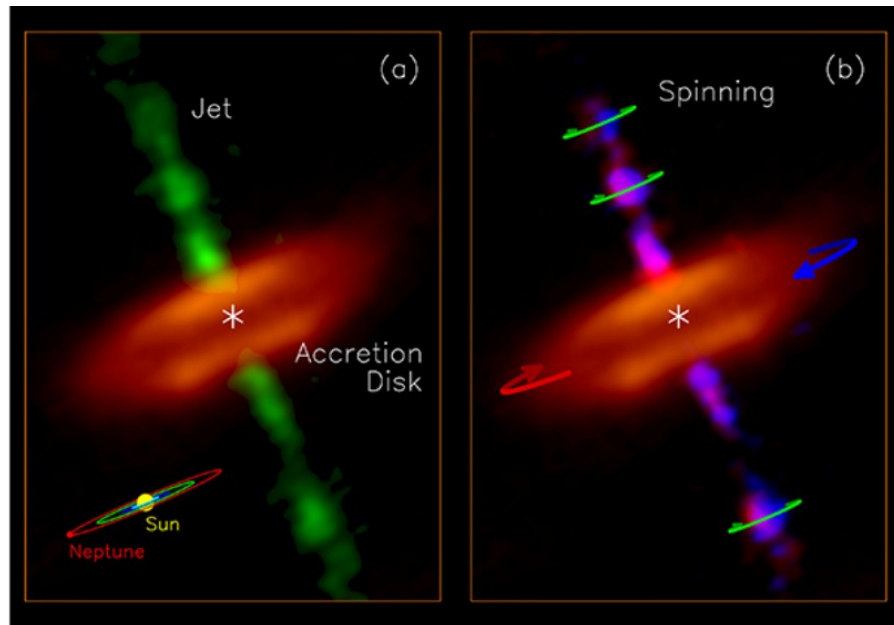
Najlepszym obrazem jaki na razie mamy z narodzin gwiazd jest wynikiem obserwacji z JWST, teleskopem kosmicznym Webba. AI będzie musiała się napracować aby coś tak pięknego stworzyć. Te “filary” są rzędu wielkości kilku lat świetlnych, tyle ile od Słońca do najbliższej innej gwiazdy, Proxima Centauri.



Jak gwiazdy powstają w takich chmurach widać na animacji wyników z pierwszej symulacji formowania się gwiazd w 20 000 mas słońca masywnej chmurze z kodem STARFORGE, CREDIT: M. Grudić



Co dzieje się w Filarach Stworzenia? Na ile to rozumiemy? Moi koledzy z Tajwanu niedawno opublikowali takie wyniki obserwacji, które wydają się potwierdzać modele które tworzyliśmy przez ostatnie 60 lat:

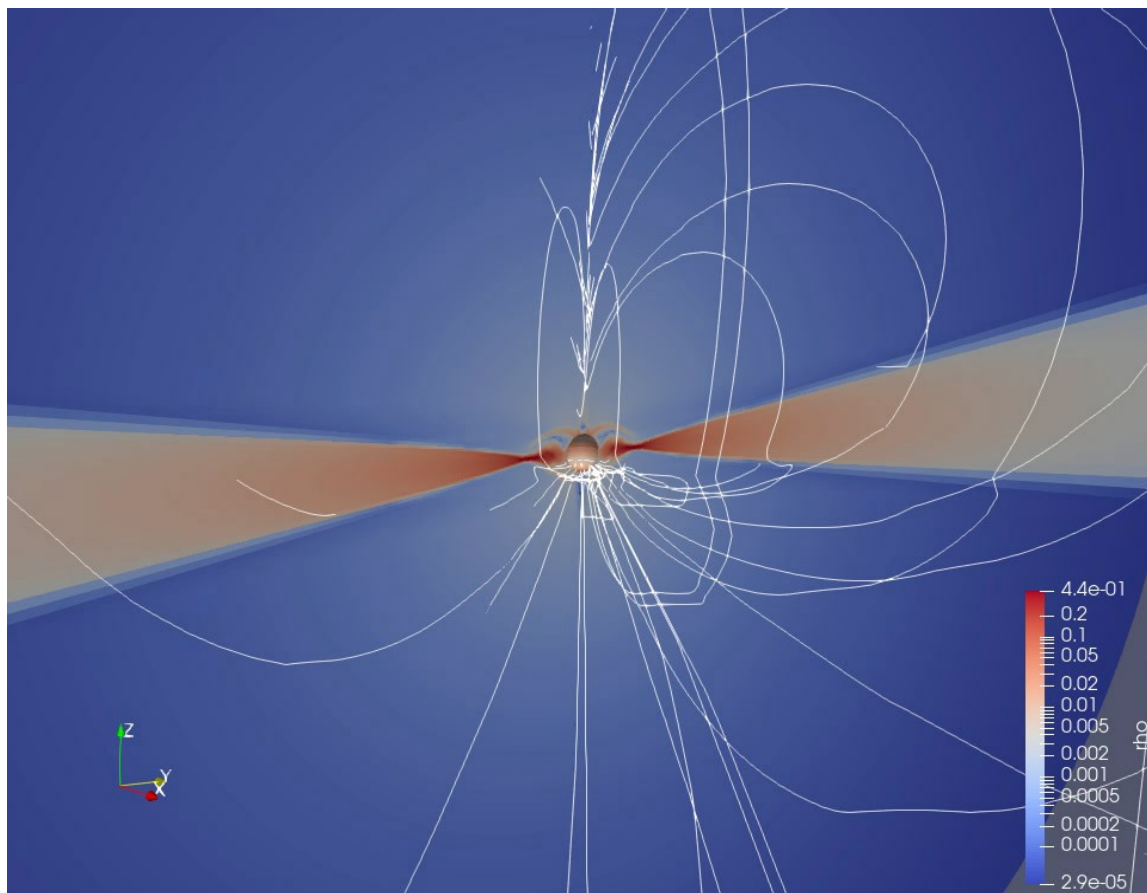


Gwiazda tworzy się z początkowego obłoku pyłu i gazu który, obracając się, zapada się do kształtu dysku, z którego często wydobywa się też wąska struga materii, wyrzucona z wielką prędkością, kilkaset kilometrów/sekundę. Z tego dysku materiał dalej spada na obiekt w centrum i tworzy przyszłą gwiazdę, na razie ogrzewaną tylko ciśnieniem spadającego materiału. Gdy gęstość będzie wystarczająca, temperatura wzrośnie z powodu ciśnienia i zapali się tam reaktor termojądrowy. Jeśli nie było by dokładnej równowagi grawitacji i ciśnienia od wytwarzanego ciepła, gwiazda wybuchła by przy zapaleniu się reaktora.

Dysk akrecyjny i strugi

Dysk koło gwiazdy jest dyskiem akrecyjnym, który powstaje przy grawitacyjnym zapadaniu się materii. Ważne jest aby zrozumieć, że ten dysk nie jest prostą płytą materiału który się sztywno kręci koło gwiazdy: na każdym promieniu prędkość rotacji jest inna, według prawa Keplera. Właśnie tarcie wewnątrz dysku między pierścieniami o różnych promieniach produkuje efekt który jest wyznacznikiem akrecji: materiał wpada do środka, ale jego moment pędu wychodzi na zewnątrz.

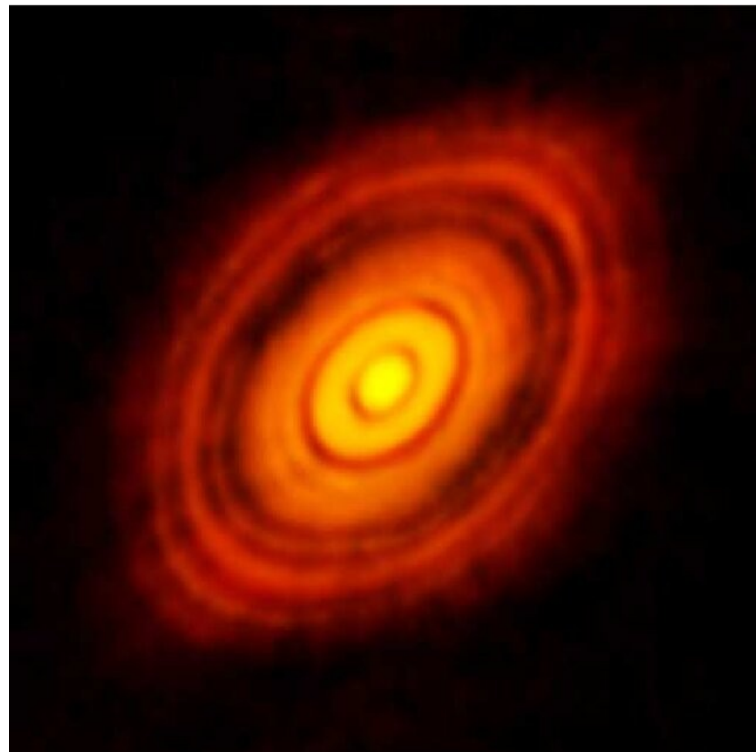
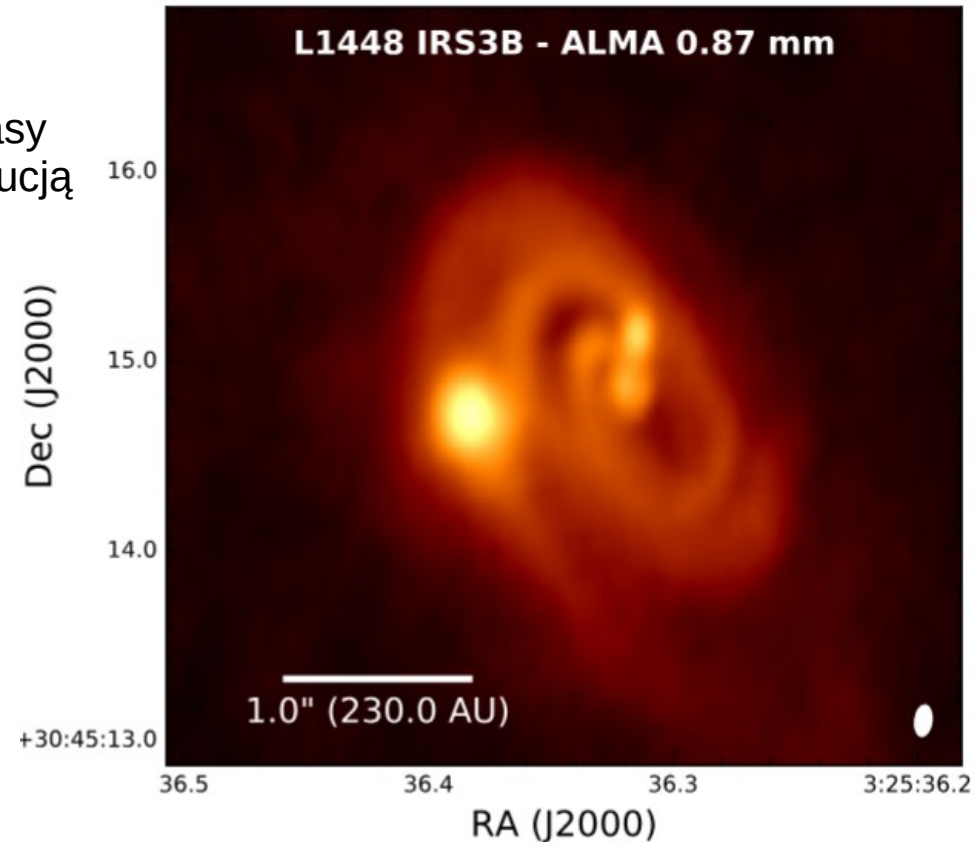
Do połowy XX wieku grawitację włączano do modelu powstawania gwiazd tylko jako siłę przyciągającą materiał do środka-pozostał podstawowy problem zmniejszenia momentu pędu początkowego materiału: $\mathbf{J} = \mathbf{R} \times \mathbf{mv}$ dla $\mathbf{R}_1 \gg \mathbf{R}_2$ daje, dla $\mathbf{J}, \mathbf{m} = \text{const}$, $\mathbf{v}_2 \gg \mathbf{v}_1$, a wiemy że gwiazdy, takie jak Słońce, nie obracają się tak szybko jak nakazywał by to moment pędu materiału którego zebrały w sobie. Rozpadłyby się!



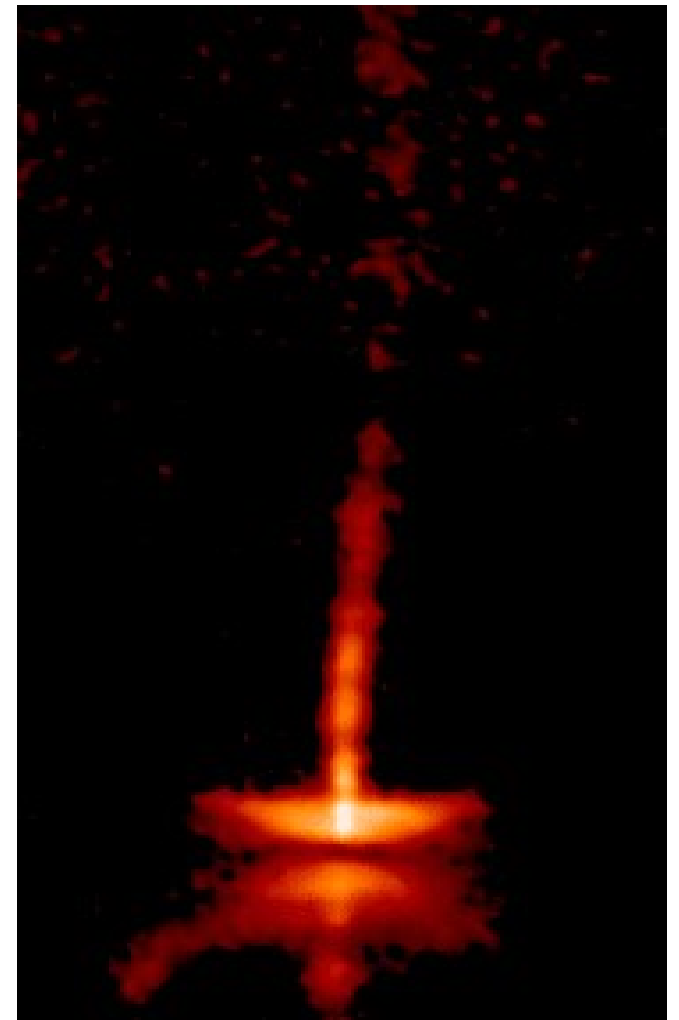
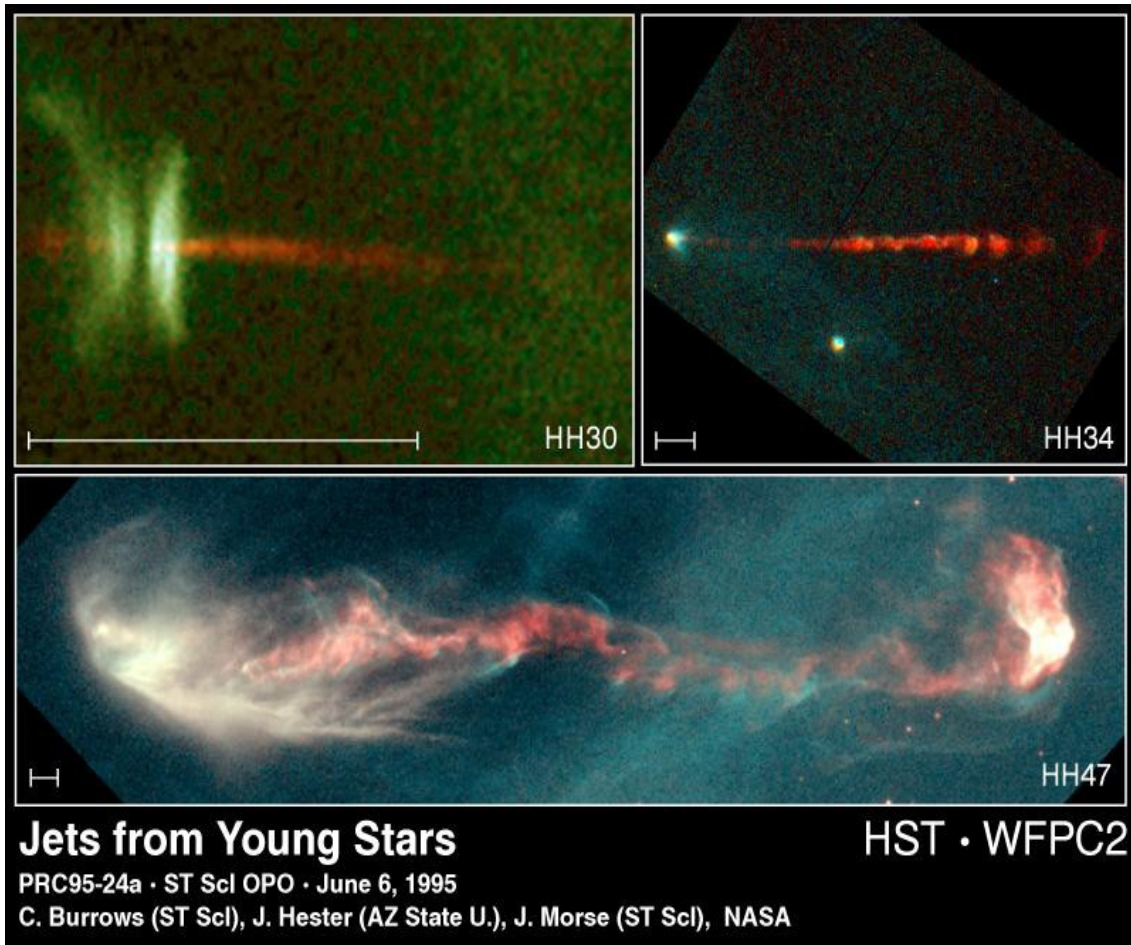
Baletnica wykonująca piruet.

Dysk akrecyjny wokół młodych gwiazd

ALMA 0.87 mm obraz dysku wokół protogwiazd, obiekt klasy 0, L1448 IRS3B w Perseuszu, obserwacja z ALMA z rozdzielczością 0.15" (45 au, jak do Plutona). Trzy jaśniejsze punkty prawdopodobnie są trzy protogwiazdy, z dyskiem wokół całego układu.



Jedna z najlepszych obserwacji dysku wokół młodej gwiazdy do dziś, z listopada 2014, lepsza od wyników z HST: ALMA 1.3 mm, obraz protoplanetarnego dysku wokół młodej gwiazdy HL Tau, 450 ly od nas. Odstępy w dysku mogłyby być wytworzone przez formowanie się planet w dysku. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

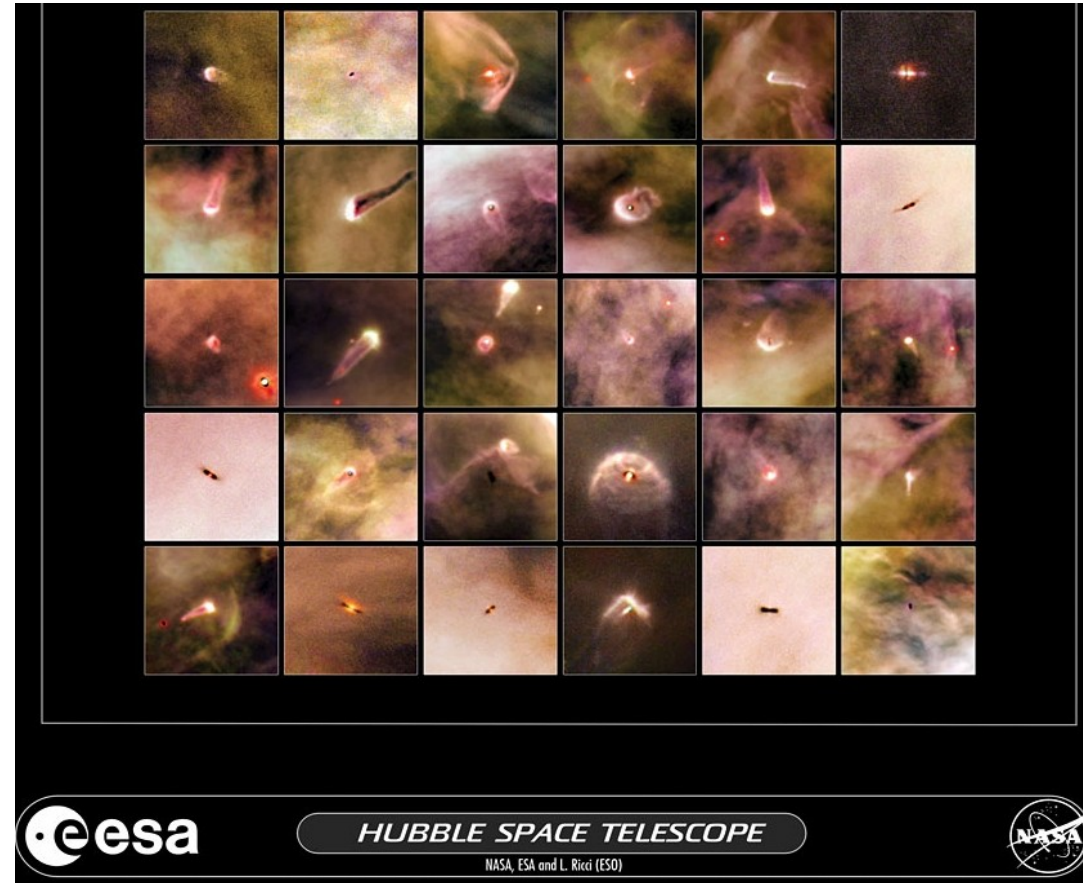
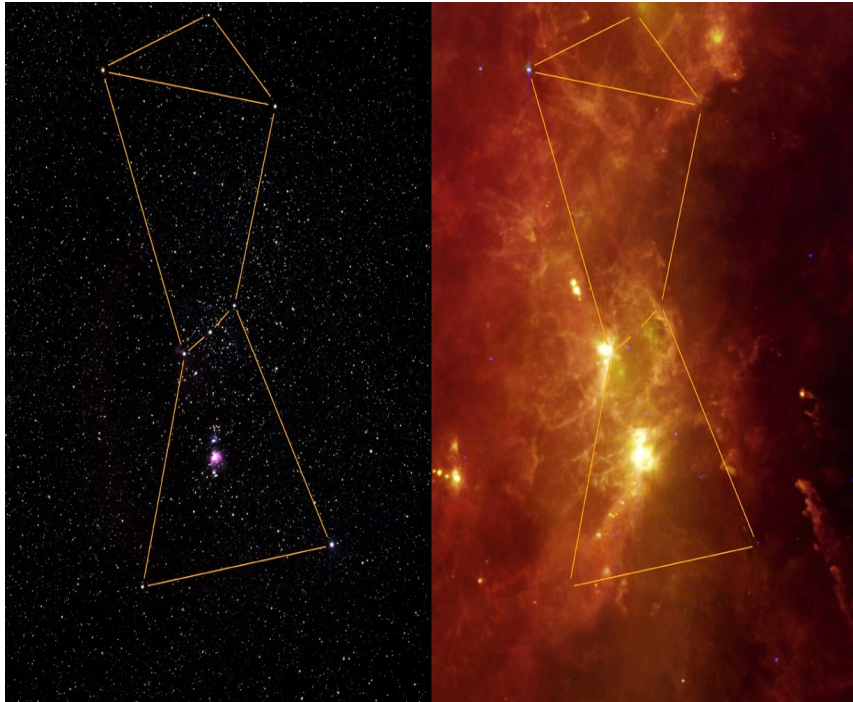


NASA HST/Wide Field and Planetary Camera 2.

Dobrze wiemy jak strugi się poruszają przez przestrzeń, bo mierzymy ich prędkość i rozmiary, ale jeszcze nie wiemy jak powstają. Widać że z dysku, ale jak, dokładnie? W jaki sposób są tak bardzo skolimowane? Skąd “węzły”, poruszająca się struktura wewnątrz strug?

Dysk akrecyjny i strugi

Rozpoznano, że strugi **zawsze** idą w parze z dyskiem akrecyjnym i że prędkość strugi jest **zawsze** bliska prędkości ucieczki z centralnego obiektu.



Zaczęto modelowanie procesu akrecji, szukamy mechanizmu wyprowadzenia momentu pędu z systemu. Pole magnetyczne wydaje się mieć istotną rolę, a dyskom często towarzyszą strugi.

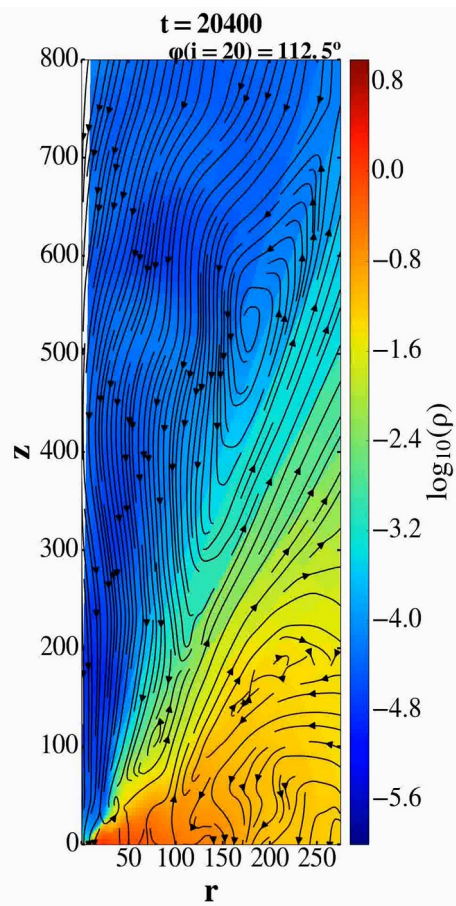
Galaktyczne dyski i strugi

Ciekawe jest, że strugi po raz pierwszy zaobserwowaliśmy w galaktykach. Przez długi czas tylko jedna galaktyka, M87 (Curtis **1918**), była przykładem galaktyki ze strugą, ale HST pokazał nam ich o wiele więcej. Czy te strugi powstają w taki sam sposób jak gwiazdne?

M87 na zdjęciu z HST.

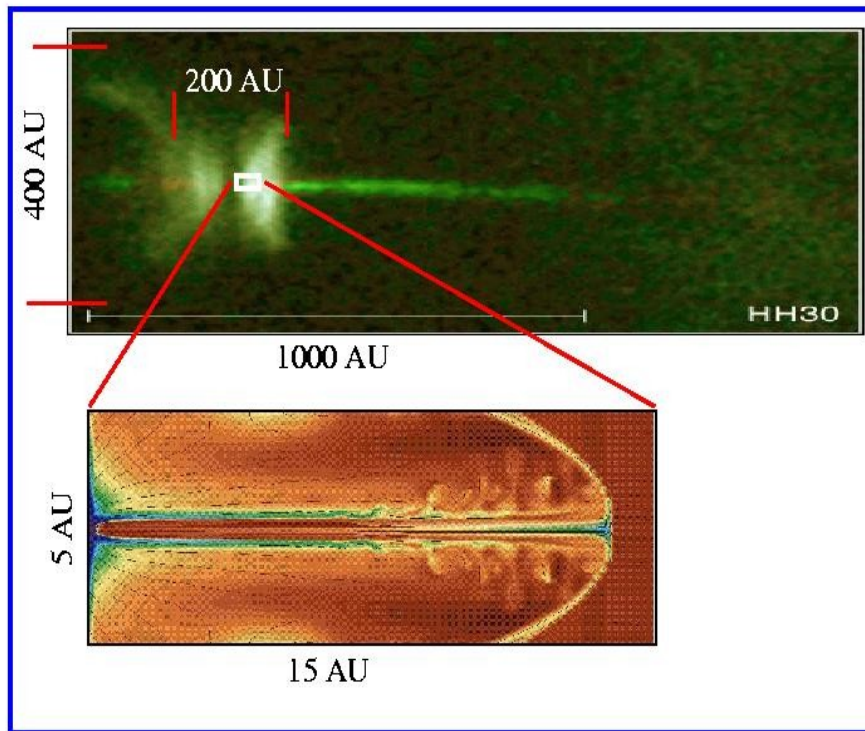


Strugi z supermasywnej czarnej dziury w centrum galaktyki Hercules A. HST i VLA radio teleskop.

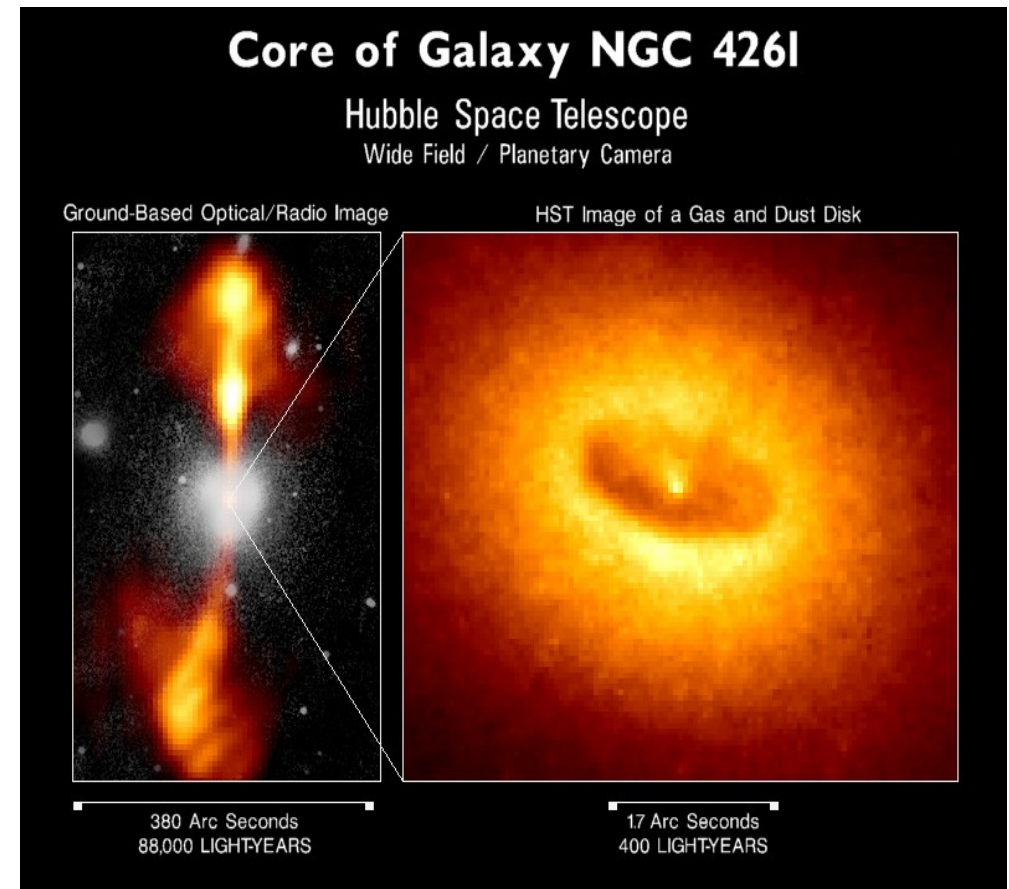


Dwie różne skale

Mamy do czynienia z podobnym zjawiskiem w dwóch skalach: gwiazdnej i galaktycznej, różnią się około 100 000 razy. Czy procesy są takie same? Jeszcze nie wiemy, bo nie mamy dokładnego modelu popartego symulacjami.



**Rzeczywistość ver. Symulacje. 100 000
AU=1.6 ly**



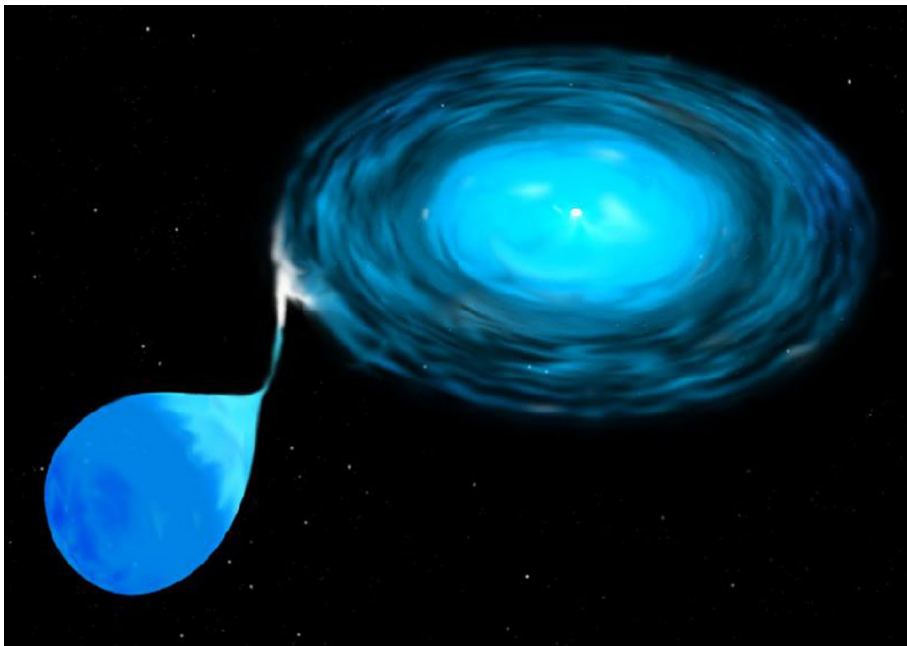
Hercules A, dysk i struga w galaktykę z supermasywną czarną dziurą.

Lista obiektów, w których obserwujemy dyski i strugi

Aktywne jądra galaktyk (AGN), które w środku mają supermasywną czarną dziurę (do kilkuset milionów mas Słońca) są największymi obiektami produkującymi strugi.

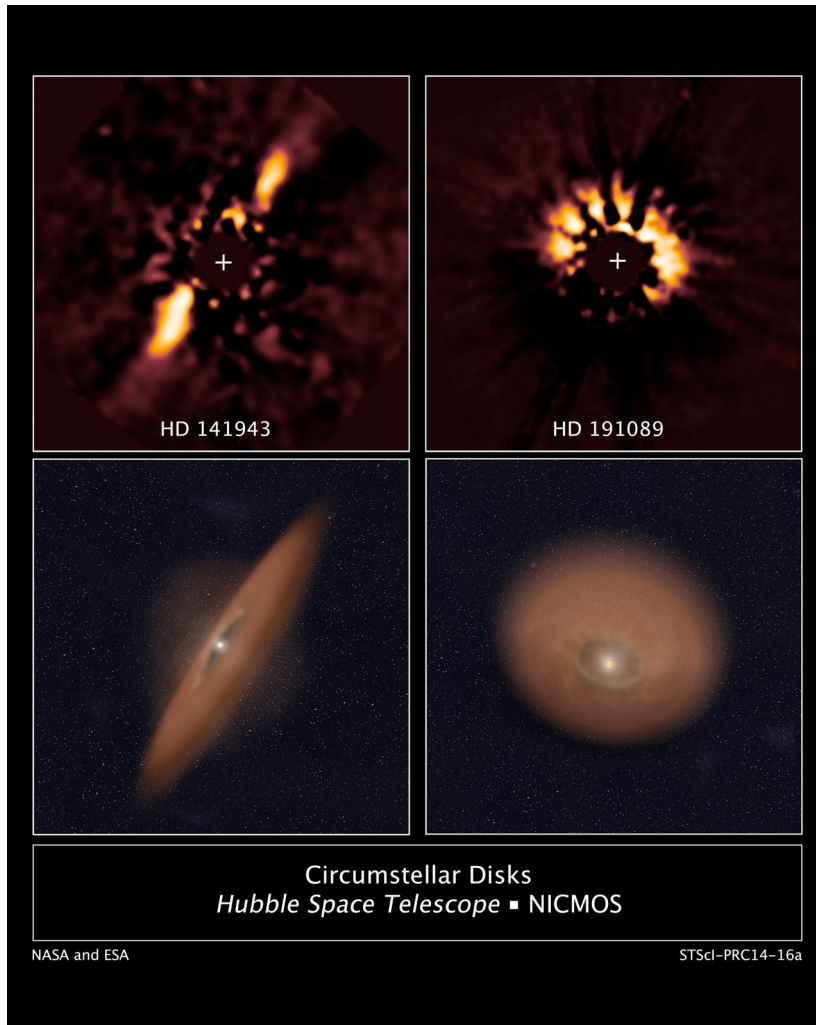
Strugi z obiektów wielkości gwiazd obserwujemy w:

- **Młodych gwiazdach** z dyskiem akrecyjnym (protogwiazdy).
- **Gwiazdach neutronowych** albo **czarnych dziurach** z dyskiem akrecyjnym, zwykle w układach podwójnych z materią z innej, większej gwiazdy
- **Białych karłach** z dyskiem akrecyjnym, w podwójnych układach białego karła z większą gwiazdą lub gwiazdą neutronową.



Rysunek artystyczny (credit: STScI) zmiennej kataklizmicznej. Biały karzeł wewnątrz dysku materii spadającej z normalnej gwiazdy nieco mniejszej masy od masy Słońca.

Dysk akrecyjny wokół młodych gwiazd



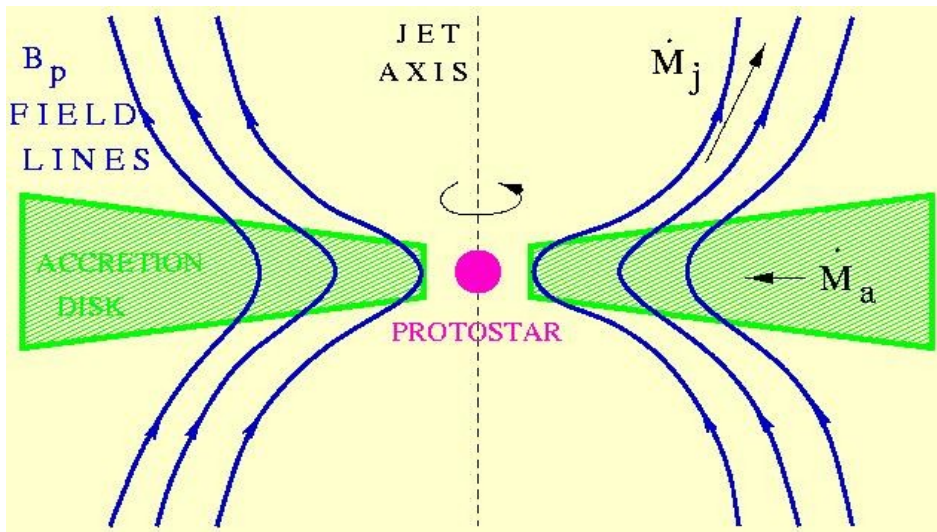
Spójrzmy dokładniej na dysk akrecyjny wokół młodej gwiazdy. Co jest potrzebne do modelu takiego dysku? Ważne, bo tłumaczy powstawanie planet!

W 1970-tych Shakura & Sunyaev obliczyli model hydrodynamiczny, w którym do transportu momentu pędu poza system potrzebna jest dysypacja: lepkość=tarcie wewnętrzne podczas przepływu.

Lepkość powoduje, że moment pędu materii w sąsiednich warstwach dysku jest, na wskutek tarcia wewnętrznego, wyprowadzany na zewnątrz.

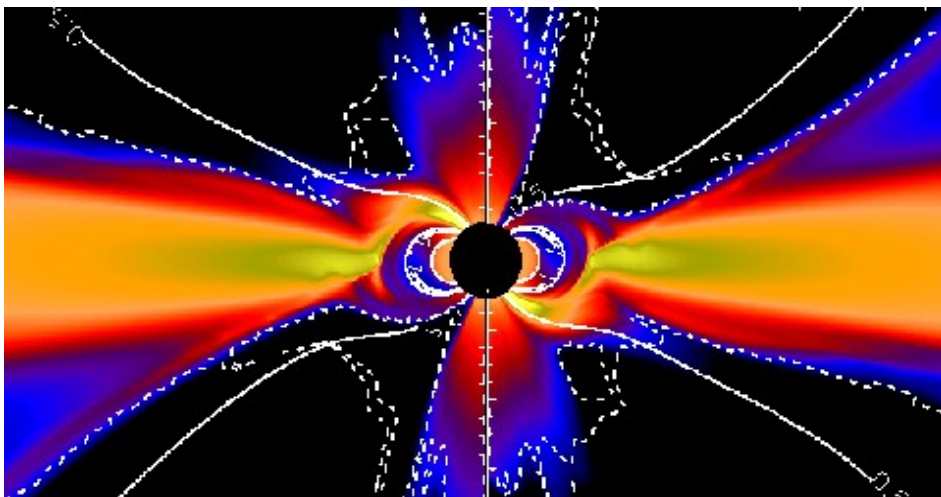
W dokładniejszych rachunkach okazało się, że taki dysk byłby niestabilny. Też, nie wytłumacza to strug.

Skąd pole magnetyczne w gwiazdach?



Do ustabilizowania i, jak się okazało, w ogóle tworzenia stabilnego dysku, trzeba było uwzględnić pole magnetyczne i jego dysypację: dyfuzję pola magnetycznego, którą mierzymy oporem elektrycznym materiału.

Pole powstaje w dwa sposoby: **a)** zbieraniem linii pola międzygwiazdowego przy kontrakcji materiału i **b)** efektem dynamo spowodowanego rotacją zionizowanego gazu.



Bonus: strugi byłyby wtedy też wynikiem działania pola magnetycznego. Wydaje się to być jedyną możliwością dla tak perfekcyjnej kolimacji wyrzuconej materii.

Skąd pole magnetyczne w kosmosie?

Skąd bierze się pole magnetyczne w kosmosie i jakiej jest mocy?

Nie wiadomo dokładnie skąd. Początkowo nieistniejące albo bardzo małe pole magnetyczne w kosmosie było wzmacniane w trakcie ewolucji gwiazd w galaktykach. Turbulencje umożliwiają efekt dynamo w trakcie rotacji gazów i pole jest lokalnie wzmacniane.

- Pole magnetyczne na powierzchni Ziemi wynosi około 0.3 Gauss (w SI to $0.3 \times 10^{-4} \text{T}$).
- Na powierzchni Słońca wynosi 1 Gauss, protogwiazd kilkaset Gauss
- Na białych karłach 10 000 do milion Gauss.
- Na gwiazdach neutronowych w niektórych układach podwójnych (pulsary milisekundowe) wynosi około 100 milionów (10^8) do 10^{12} Gauss, czy 10^{15} Gauss na magnetarach, gwiazdach neutronowych o silniejszym niż przeciętne pole magnetyczne.
- Pole magnetyczne w galaktykach jest mocy 10μ (10×10^{-6}) Gauss, pomiędzy galaktykami $1 \mu\text{Gauss}$.

Symulacje gwiazdy i dysku

Spróbujemy rozwiązać choćby część problemu: **gwiazda+dysk**.

Rozwiązujemy równania **nie**-idealnej magneto-hydrodynamiki (MHD) – ”**nie**”, bo bierzemy pod uwagę dysypację spowodowaną lepkością i oporem – równania są znane od 150 lat, ale nie da się ich, w przypadku dysków magnetycznych, rozwiązać na tablicy. Potrzebne są komputery. Dzisiejsze komputery radzą sobie z nimi coraz lepiej. W sumie dziś wyzwaniem jest wynaleźć dobre algorytmy do rozwiązywania, a nie tylko używać szybkich komputerów.

Ponieważ rozwiązania są bardzo skomplikowane, porównania z obserwacjami są konieczne, żeby nie zabłądzić w pięknej teorii i modelach.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \left(P + \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}}{8\pi} \right) \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} - \boldsymbol{\tau} \right] = \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(E + P + \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}}{8\pi} \right) \mathbf{u} - \frac{(\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B}}{4\pi} \right] + \nabla \cdot [\eta_m \mathbf{J} \times \mathbf{B} / 4\pi - \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}] = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} - \Lambda_{\text{cool}}$$

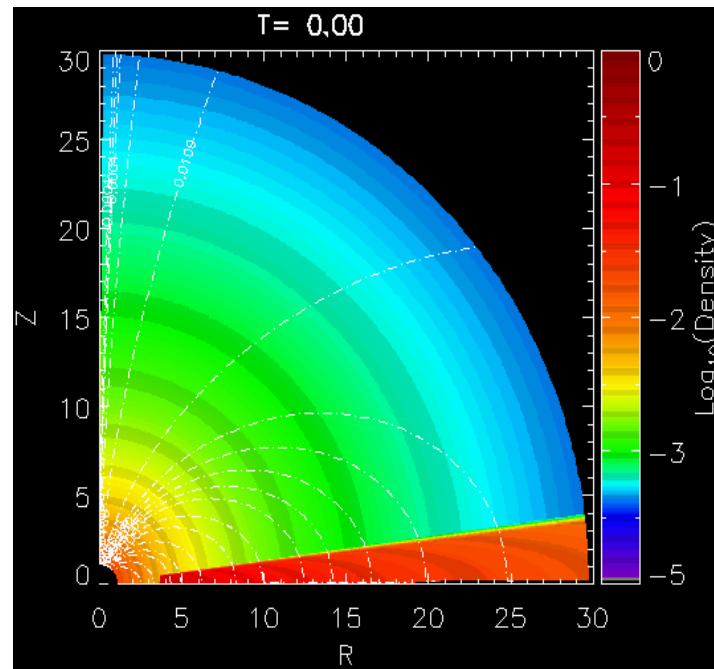
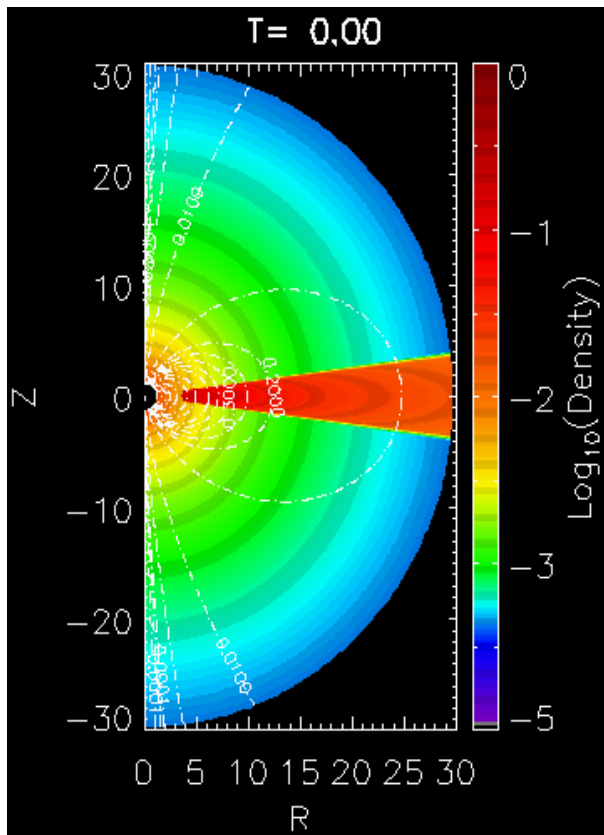
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{B} \times \mathbf{u} + \eta_m \mathbf{J}) = 0.$$

Równania do rozwiązania. Pojawia się kolejny problem: koeficjent dyfuzji pola magnetycznego η w tych równaniach jest kilka rzędów wielkości większy od liczby którą dostajemy z obliczeń mikroskopowych dla materiału w dysku. Do tego potrzeba turbulencji w dysku. Jak na razie nie mamy dokładnego modelu tego zjawiska.

Symulacje gwiazdy i dysku

Istnieje więcej modeli dysku akrecyjnego. Jedynym z nich z 3D analitycznym rozwiązaniem jest model prof. Kluźniaka, dziś w CAMK, i jego doktoranta z Madison Uni. w USA, D. Kita (PhD 1995): Kluźniak & Kita (2000)- model **hydrodynamiczny**. W swoich symulacjach ustawiam taki dysk, powierzchnie gwiazdy i początkowo nie objacającą się koronę gwiazdy w równowadze hydrostatycznej. Zakładamy, że stabilny dysk jest osiowo symetryczny. Dla skrócenia obliczeń w niektórych symulacjach można jeszcze założyć, że dysk jest taki sam ponad i poniżej płaszczyzny równikowej. Dodaję pole magnetyczne.

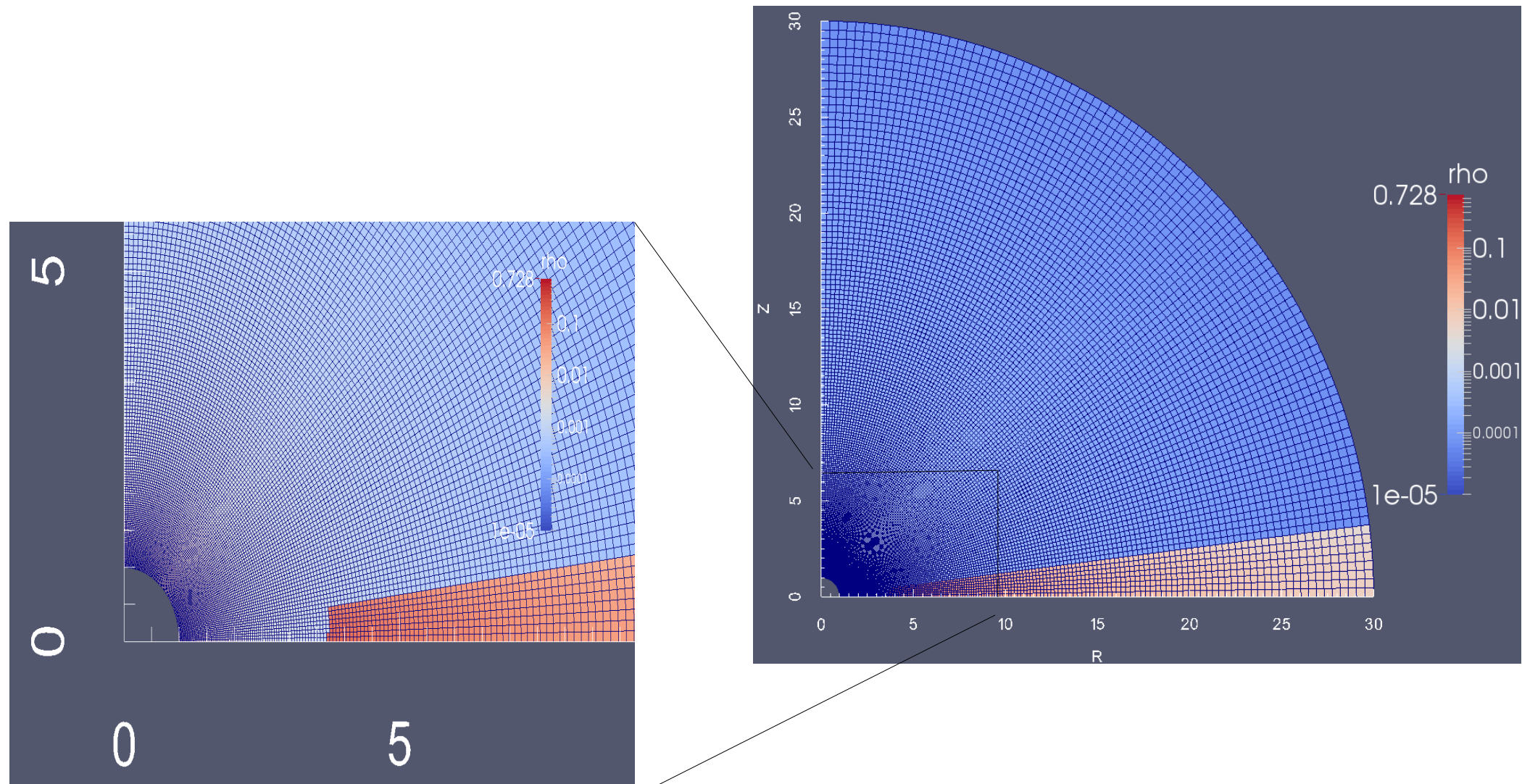
a) pełna płaszczyzna $\theta=[0,180]$ b) pół płaszczyzna $\theta=[0,90]$, w sferycznym układzie współrzędnych.



Rysuję gęstość materii w skali logarytmicznej, żeby lepiej było widać różnicę gęstości. W przypadku a) dostaniemy wynik bliżej pełnego 3D, bo nie zakładamy symetrii względem płaszczyzny równikowej dysku.

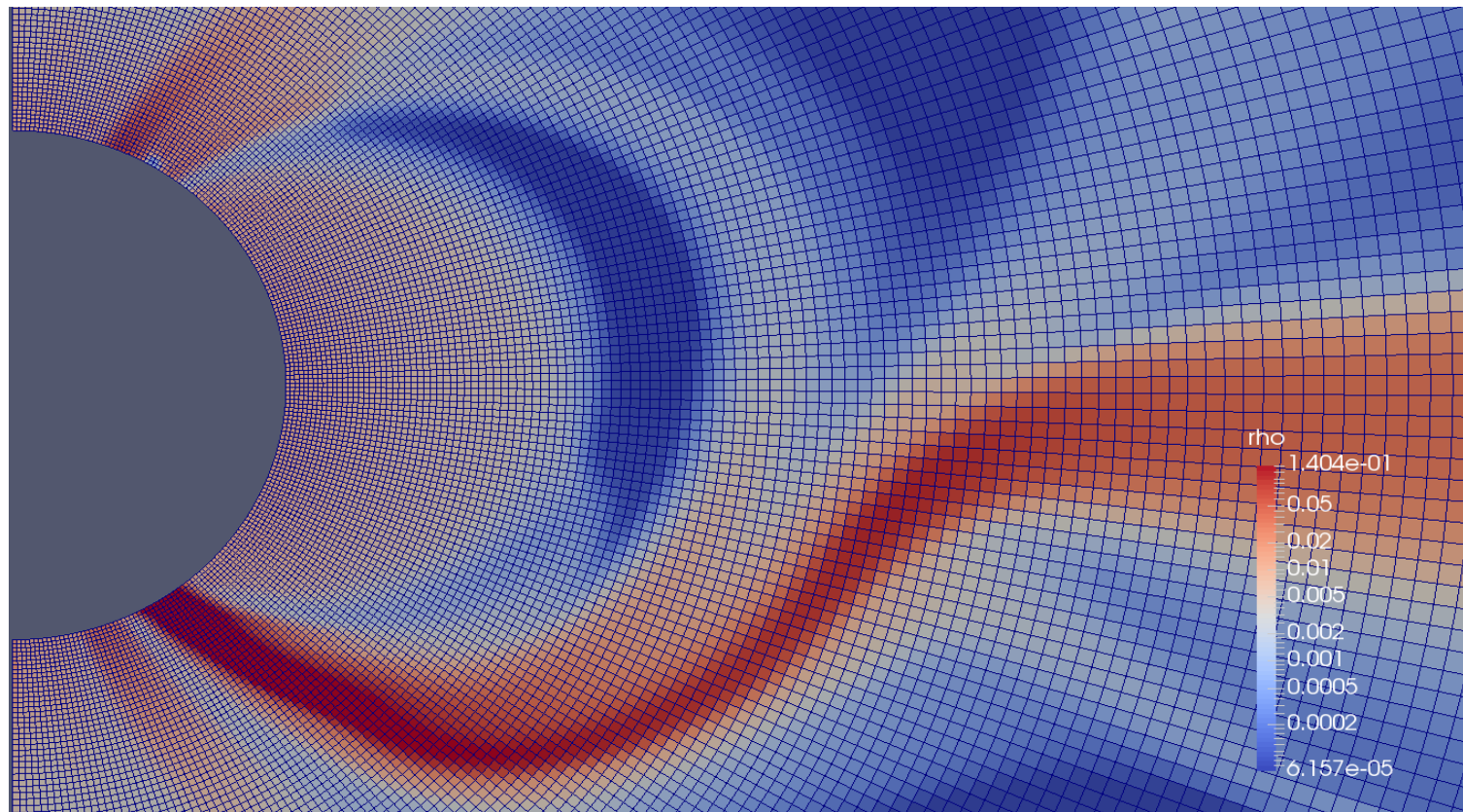
Symulacje gwiazdy i dysku

W symulacjach w zasadzie rozwiązujemy równania na siatce. Rezolucja wynosi $R \times \theta = [217 \times 100]$ pól w siatkę. Siatka jest logarytmicznie wzrastająca w kierunku promieniowym i równomierna w kierunku polarnym. W taki sposób otrzymujemy najlepszą rezolucję w pobliżu gwiazdy.

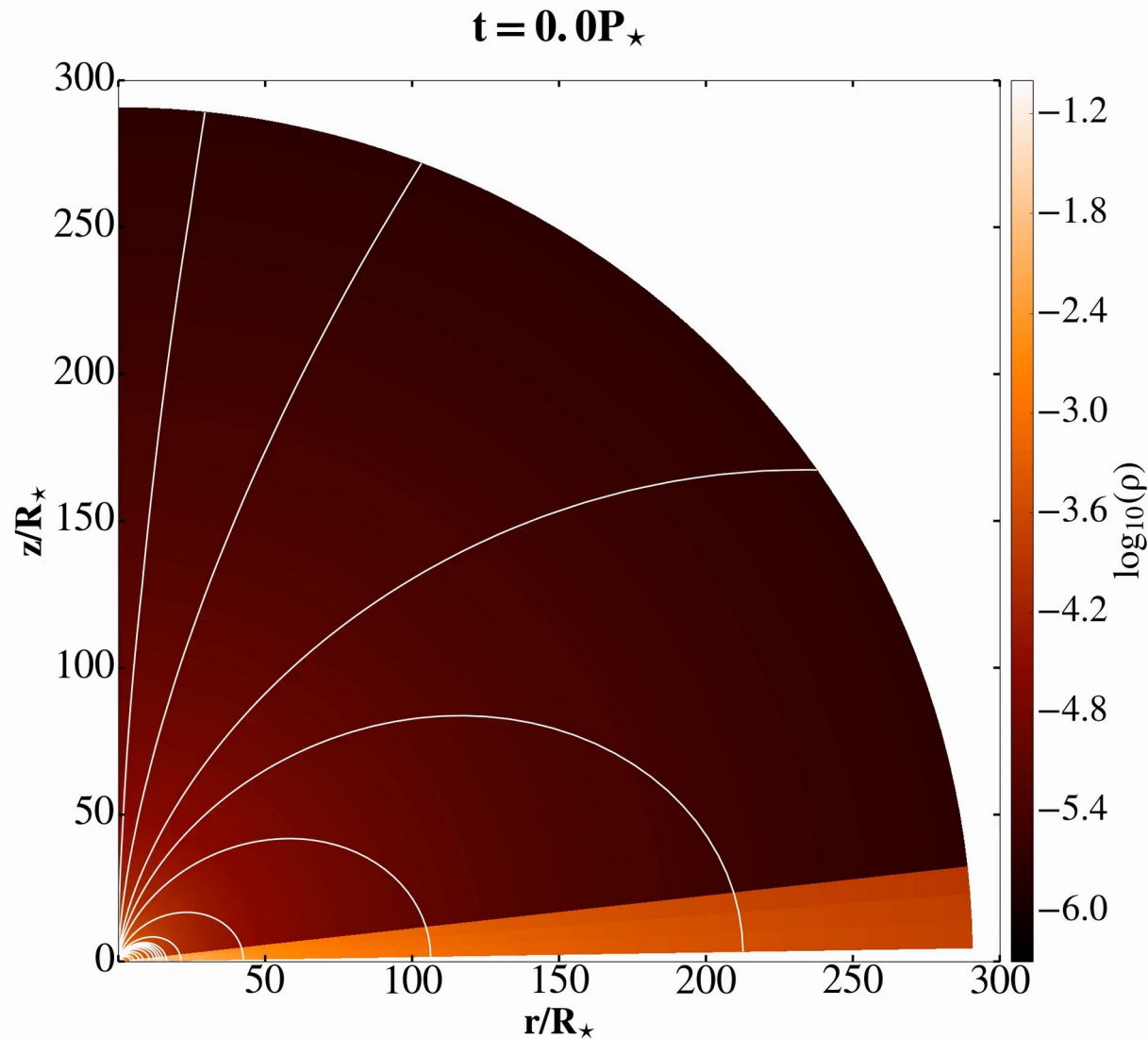


Symulacje gwiazdy i dysku

Żeby poprawnie rozwiązać równania numerycznie, potrzebne jest żeby ilość pól siatki dla struktury którą chcemy obliczyć była większa od liczby zmiennych. W moich symulacjach materia spada na gwiazdę przez tzw.kolumnę akrecyjną. Na przykładzie poniżej widać że mamy wystarczającą liczbę pól siatki: gęstość, ciśnienie i 3 komponenty prędkości i pola magnetycznego= $1+1+3+3=8$.

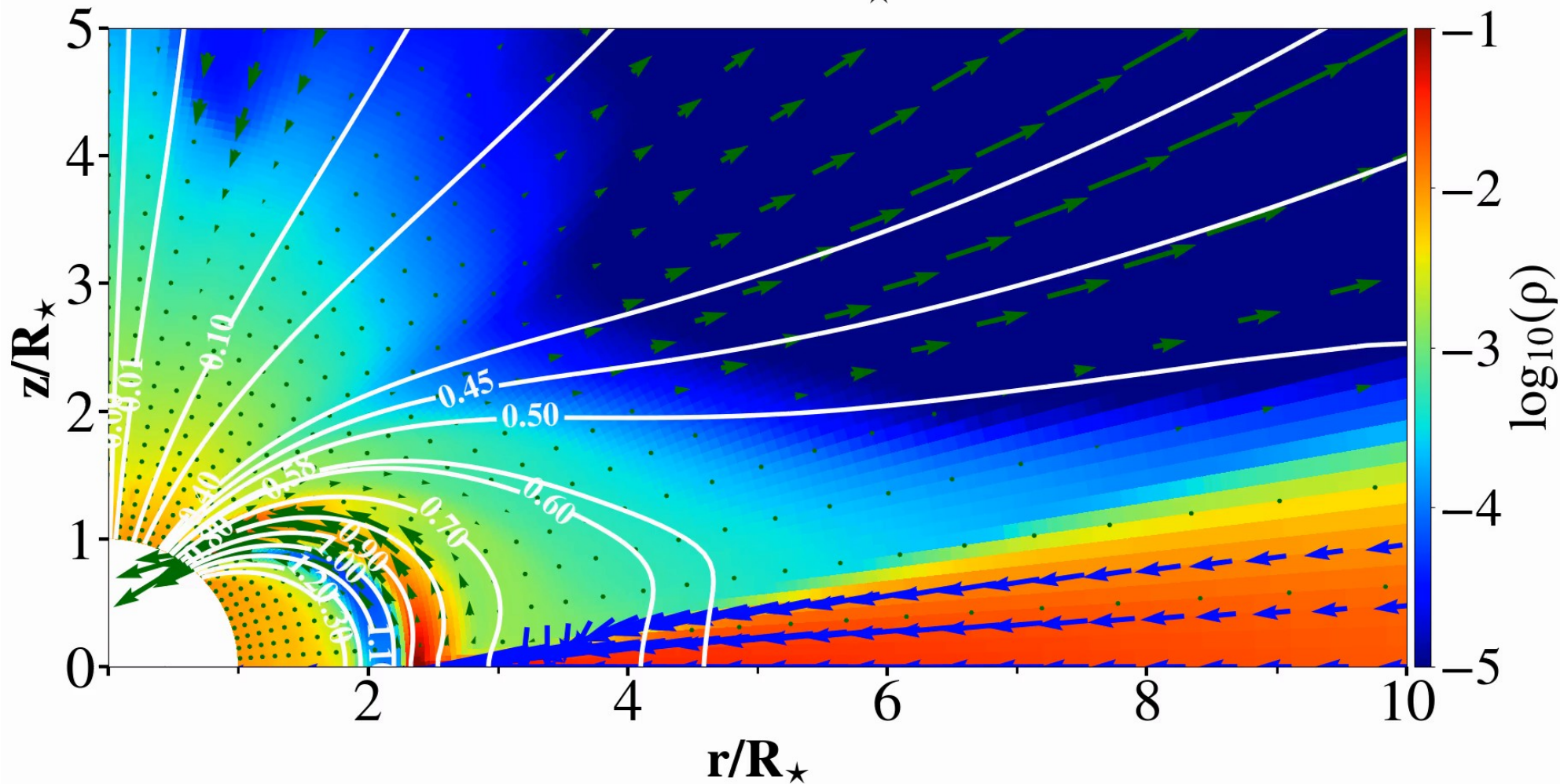


Wyniki symulacji gwiazdy i dysku



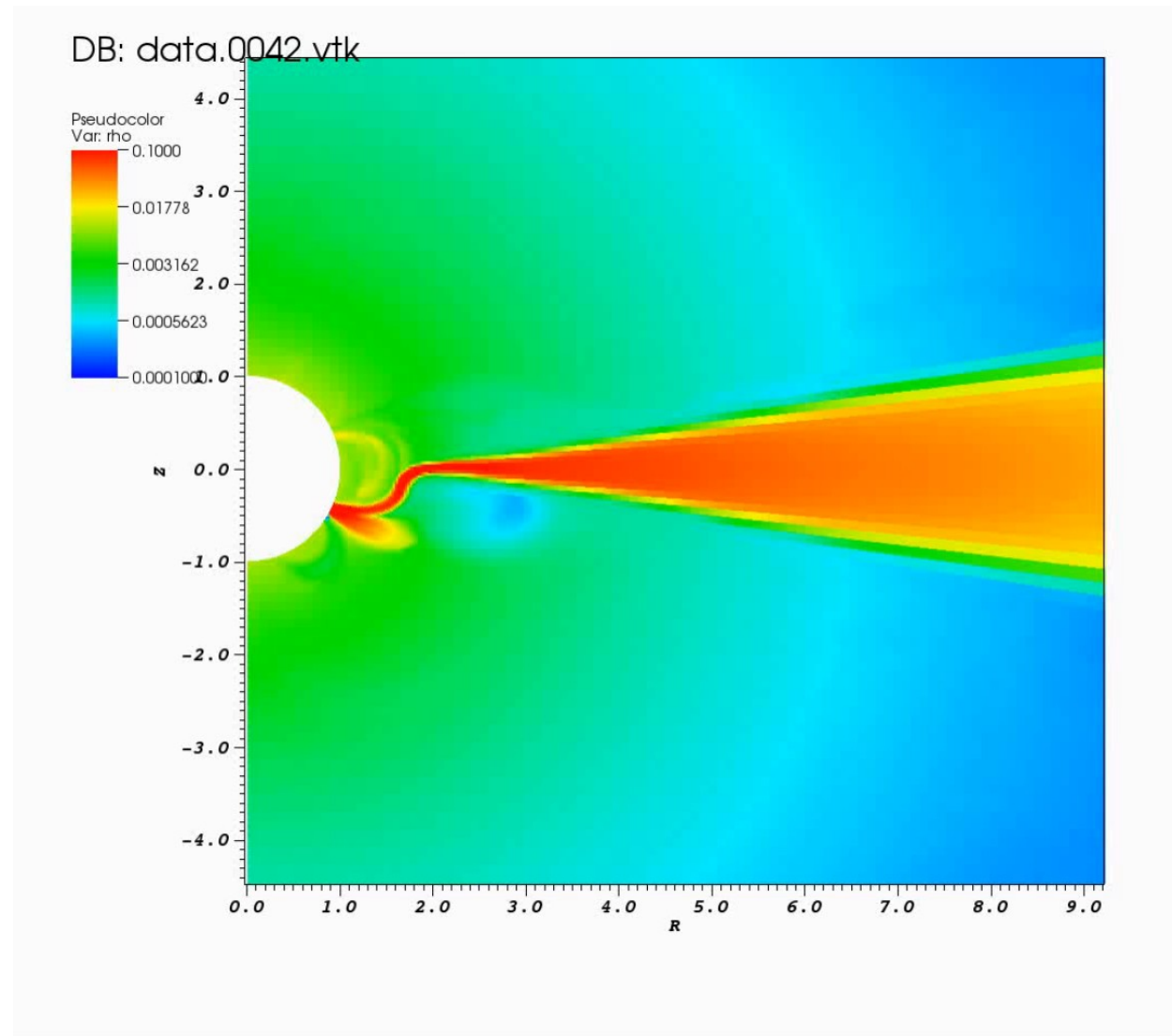
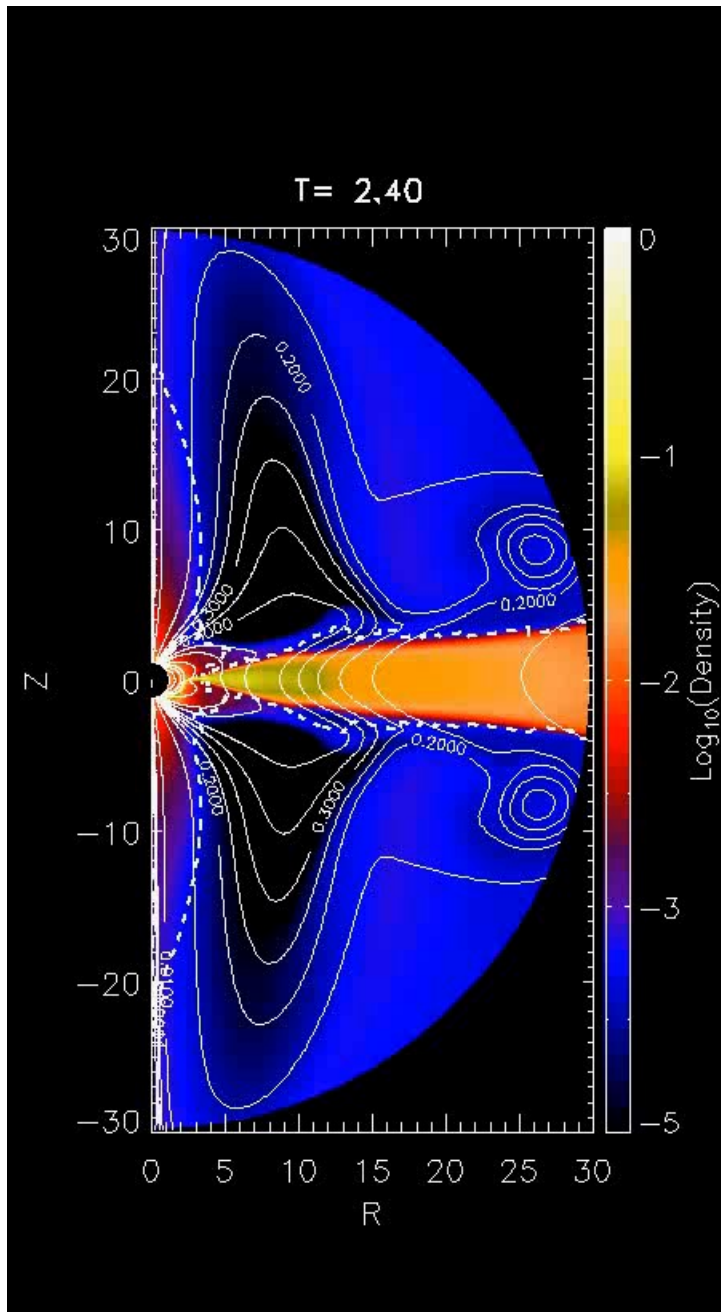
5 sekund z życia szybko rotującej gwiazdy neutronowej, pulsara milisekundowego, w mojej symulacji. Najdłuższa symulacja w tym rodzaju. Zapuszczana na chwilowo wolnych rdzeniach klastra, trwała około pół roku,

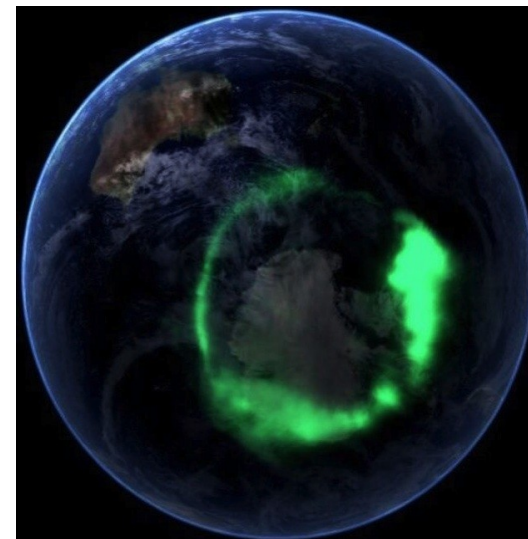
$t = 65.0P_{\star}$



Stabilne rozwiązanie akrecji materiału z dysku na gwiazdę. 10 lat pracy. Materia spada na gwiazdę przez kolumnę akrecyjną, której kształt śledzi pole magnetyczne gwiazdy.

Wyniki: protogwiazda w $\vartheta=[0,180]$, dipol i oktupol

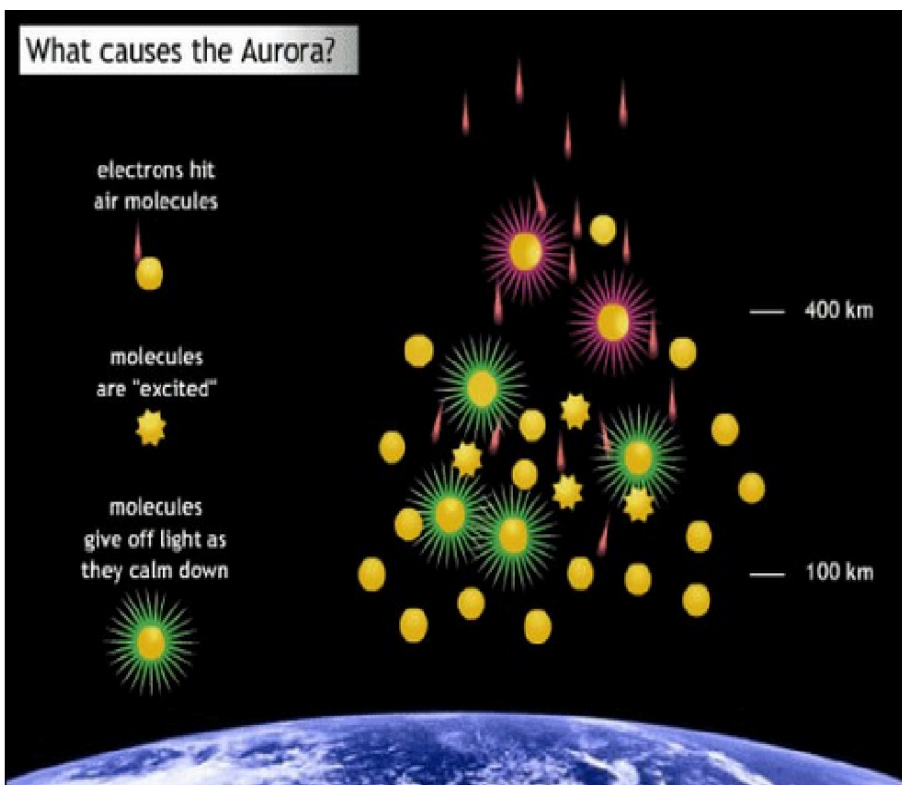




Zorza polarna, zwana aurora borealis (grecka bogini świtu, Aurora, + grecka nazwa północnego wiatru, Boreasz), została naukowo opisana przez Pierre'a Gassendi w 1621 roku.

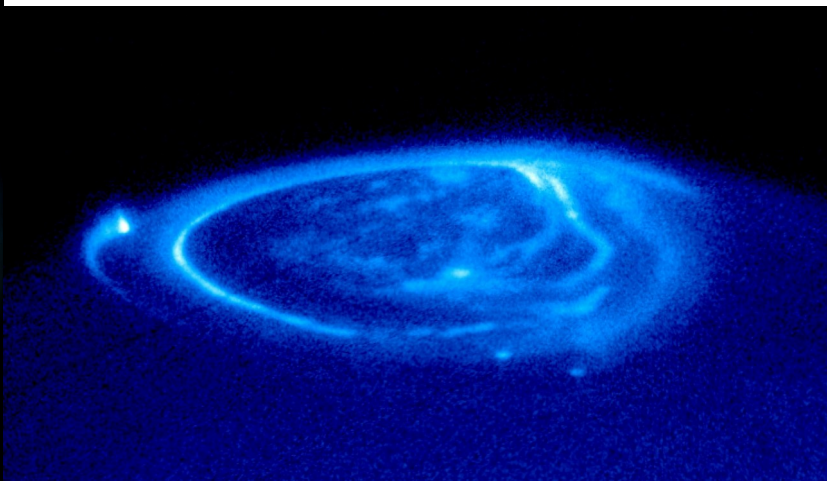
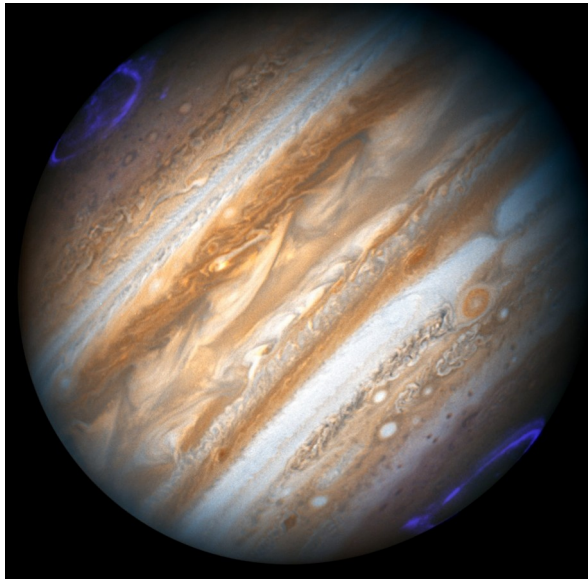
Jest to wynik oddziaływania magnetosferycznego gwiazda-planeta. Na Ziemi zorze polarne są widoczne w pobliżu biegunów geograficznych, ponieważ obecnie znajdują się one również blisko biegunów magnetycznych Ziemi. Zorza polarna pojawia się na wysokości >100-500 km, znacznie powyżej linii von Karmana (80-100 km), gdzie samoloty nie są już wspierane przez ciśnienie powietrza, podczas gdy jonosfera znajduje się w odległości od 50-1000 km.

Kolory zorzy pochodzą od różnych gazów znajdujących się w górnych warstwach atmosfery, emitujących światło o różnych kolorach w zderzeniach z cząsteczkami wiatru słonecznego (w tym przypadku głównie elektronami). Tlen emituje światło zielonkawe lub brązowo-czerwone, a azot – niebieskie lub czerwone.



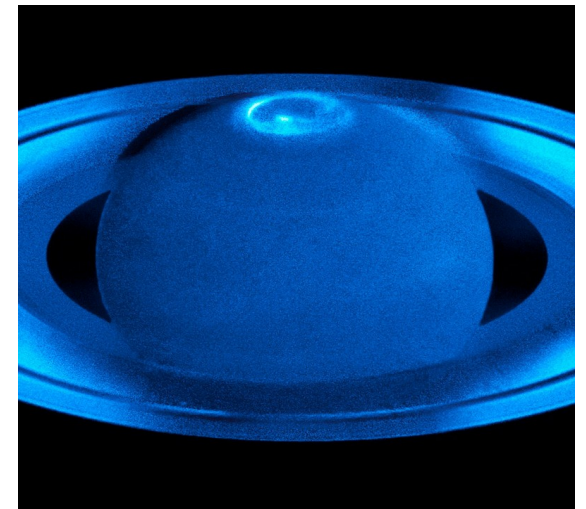
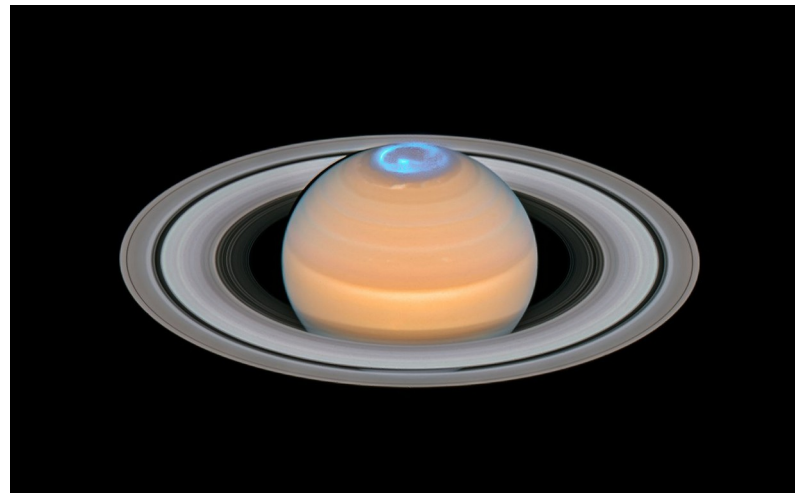
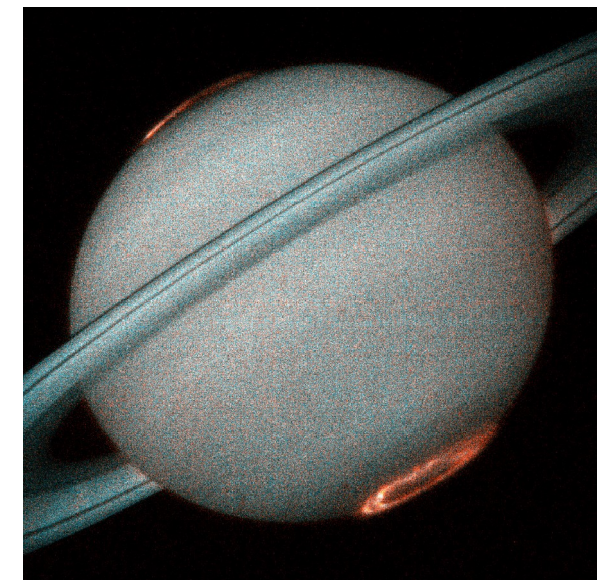
High-speed particles from the Sun, mostly electrons, strike oxygen and nitrogen atoms in Earth's upper atmosphere. Credit: NASA

Zorza polarna na innych planetach-Jowisz i Saturn: zdjęcia!



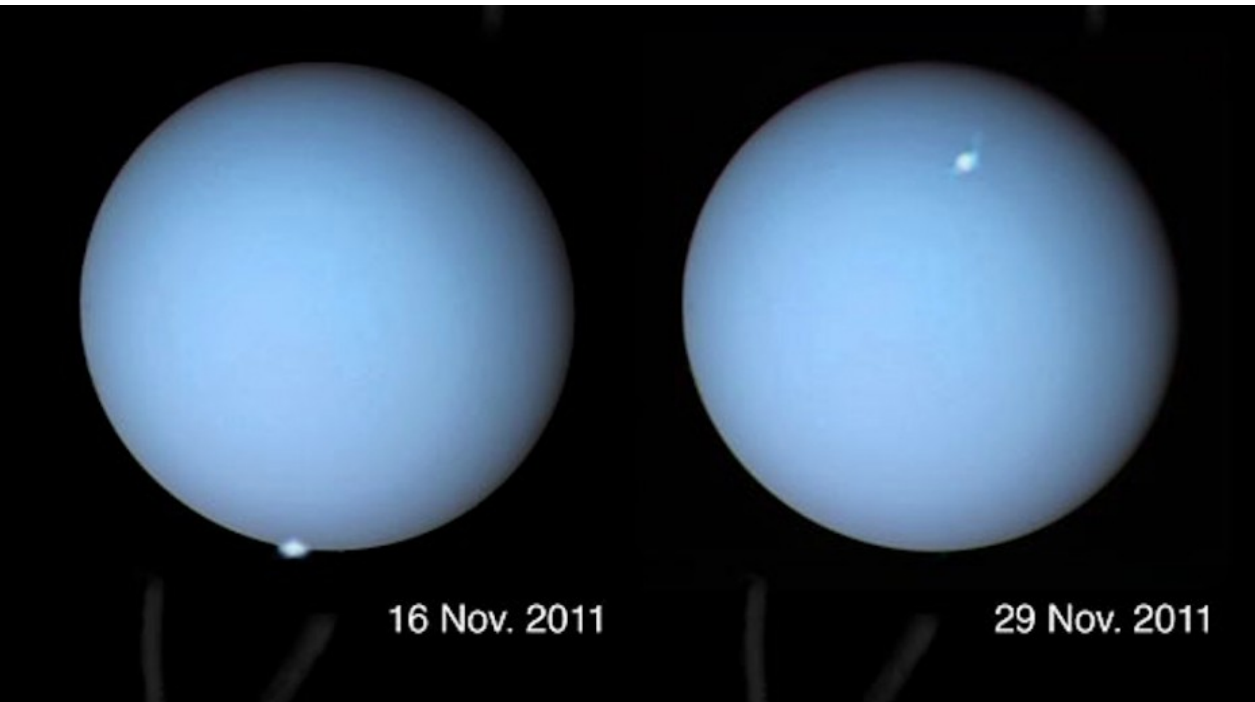
Aurora na Jowiszu, zdjęcie z HST. Plama po lewej stronie jest magnetycznie połączona z Io; plamy na dole z Ganymedem i Europą.

Jowisz, zdjęcie z JWST

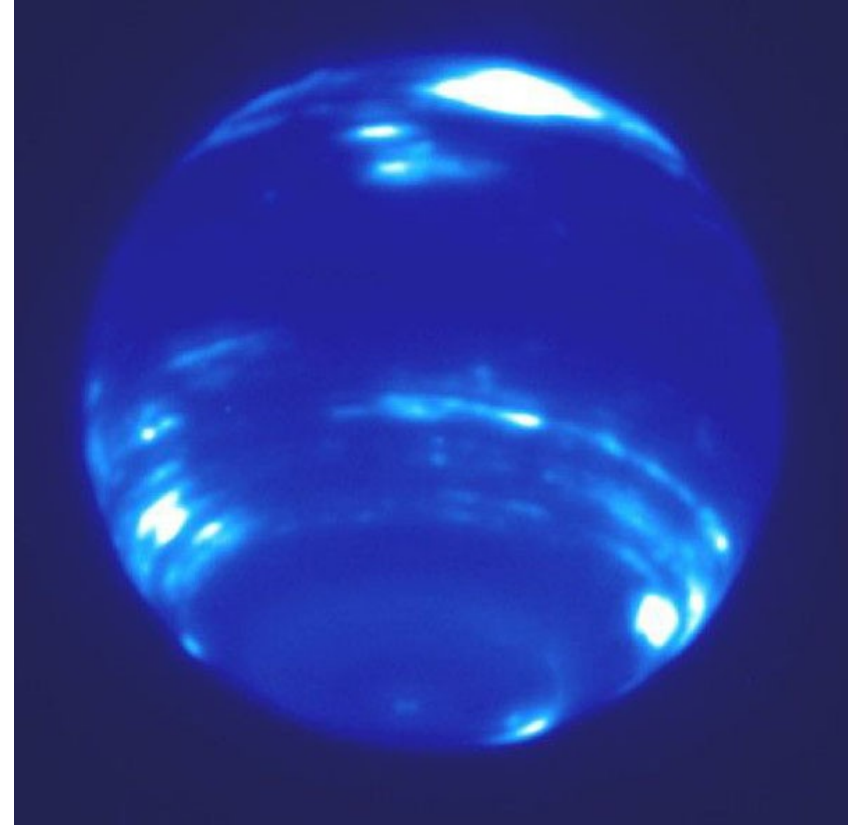


W odróżnieniu od ziemskiej zorzy polarnej, na gazowych planetach jest ona widoczna głównie w ultrafiolecie, którego nie widać z Ziemi. Dlatego takie obserwacje są wykonywane teleskopem Hubble'a (2.5m) na orbicie-od niedawna też JWST (6.5m).

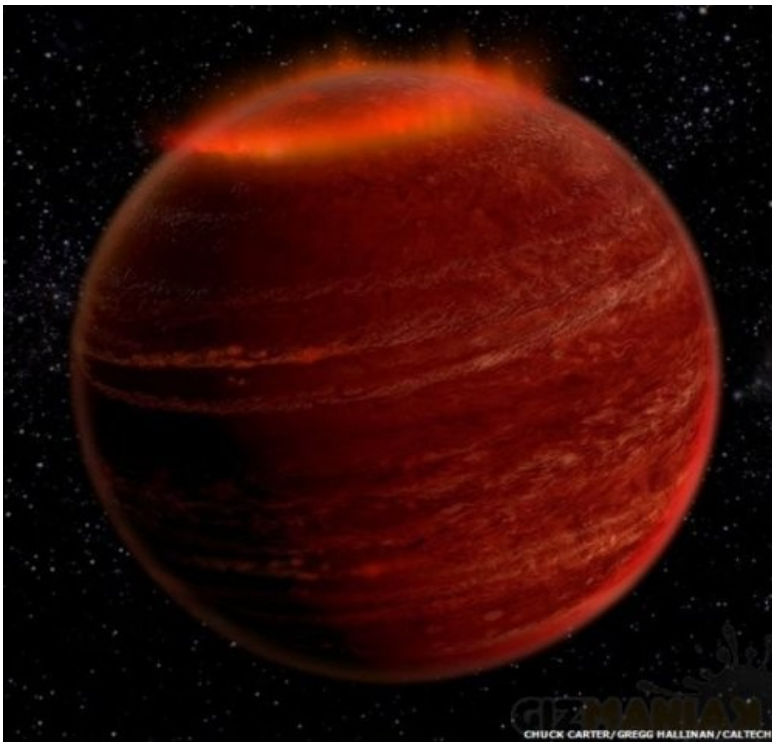
HST, Uran



Keck, Neptun



Na egzoplanetach też powinny istnieć światła polarne, ale jeszcze nie ma potwierdzonej radio-detekcji. Np. na brązowym karle LSR J1835+3259, 18 ly od nas w Lyrze (rysunek artystyczny!). Czerwony kolor jest przewidywany od większej ilości wodoru w atmosferze. Aurora też powinna być bardziej intensywna, z powodu milion razy większego pola magnetycznego wokół takich gwiazd niż na Ziemi. Problem: nie ma innego obiektu, czyli mechanizm powstania takiej aurory jest inny niż ziemskiej.



W przypadku pulsarów, gdzie właściwie po pierwsze odkryto planety poza układem słonecznym, możemy spodziewać się jeszcze silniejszego efektu, bo pole pulsarów jest miliard razy silniejsze niż na Ziemi. Zrobiliśmy pierwsze takie symulacje i przewidzieliśmy natężenie sygnału. Stwierdziliśmy że powinniśmy go zaobserwować już dzisiejszymi instrumentami. Jak na razie, nie ma potwierdzenia. A byłoby bardzo ciekawie zobaczyć takie pomiary, bo moglibyśmy dowiedzieć się więcej o wietrze pulsarów i w ogóle środowisku w ich pobliżu-na razie mamy niewiele więcej od domniemań, bo chodzi o warunki jakich nie ma możliwości uzyskania w laboratorium.

W niektórych przypadkach sztuka wyprzedza naukę. Najbardziej znanym artystą sztuki astronomicznej był Chesley Bonestell (1888-1986), którego obrazy inspirowały i jak widzimy nadal inspirowają amerykański program kosmiczny: Namalował także wiele obrazów przedstawiających widoki z innych światów: „Widok Saturna z Tytana” (1944), jego pierwsza grafika dla magazynu „Life”.

Galaxy
SCIENCE FICTION

FEBRUARY 1951
25¢



THE FIREMAN
By Ray Bradbury



Imaged by Heritage Auctions, HA.com

Dziś wiele takich widoków możemy zobaczyć na rzeczywistych obrazach z misji naukowych.

Odkrycie naukowe, które dzisiaj przedstawię, ma swojego dobrze udokumentowanego poprzednika naukowego. Pani Lynette Cook namalowała ten obraz „Pulsar Planets 1” w 2000 roku.



Nasza niedawna publikacja, będąca pierwszym naukowym opisem takiej możliwości jest z 2023 roku:

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 959:L13 (6pp), 2023 December 10

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad0f1f>



Auroras on Planets around Pulsars

Ruchi Mishra¹ , Miljenko Čemeljić^{1,2,3} , Jacobo Varela⁴ , and Maurizio Falanga^{5,6} 

¹ Nicolaus Copernicus Astronomical Center of the Polish Academy of Sciences, Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland

² Research Centre for Computational Physics and Data Processing, Institute of Physics, Silesian University in Opava, Bezručovo nám. 13, CZ-746 01 Opava, Czech Republic

³ Academia Sinica, Institute of Astronomy and Astrophysics, P.O. Box 23-141, Taipei 106, Taiwan

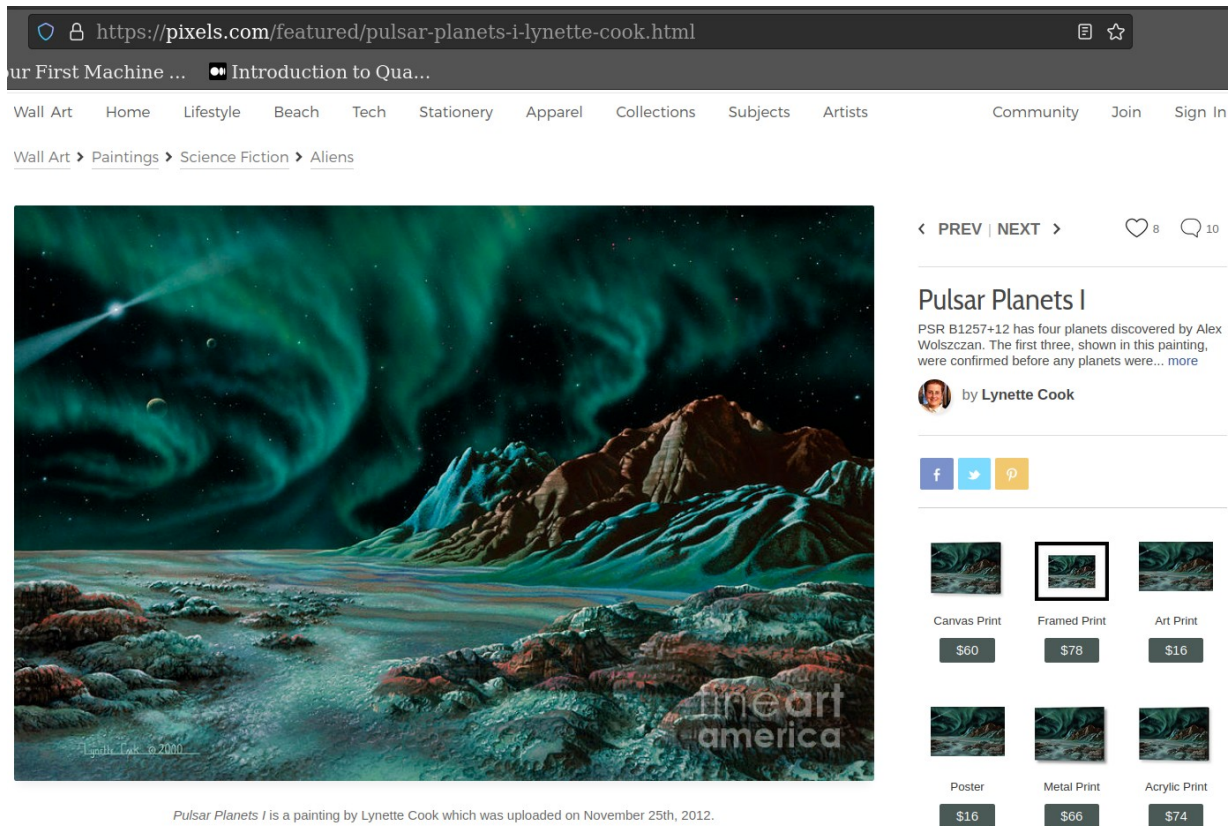
⁴ Universidad Carlos III de Madrid, Leganes, E-28911, Spain

⁵ International Space Science Institute, Hallerstrasse 6, 3012 Bern, Switzerland

⁶ Physikalisches Institut, University of Bern, Sidlerstrasse 5, 3012 Bern, Switzerland

Received 2023 September 12; revised 2023 November 14; accepted 2023 November 22; published 2023 December 14

Na spotkaniu EAS 2023 w Krakowie w lipcu 2023, gdzie Ruchi Mishra, która pracowała z nami nad artykułem, miała plakat z naszymi wynikami, spotkałem Alexa Wolszczana i zapytałem go, co sądzi o naszym pomysle. Słuchał uważnie i komentował: „Nie wpadłem na taki pomysł. Podajcie liczby!” Dokładnie to zrobiliśmy w artykule, stawiając wyzwanie obserwatorom. Ale był ciekawy zwrot w tej historii: przeglądając hasło „pulsar planets aurora” w poszukiwaniu treści związanych z naszą już opublikowaną pracą (Mishra et al., „Auroras on Planets Around Pulsars”, 2023, ApJ, 959, L13) byłem zdziwiony, gdy znalazłem następujące zdjęcie:



The screenshot shows a webpage from pixels.com featuring a painting titled "Pulsar Planets I" by Lynette Cook. The painting depicts a rocky, alien landscape with a bright aurora in the sky. The webpage includes a navigation menu, a title, a description, and a gallery of print options.

Navigation: Wall Art, Home, Lifestyle, Beach, Tech, Stationery, Apparel, Collections, Subjects, Artists, Community, Join, Sign In

Categories: Wall Art > Paintings > Science Fiction > Aliens

Navigation: < PREVIOUS | NEXT > 8 likes, 10 comments

Pulsar Planets I

PSR B1257+12 has four planets discovered by Alex Wolszczan. The first three, shown in this painting, were confirmed before any planets were... more

by Lynette Cook

Print Options:

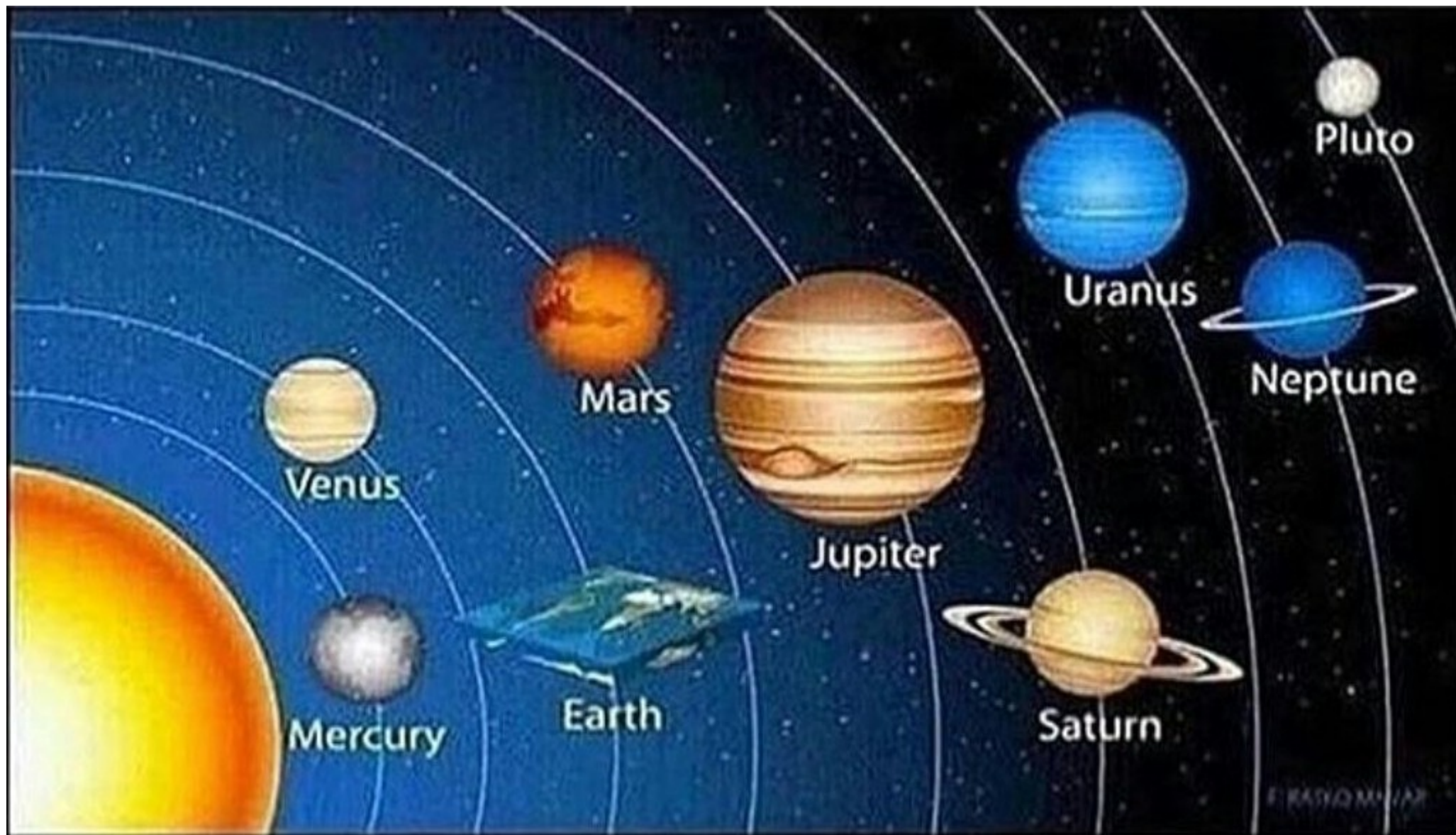
| Print Type | Price |
|---------------|-------|
| Canvas Print | \$60 |
| Framed Print | \$78 |
| Art Print | \$16 |
| Poster | \$16 |
| Metal Print | \$66 |
| Acrylic Print | \$74 |

Pulsar Planets I is a painting by Lynette Cook which was uploaded on November 25th, 2012.

Zadziwiło mnie nie tylko piękne zdjęcie, ale także data opublikowania 2012. Przy bliższym przyjrzeniu się, była jeszcze wcześniejsza data na zdjęciu: 2000! Nawet liczba planet jest poprawna, 3, a nie 4. Skontaktowałem się z artystką z pytaniem, czy zrobiła to przez analogię z Ziemią? Odpowiedziała, że nie, że w 1999 roku zapytała Alexa Wolszczana o naukową wiarygodność obrazu, a on zaproponował jej dodanie zorzy polarnej! Wygląda więc na to, że miał na to artystyczny pomysł, ale nie przeniósł go do pracy naukowej. Nasz artykuł jest pierwszym, w którym zostało to obliczone... prawie ćwierć wieku po artystycznym obrazie!

Podsumowanie

- Do obserwacji dużymi teleskopami potrzebne są precyzyjne mapy. Już je mamy.
- Dyski akrecyjne i strugi są powszechnie obecne w kosmosie, obserwujemy je od gwiazdnej do pozagalaktycznej skali.
- W dysku akrecyjnym, moment pędu zapadającego się grawitacyjnie materiału przeprowadzany jest na zewnątrz. Pole magnetyczne gra prawdopodobnie istotną rolę.
- Sztuka czasem wyprzedza naukę.



Według niektórych Układ Słoneczny zawiera jeden naprawdę dziwaczny przypadek...