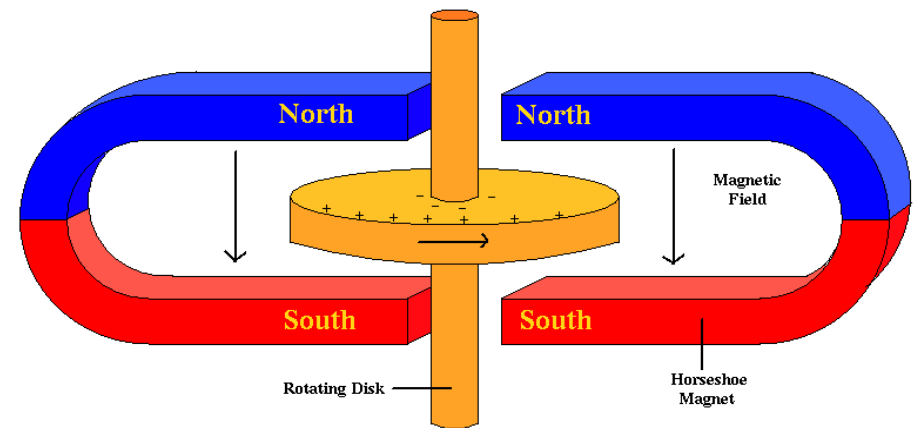


Pola magnetyczne w kosmosie: magia stosowana

Miljenko Čemeljić

Centrum astronomiczne im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk
Warszawa



“ Każda wystarczająco zaawansowana technologia jest nieodróżnialna od magii.” -
Arthur C. Clarke

Zarys

Streszczenie: Przedstawię ogólny opis pól magnetycznych od kosmologicznej do gwiazdowej i ziemskiej skali. Skąd w ogóle się biorą pola magnetyczne we wszechświecie, dlaczego nas interesują i jak działają? Opiszę jak astronomowie się zainteresowali polem magnetycznym i w jaki sposób go mierzą i badają.

- **Wprowadzenie:** Historia, zorza polarna
- **Skąd pole magnetyczne we wszechświecie?** -kosmologicznie, dynamo, debata nie zawsze naukowa (“Teoria” Wszechświata elektrycznego).
- **Skale:** kosmologiczna, gromady galaktyk, pustki (voids), pojedyncze galaktyki, gwiazdy, planety, laboratorium. Natężenia?
- **Podsumowanie:** gdzie dziś najczęściej powołujemy pole magnetyczne w astrofizyce? (Ziemia, Słońce, strugi-gwiazdne i galaktyczne. Kosmologia?)

Wprowadzenie

Pole magnetyczne Ziemi-z historii odkrycia

Pierwsze zapiski o magicznych łyżeczkach wskazujących północ znajdujemy w zapiskach kronikarza chińskiej dynastii Han z 83 r. n.e. Teksty na ten temat pojawiały się w Chinach i Indiach.

Kompas z igłą zbudowano w Chinach koło VIII wieku, trafił do Europy prawdopodobnie Jedwabnym Szlakiem na początku XII wieku. Szybko został skorzystany jako narzędzie nawigacyjne przez Wenecjan. W r. 1269. **Petrus Peregrinus de Maricourt** z Francji sporządził mapę sferycznego magnetu, używając igły stalowe. Nazwał linie przecinania się “biegunami”, na wzór biegunów geograficznych, ale nie połączono tego jeszcze tego z mapą geograficzną.

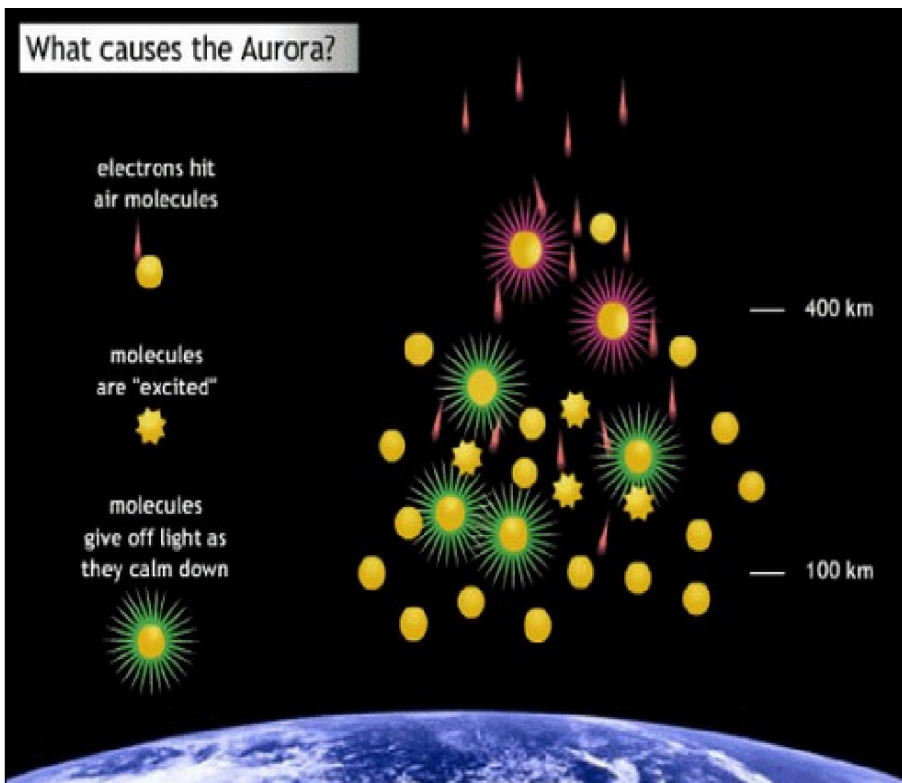
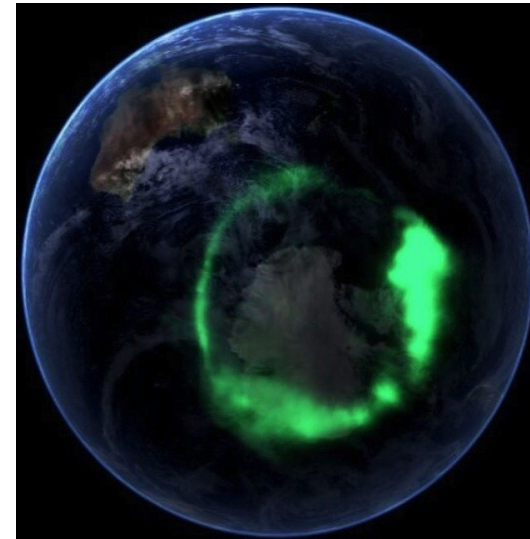


Pole magnetyczne Ziemi-z historii odkrycia



W roku 1600 William Gilbert z Anglii opublikował książkę “O magnesach, ciałach magnetycznych i wielkim magnesie Ziemi”. Powtórzył eksperymenty Peregrinusa de Maricourt z pomocą modelu Ziemi, sfery z magnetytu (“**terella**”), do którego przykładał kompas i pokazał że kierunek wskazywania zgadza się z wskazaniem zanotowanymi podczas podróży morskich. Żeby wytłumaczyć dlaczego kompas działa, musiał też wprowadzić “**działanie na odległość**”-czyli pojęcie **pola**. Śledząc antyczne przekonania, dotychczas uważano że oddziaływanie jest możliwe tylko przy kontakcie ciał. Pojęcie pola później użył Newton do wytłumaczenia grawitacji.

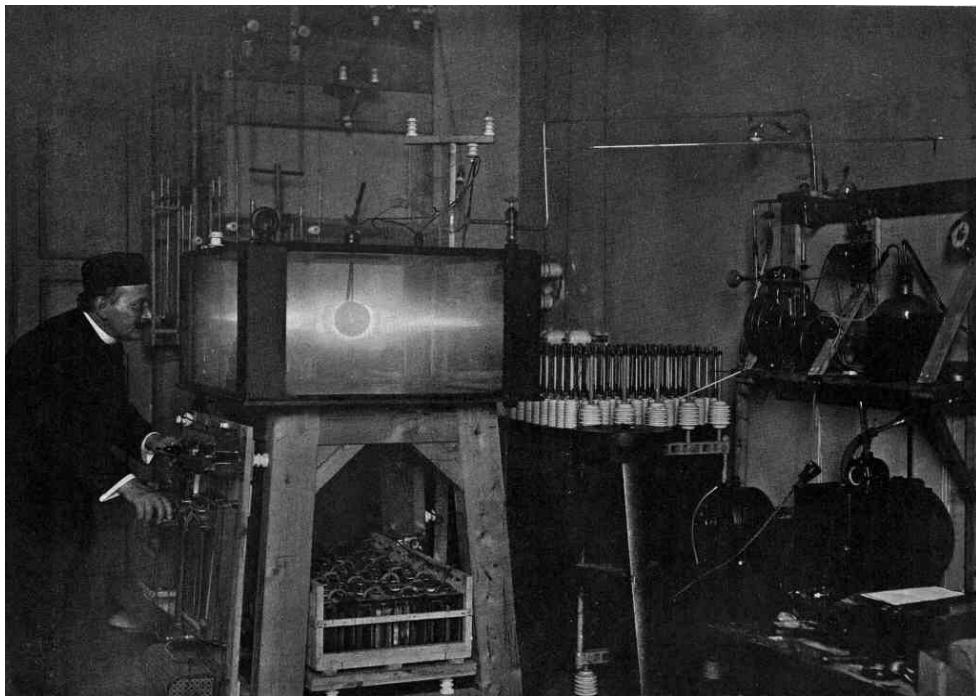
Pole magnetyczne Ziemi-zorza polarna



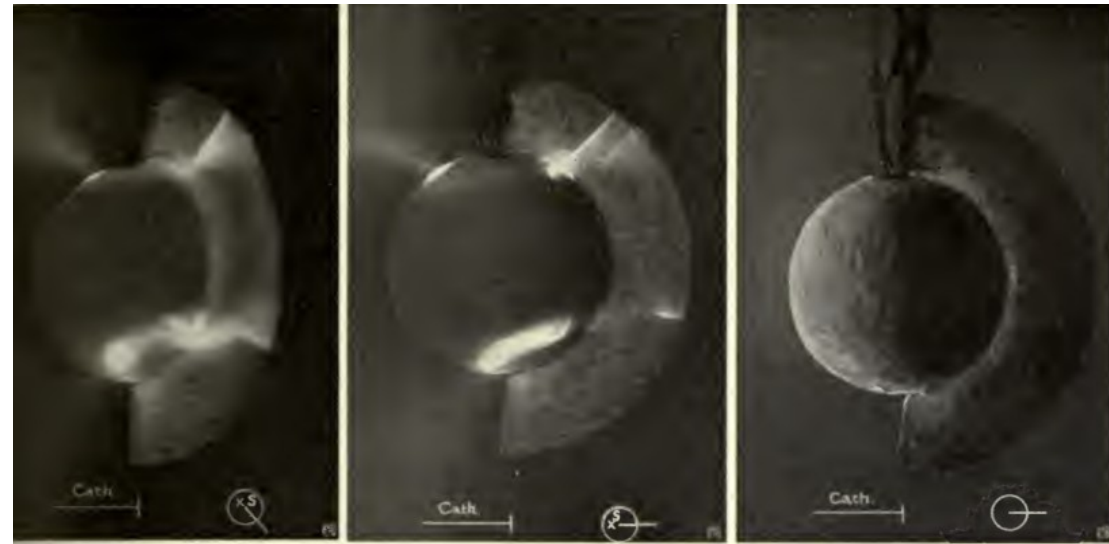
Zorza polarna jest widoczna na obszarach położonych blisko biegunów Ziemi. Nazwę **aurora borealis** dał Pierre Gassendi jak je obserwował w r.1621, od rzymskiej bogini zorzy (Aurora) i greckiej nazwy wiatru północnego (Boreas).

Różne gazy w górnych warstwach atmosfery i nad nią emitują, w zderzeniu z cząstkami z wiatru słonecznego (głównie elektrony), różne kolory światła. Emisja promieniowania atomów tlenu jest zielonkawa albo brązowo-czerwona, a azotu niebieska albo czerwona.

Pole magnetyczne Ziemi-zorza polarna



Mechanizm działania zorzy polarnej wytłumaczono poprawnie jeszcze w początku XX wieku przez **Kristiana Birkelanda**, ale jego wyniki uznano dopiero po sprawdzeniu sondami kosmicznymi **po 1963. roku!** Przed tym były one uważane za niewiarygodne, czasem je nawet ośmieszano przez innych naukowców (Chapman). Birkeland przeprowadził badania poprawnie: mierzył pole magnetyczne i prąd na skale kontynentalną. Robił modele elektryczne i sprawdzał swoje pomysły naukowo.



a. b. c.
Fig. 46.

a horizontal current for a long distance between Dyraafjord and Axeløen. This would satisfactorily explain the constant direction that the perturbation in this and other similar cases shows.

In order to obtain a clear conception of the conditions, we will once more have recourse to my experiments with the terrella. The experiments shown in fig. 46, *a*, *b* and *c*, follow directly on to



position as in the experiment given in



we will here especially direct our attention to the luminous wedge that is thrown upon the screen at about the 70th parallel

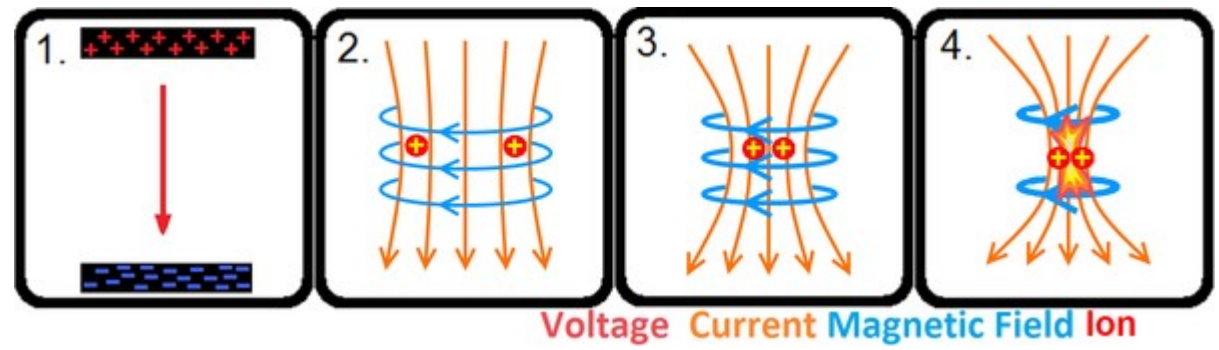
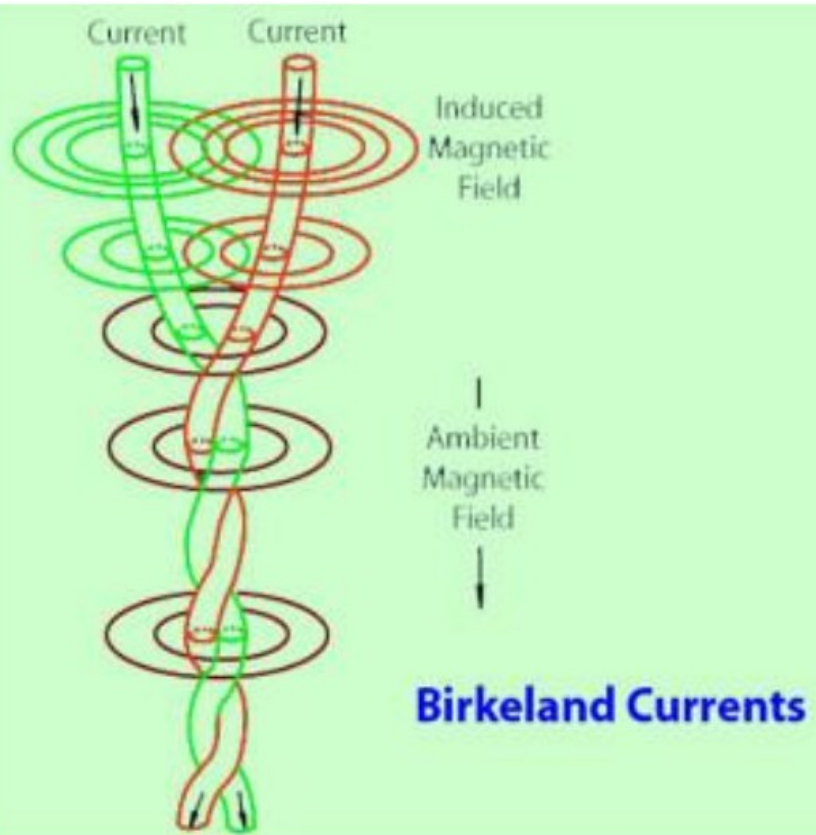
46 *a*, the terrella is so turned that the screen forms an angle of

a). In angle d from the ca- the lat- same



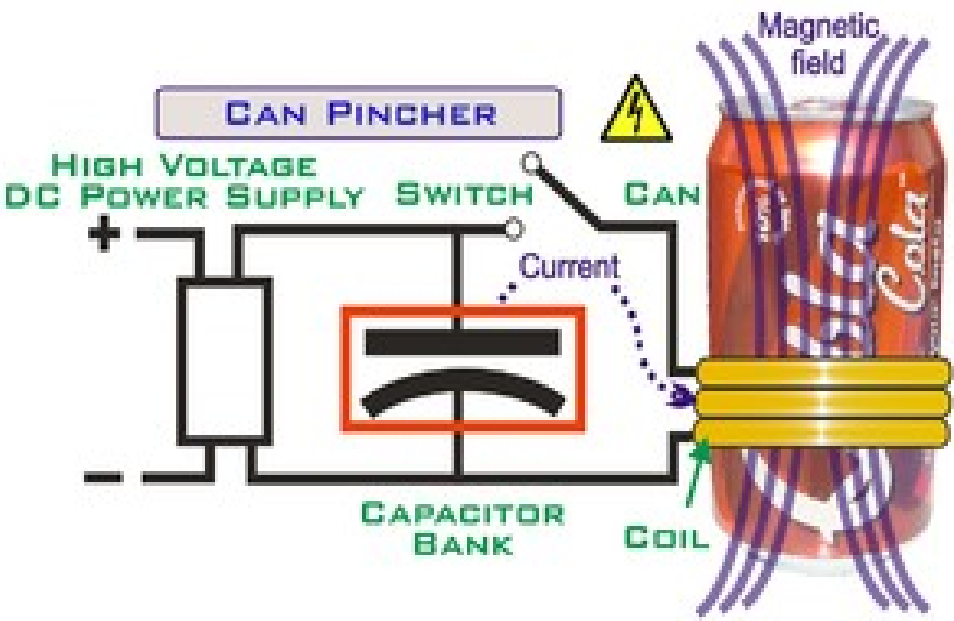
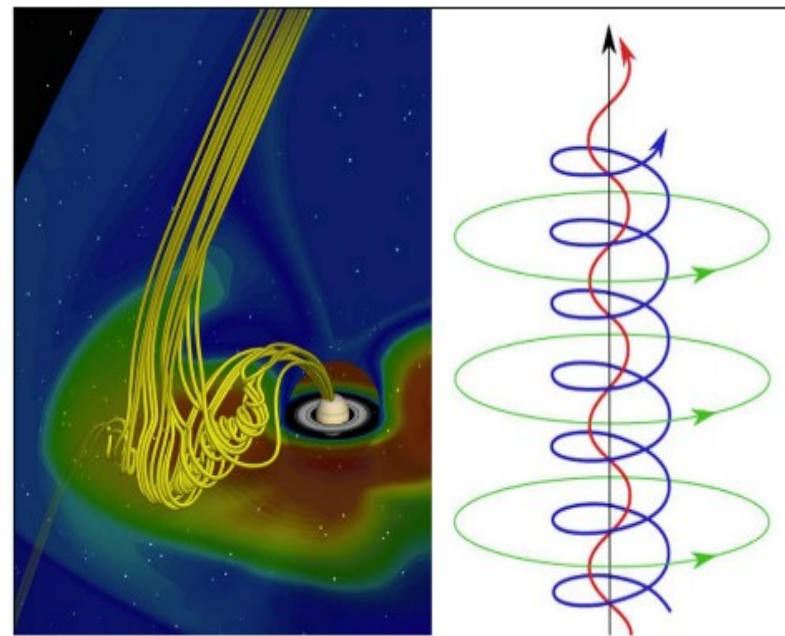
towards h phos- c: *b* how terrella is

Pole magnetyczne Ziemi i prądy

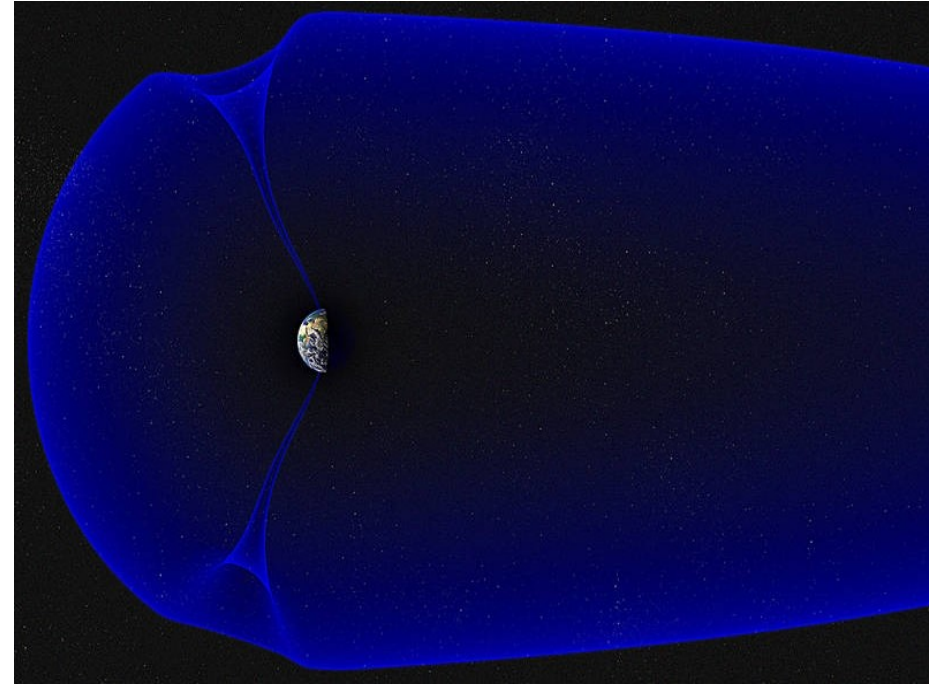
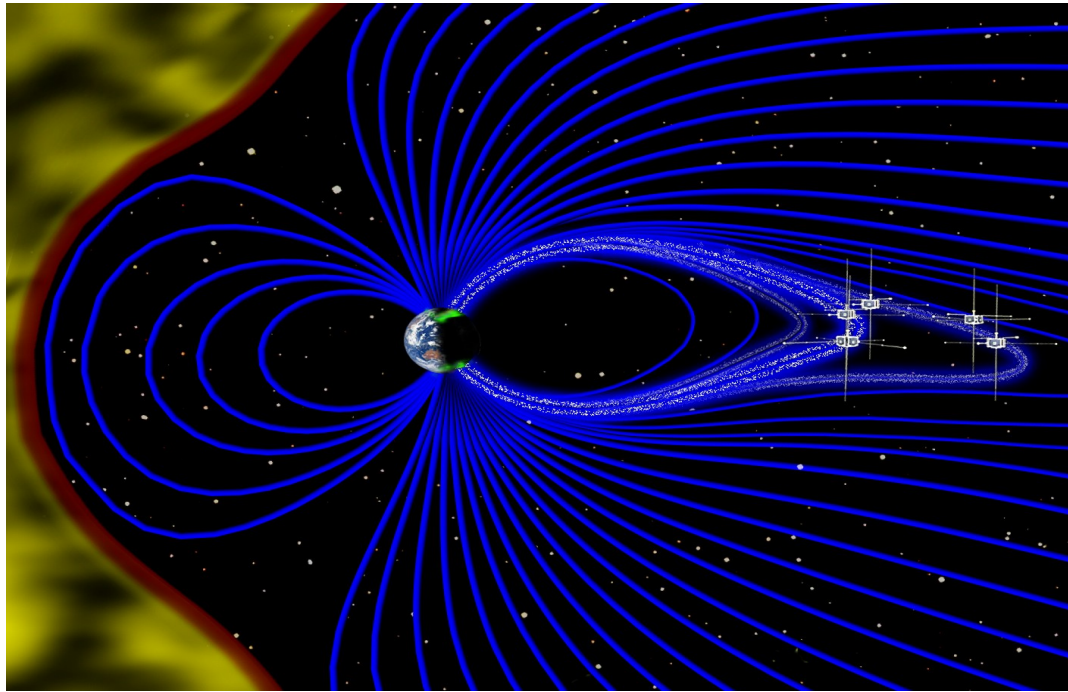


Birkeland pokazał że tworzą się prądy które się mogą zapętlać i tworzyć wiązki zdolne do przetrwania na odległościach między-planetarnych:

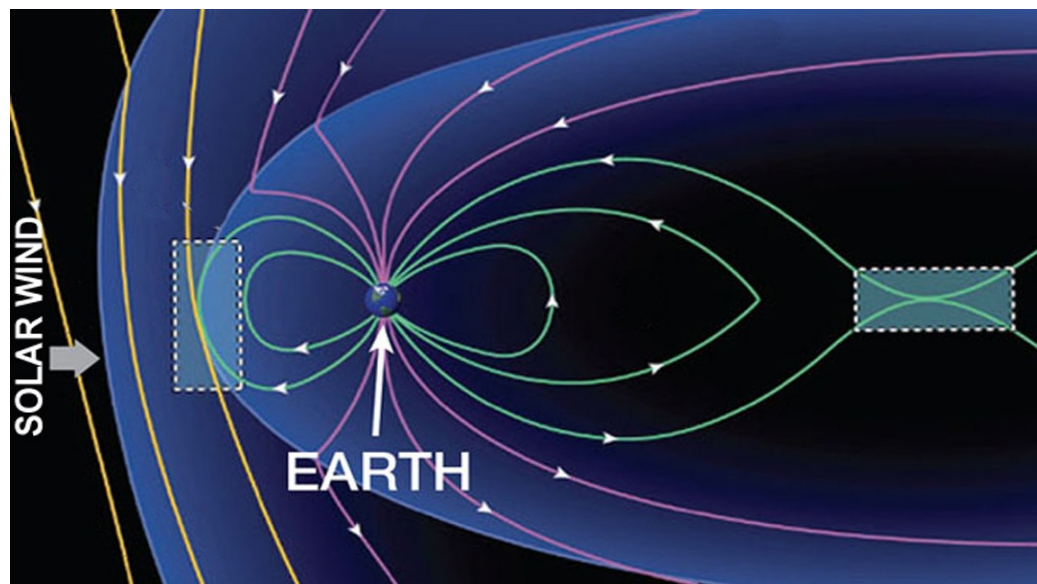
Ilustracja sił w takich układach:



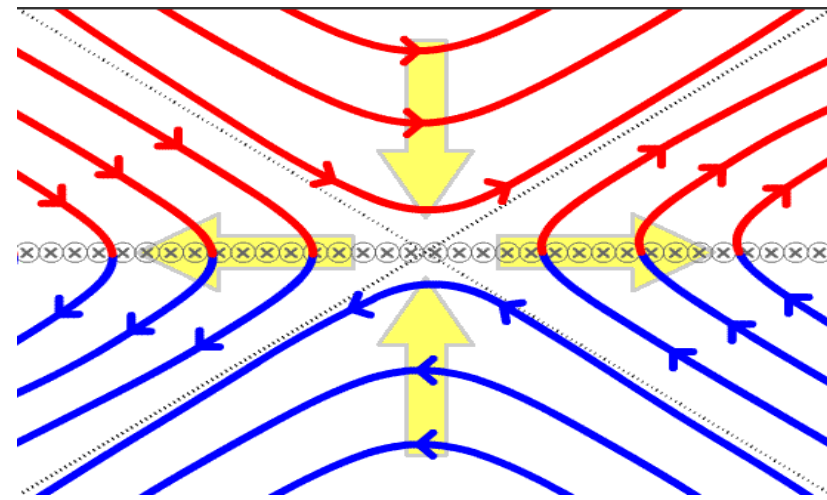
Pole magnetyczne Ziemi-badania nowoczesne



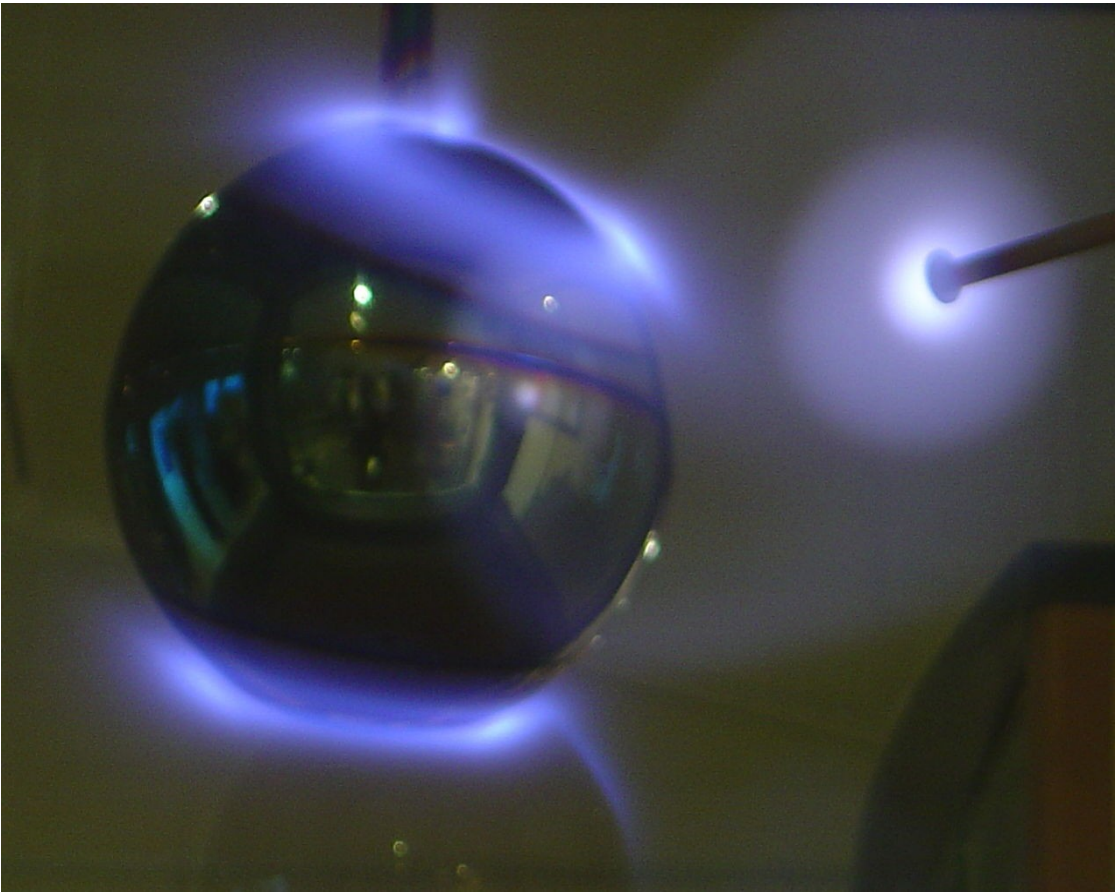
Obszary w magnetosferze z których gazy z atmosfery mogą uciekać na zewnątrz.
Credits: Andøya Space Center/Trond Abrahamsen.



Magnetosfera Ziemi z wiatrem słonecznym i lokalizacją sond pomiarowych THEMIS, do ustalania mechanizmu rekonekcji pola magnetycznego.



Ruch biegunów magnetycznych Ziemi



(By David Monniaux - Own work, CC BY-SA 3.0)

Pod koniec XX wieku w laboratoriach i dalej używano **terelli**, ale dziś już raczej używa się komputerowych modeli bo lepiej można kontrolować parametry.



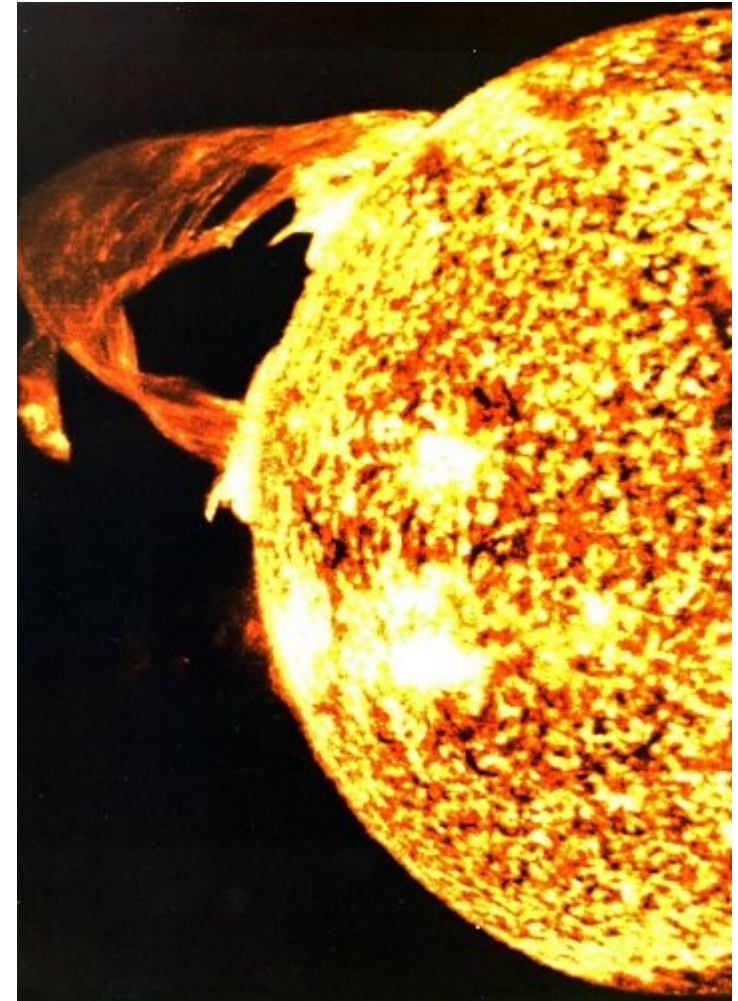
Północny biegun magnetyczny Ziemi przemieszcza się ostatnio znacznie szybciej-było 15km/rok do niedawna, ale obecnie jest koło 50km/rok, w stronę Syberii. Południowy biegun magnetyczny się przemieszcza wolniej. Zamiana biegunów magnetycznych zdarzała się już, trwa zwykle z tysiąc lat. Ziemia wtedy traci na jakiś czas ochronę magnetyczną.

Pole magnetyczne w kosmosie

Zorze polarną zanotowano naukowo w XVII wieku, ale nie łączono wtedy tego z przestrzenią kosmiczną. Gdzie jeszcze obserwujemy pole magnetyczne w kosmosie?

- Słońce, czyli inne gwiazdy też
- gwiazdy neutronowe (magnetary też)
- przestrzeń międzygwiazdowa
- Galaktyka (czyli inne galaktyki też)
- przestrzeń międzygalaktyczna

Jak mierzymy pole magnetyczne w kosmosie?



Jak mierzymy pole magnetyczne w kosmosie?

Jak mierzymy pole magnetyczne **na Ziemi?**

-magnetometr, mierzymy siłę.

W kosmosie?

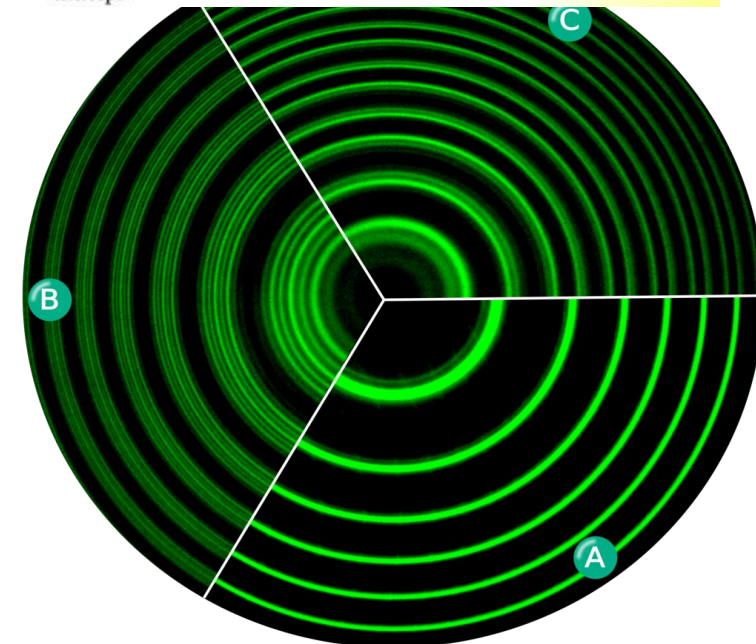
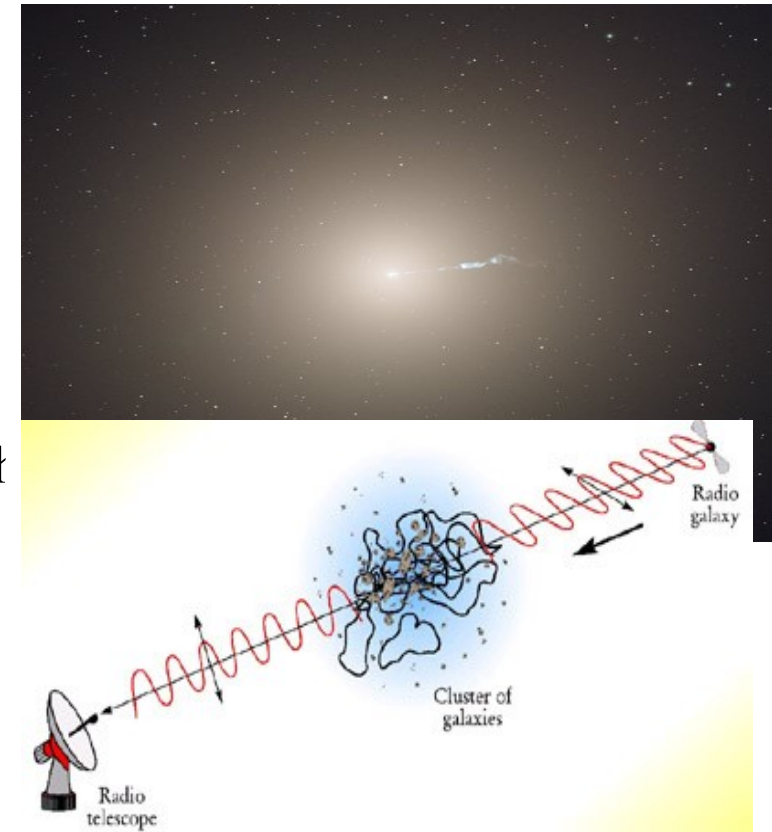
-**promieniowanie synchrotronowe**-produkowane przez elektrony poruszające się w polu magnetycznym

-(częściowa) **polaryzacja światła** przy przejściu przez pył ułożony w polu magnetycznym w jeden kierunek

-**rotacja Faradaya** (1845, pierwszy dowód połączenia światła z elektromagnetyzmem), zmiana płaszczyzny polaryzacji:

-**efekt Zeemana**: rozszczepienie linii spektra w polu magnetycznym

-**pośrednia metoda mierzenia pola**: mierzymy kąt pomiędzy kierunkiem zmiany intensywności promieniowania i kierunkiem pola magnetycznego. Z tego można wywnioskować natężenie pola.

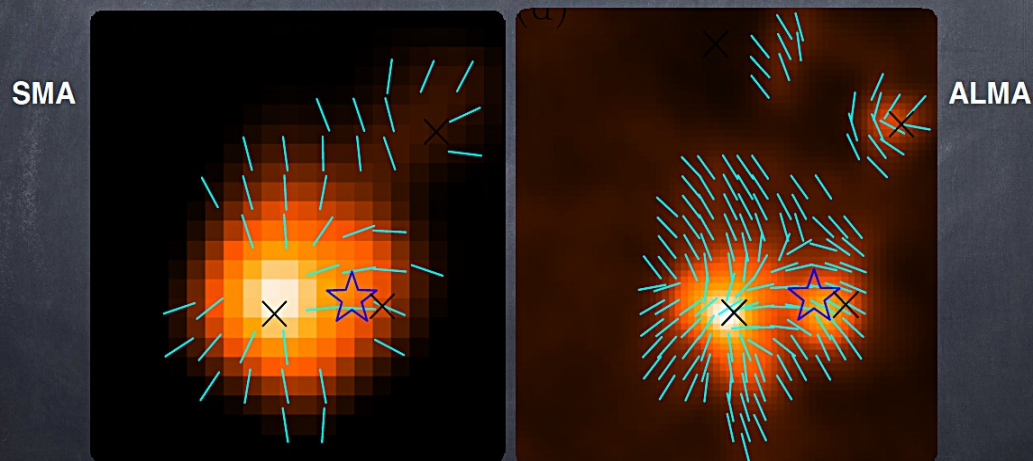


Ilustracja pośredniej metody mierzenia pola magnetycznego

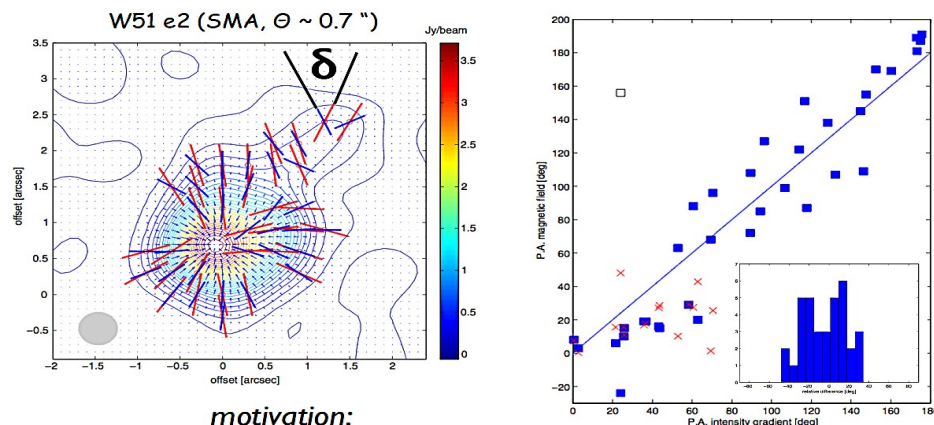
High-resolution ALMA Observations of the B-field in W51

Patrick Koch (ASIAA, Taiwan)

with Ya-Wen Tang, Paul Ho, Hsi-Wei Yen, Shigehisa Takakuwa, Yu-Nung Su



Earlier SMA Work: Key Observable: angle δ



motivation:

clear correlation in orientations between intensity gradient and field orientations!

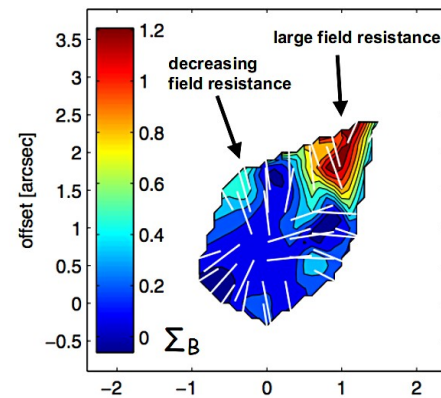
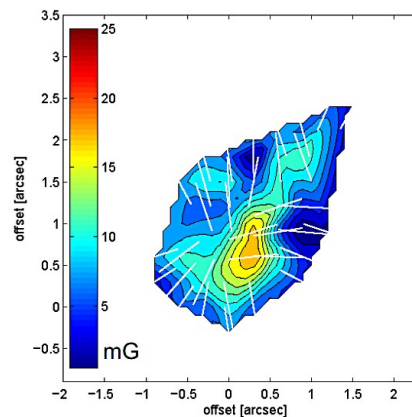
Koch, Tang & Ho, 2012

What can we learn from δ ?

Magnetic Field Strength Map Field-to-Gravity Force Ratio Σ_B

$$B = \sqrt{\frac{\sin \psi}{\sin(\frac{\pi}{2} - |\delta|)}} (\nabla P + \rho \nabla \phi) 4\pi R$$

$$\Sigma_B \equiv \frac{\sin \psi}{\sin(\frac{\pi}{2} - |\delta|)} = \frac{F_B}{|F_G + F_P|}$$

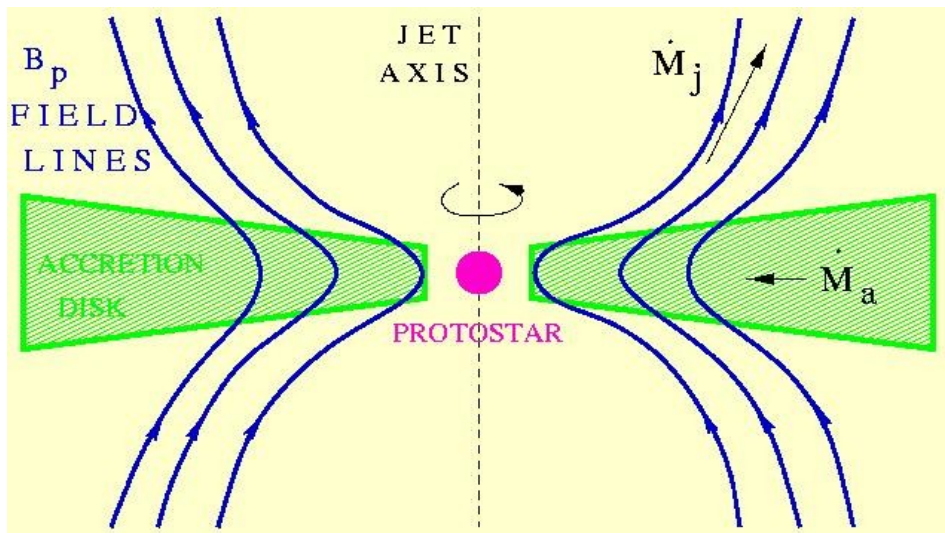


(Koch, Tang & Ho, 2012a,b;2013)

W51 jest gigantyczna chmura w której rodzą się gwiazdy. Mierzmy kąty pomiędzy kierunkiem zmian jasności i orientacją pola, znalezioną innymi metodami.

Kombinacją różnych metod próbujemy w różnych obiektach polepszyć mierzenie pola magnetycznego, nie ma jednej metody-nic dziwnego, bo chodzi o pola od 10^{-9} do 10^{15} Gauss i bardzo różniące się skale.

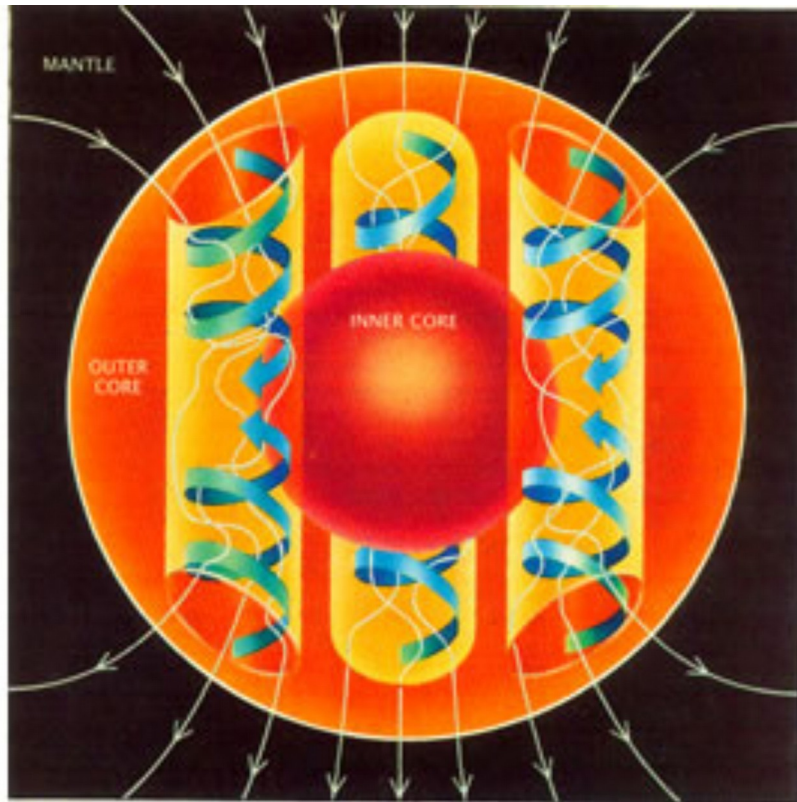
Skąd pole magnetyczne w gwiazdach?



Pole powstaje w dwa sposoby:

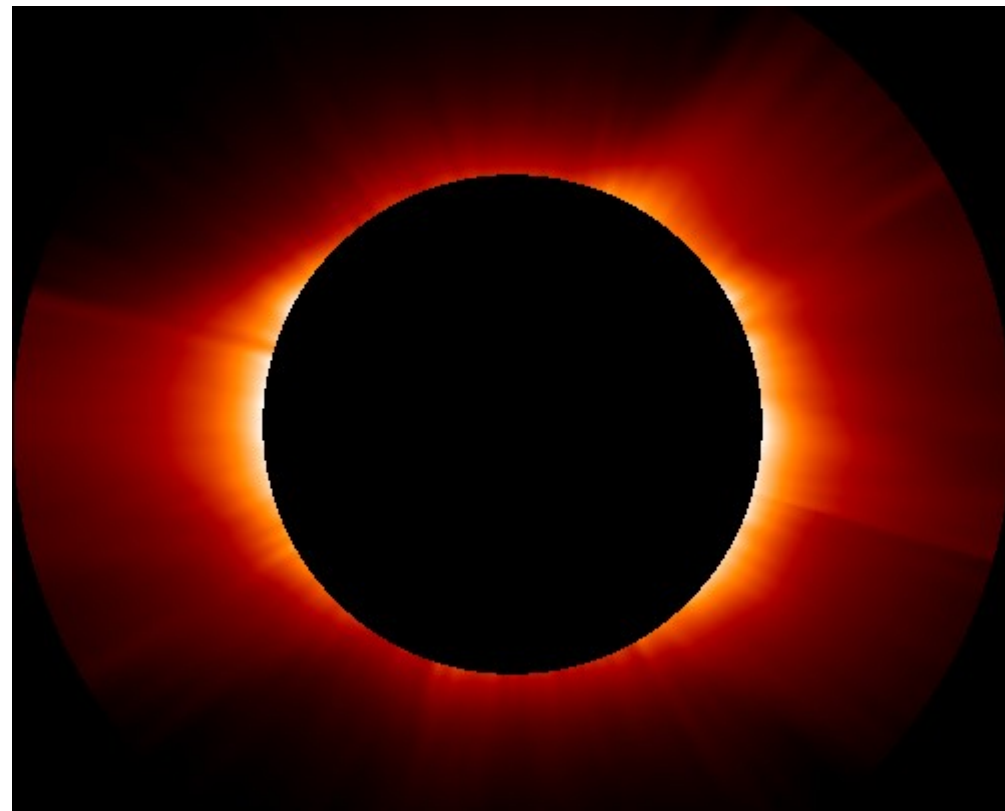
a) zbieraniem linii pola międzygwiazdowego przy kontrakcji materiału z chmury w gwiazdę i

b) efektem dynamo spowodowanego rotacją zjonizowanego gazu.

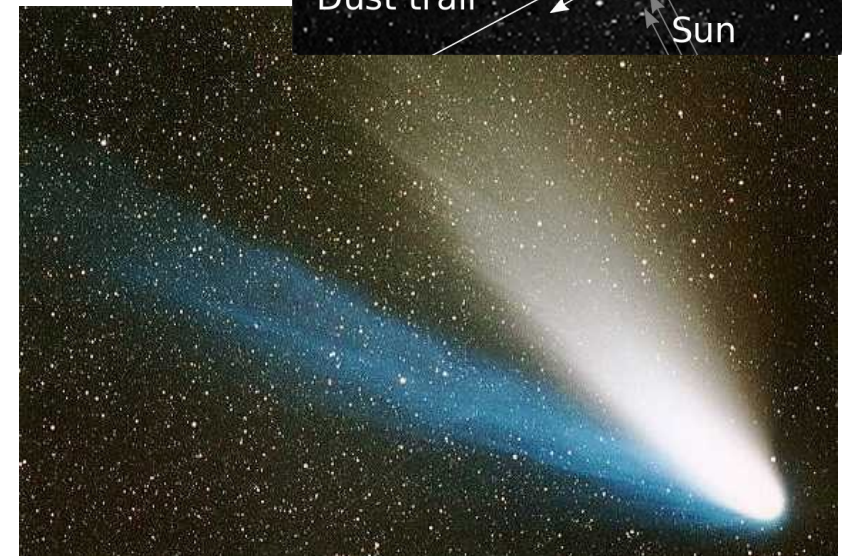
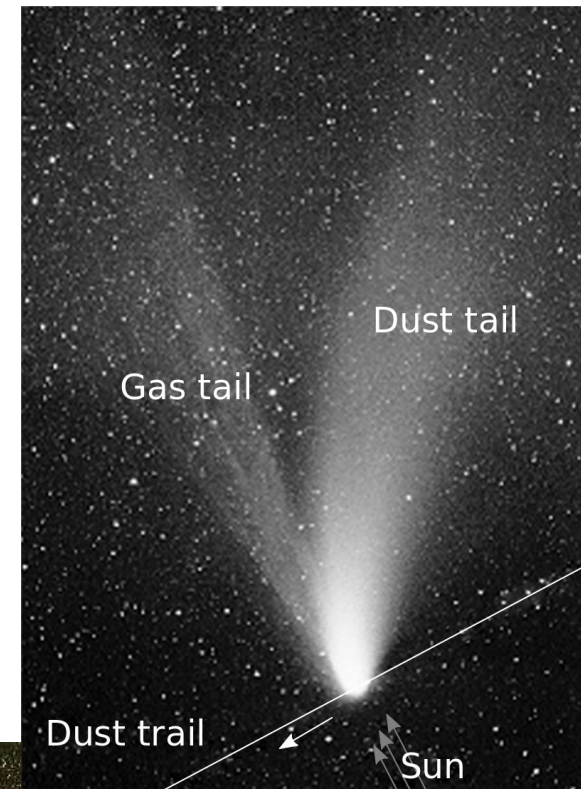
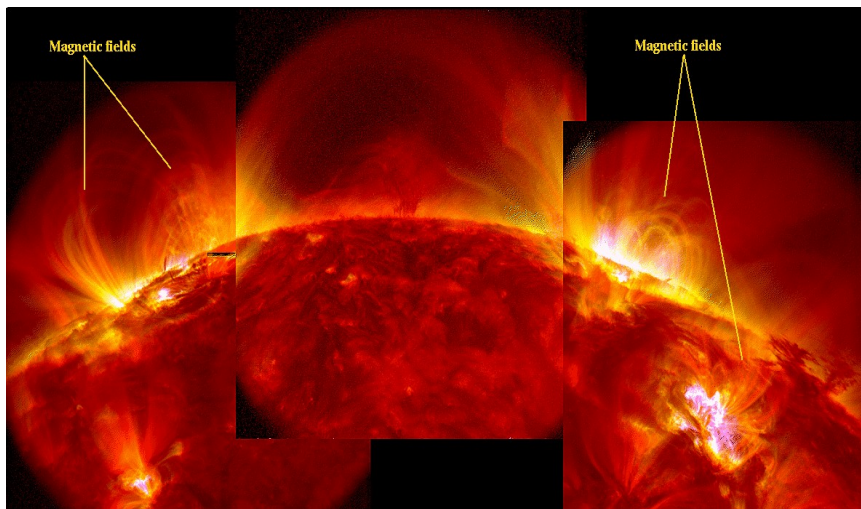


Bonus: strugi, często obserwowane u narodzin gwiazd, byłyby wtedy też wynikiem działania pola magnetycznego. Wydaje się to być jedyną możliwością dla tak perfekcyjnej kolimacji wyrzuconej materii jaką obserwujemy w strugach.

Pole magnetyczne Słońca i wiatr słoneczny

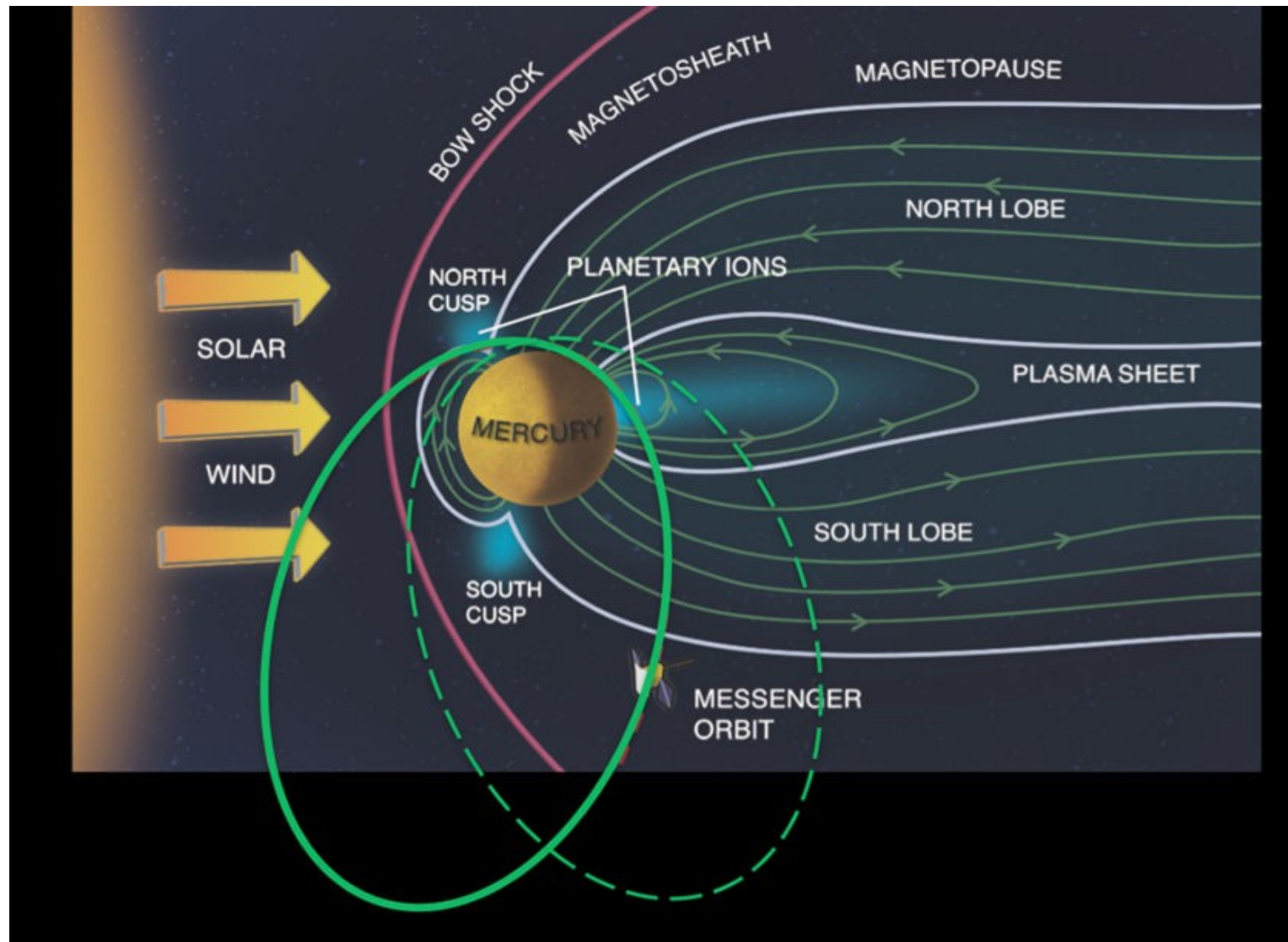


- Wiatr słoneczny, cząstki plazmy są przyspieszane polem magnetycznym Słońca.



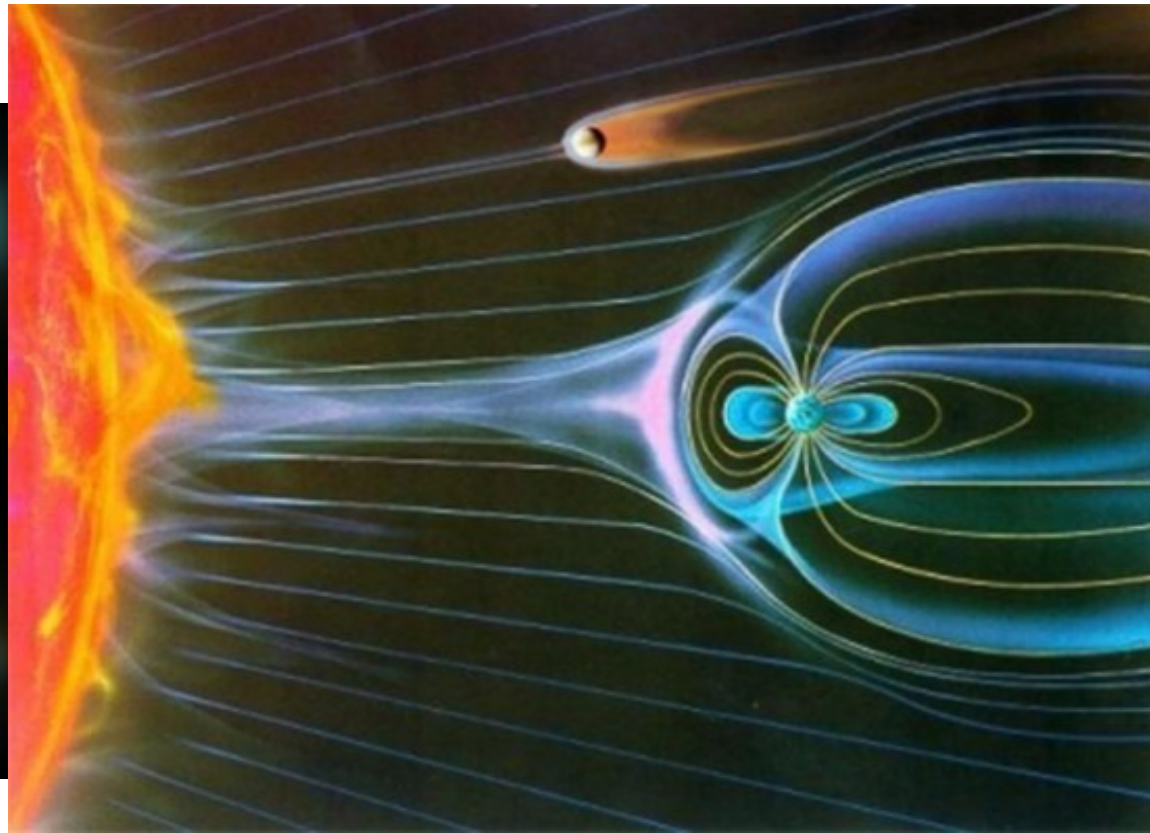
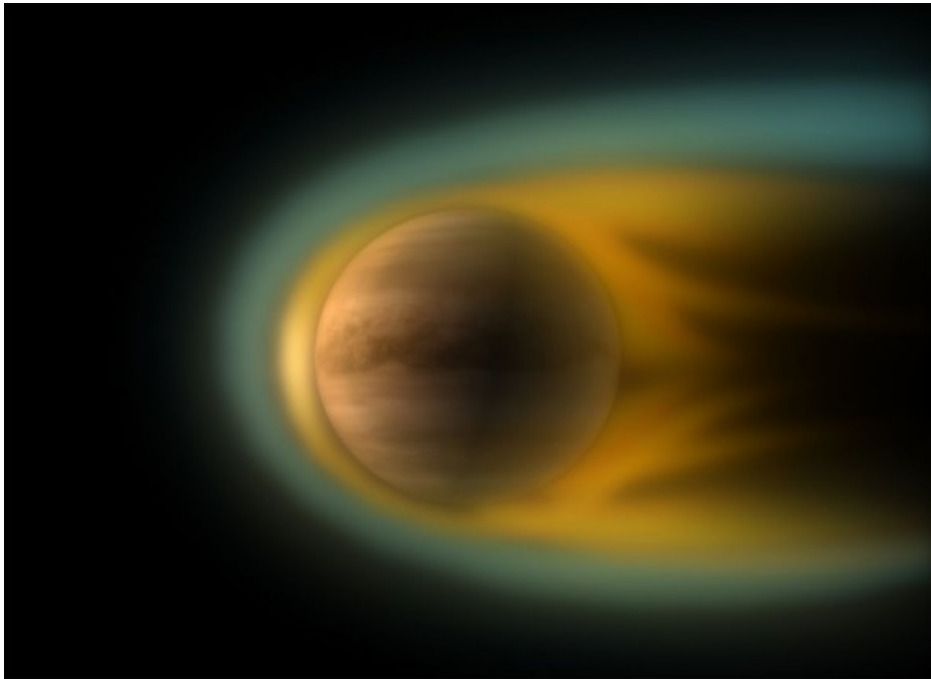
- Dwa ogony komety: jeden, gazowy, jest zawsze dokładnie w kierunku odwrotnym od Słońca, drugi, z piłu, jest dłuższy, odchylny od linii do Słońca i zakrzywiony.

Zorza polarna na Merkurym



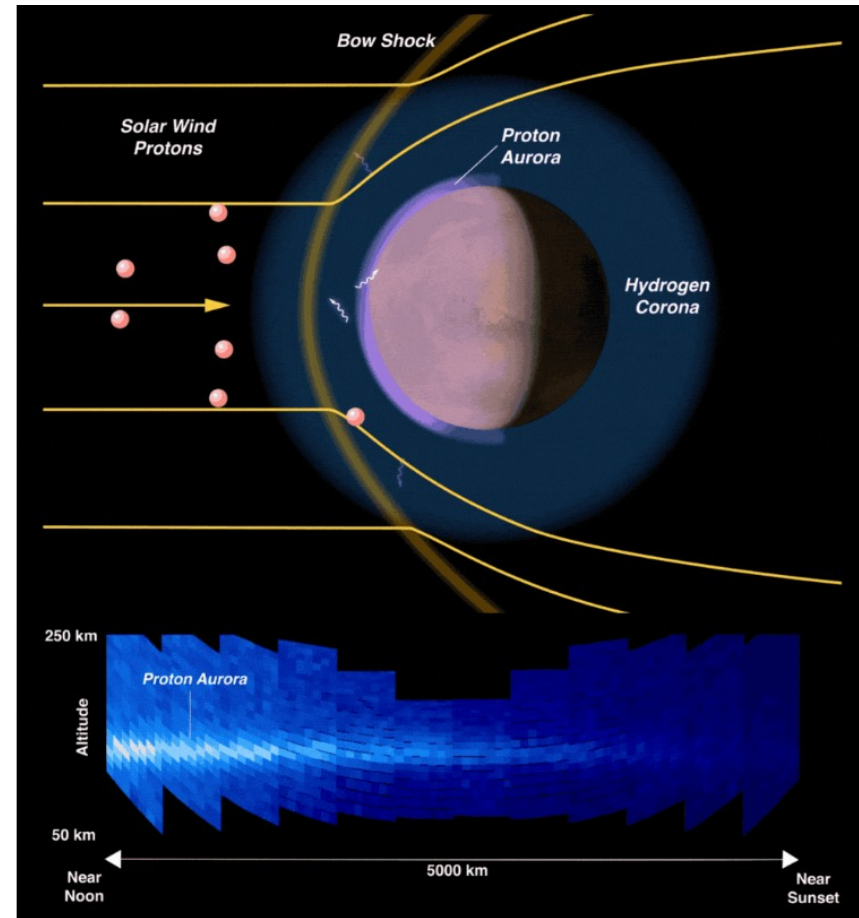
- Na Merkurym też zaobserwowano zorze polarną.

Zorza polarna na Wenus



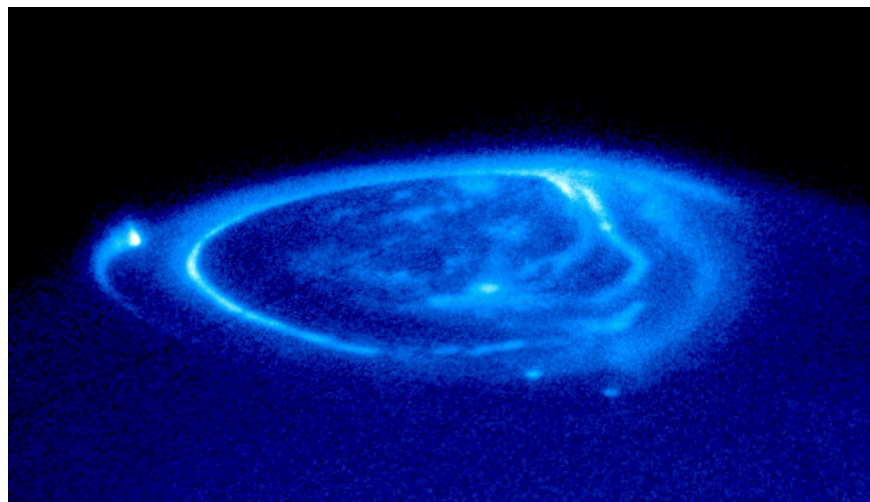
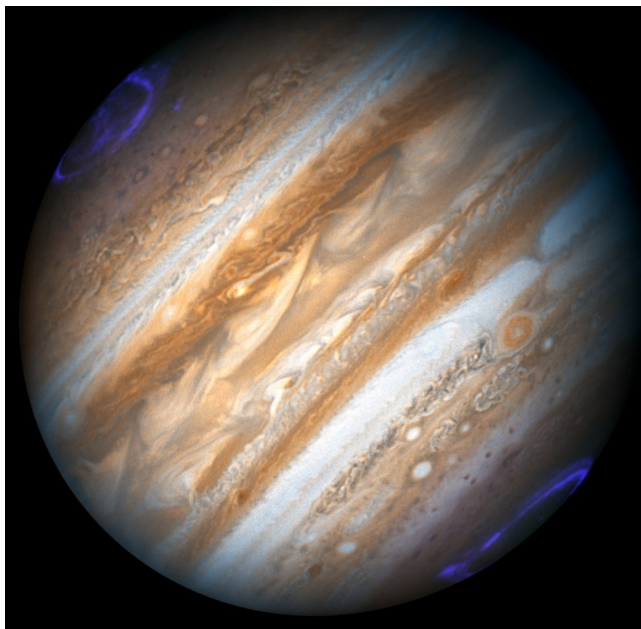
- Wenus ma wydłużony ogon magnetosfery, z mniejszą częścią w kierunku Słońca niż Ziemia.

Zorza polarna bez planetarnego pola magnetycznego: Mars

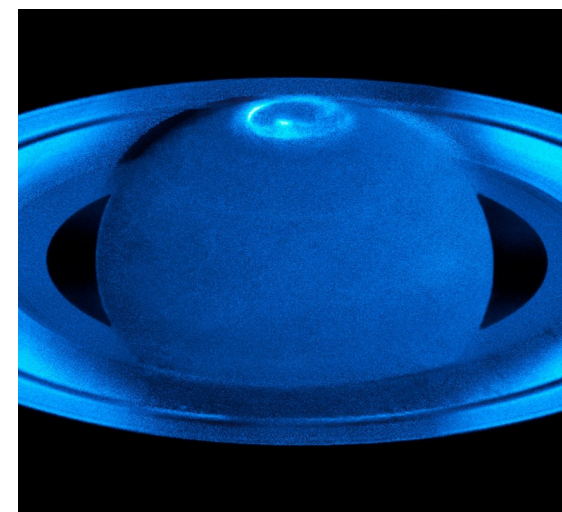
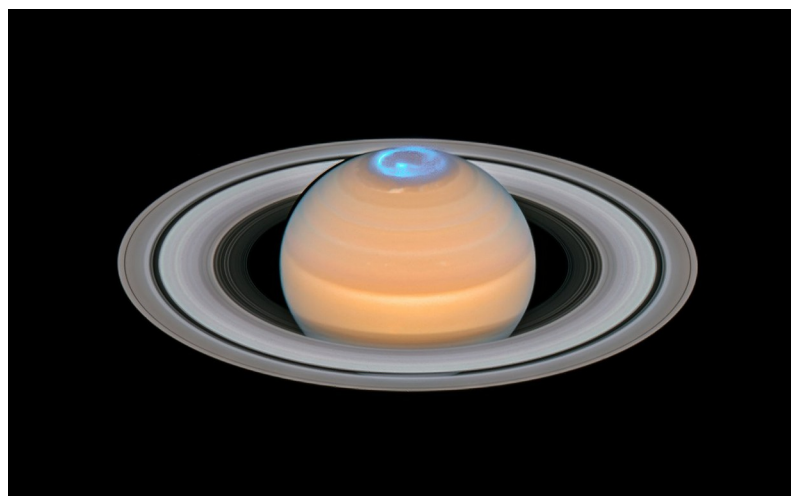
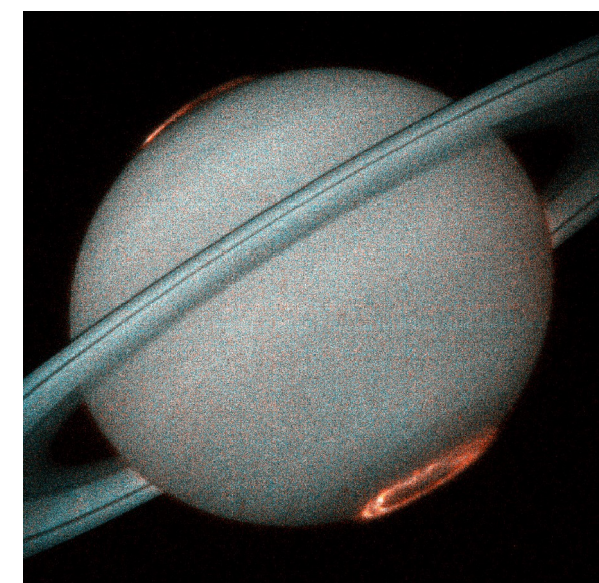


- Protony z wiatru słonecznego zderzają się z ciekłą atmosferą Marsa i pobudzają gaz w szoku uderzeniowym-zorza polarna po nasłonecznionej stronie planety. Obserwacje sondą NASA “MAVEN”.

Pole magnetyczne planet: zorza polarna na innych planetach-Jowisz i Saturn

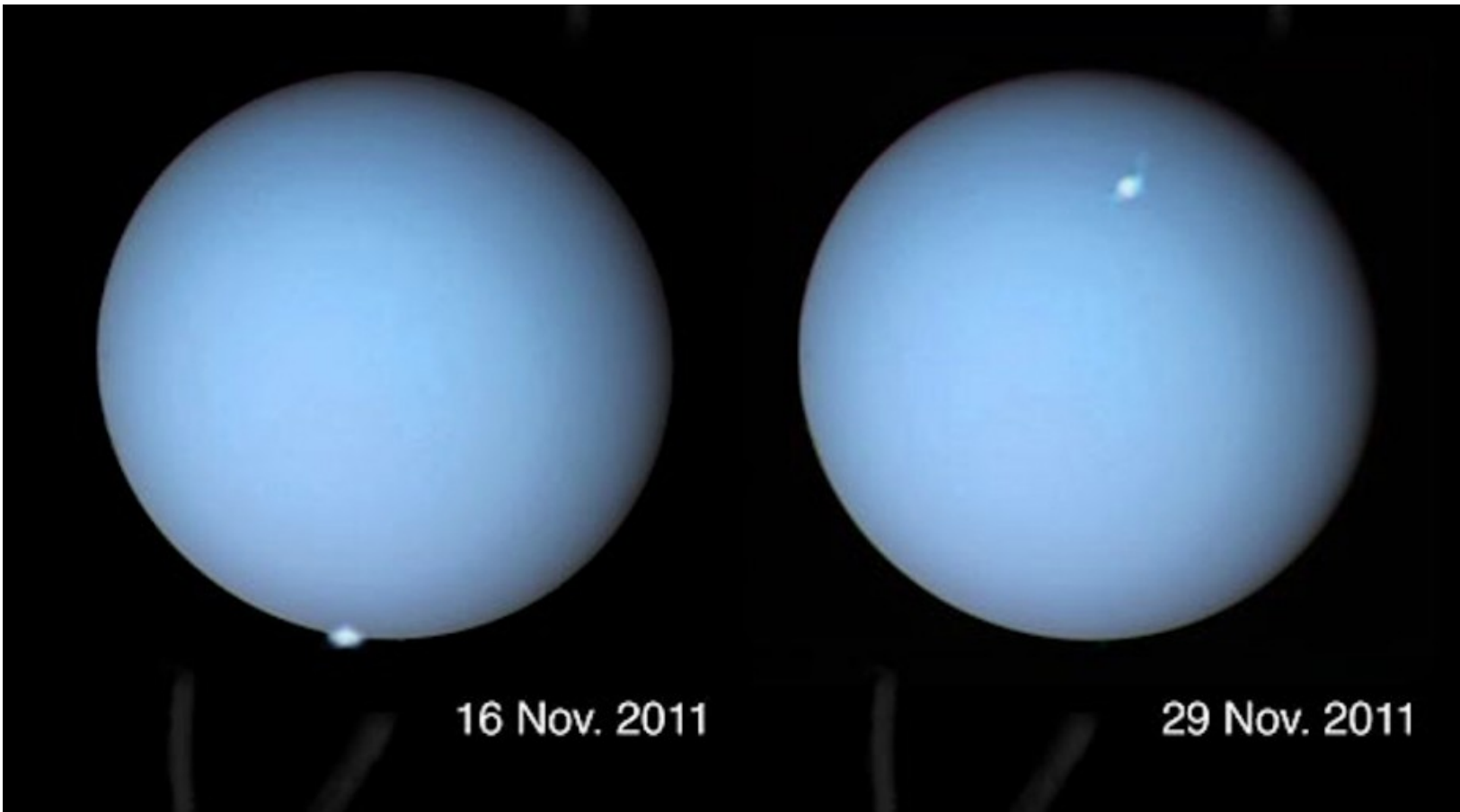


- -Aurora na Jowiszu, zdjęcie z HST. Plama po lewej stronie jest magnetycznie połączona z Io; plamy na dole z Ganymedem i Europą.



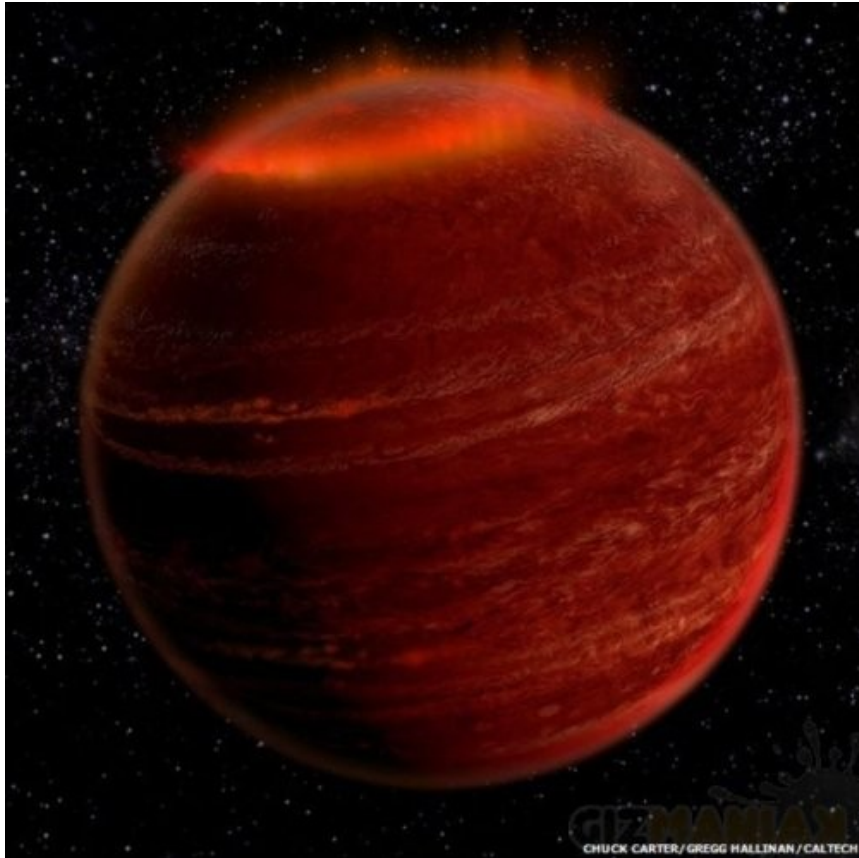
- W odróżnieniu od ziemskiej zorzy polarnej, na gazowych planetach ona jest wydoczna głównie w ultrafiolecie-którego nie widać z Ziemi. Dlatego takie obserwacje są wykonywane teleskopem Hubble'a na orbicie okołoziemskiej.

Zorza polarna na Uranie



- W r. 2011 i później 2012 i 2014 HST obserwował zorze polarną na Uranie.

Zorza polarna poza Układem Słonecznym



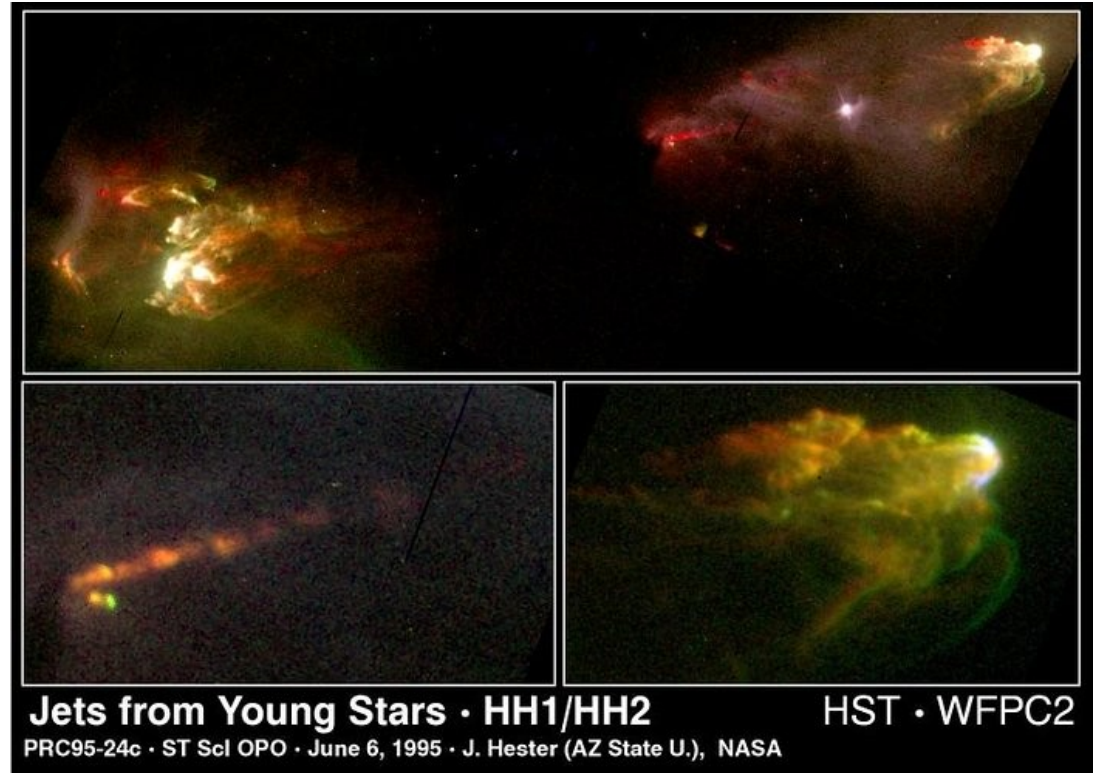
- W r.2015 zaobserwowano z pomocą dużych naziemnych teleskopów zorze polarną koło brązowego karła LSR J1835+3259, w gwiazdozbiornie Liry, na odległości około 18 lat świetlnych od Ziemi. Tutaj rysunek, nie prawdziwe zdjęcie, ale faktem jest że zanotowana zorza polarna jest czerwona, z powodu więcej wodoru w atmosferze. Taka zorza jest około milion razy bardziej intensywna niż ziemska! Musi być też zupełnie innej natury, bo nie ma innej gwiazdy w pobliżu do tworzenia wiatru gwiazdowego. Może planeta w orbicie koło takiej gwiazdy?
- Brązowe karły to “nieudane gwiazdy”-mają niewystarczającą masę na zapalenie reaktora termojądrowego w środku.

Pole magnetyczne w gwiazdach

NAME Burnham's Nebula

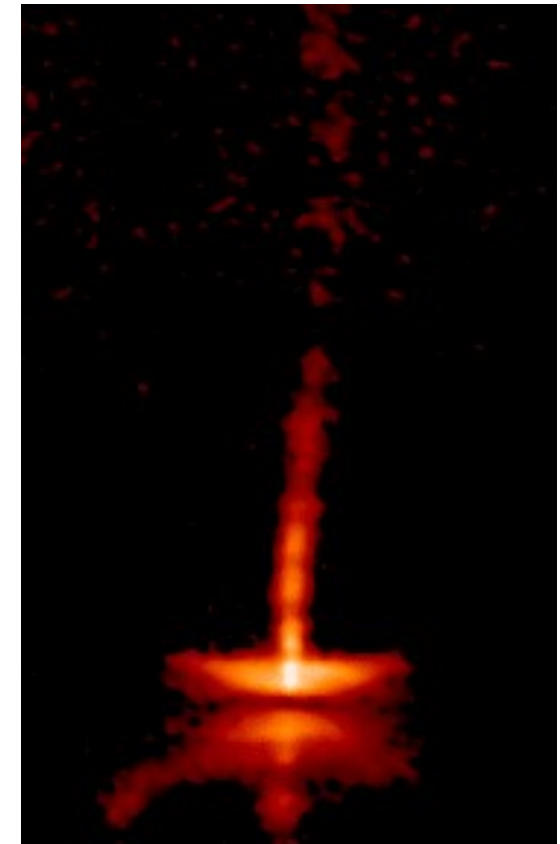
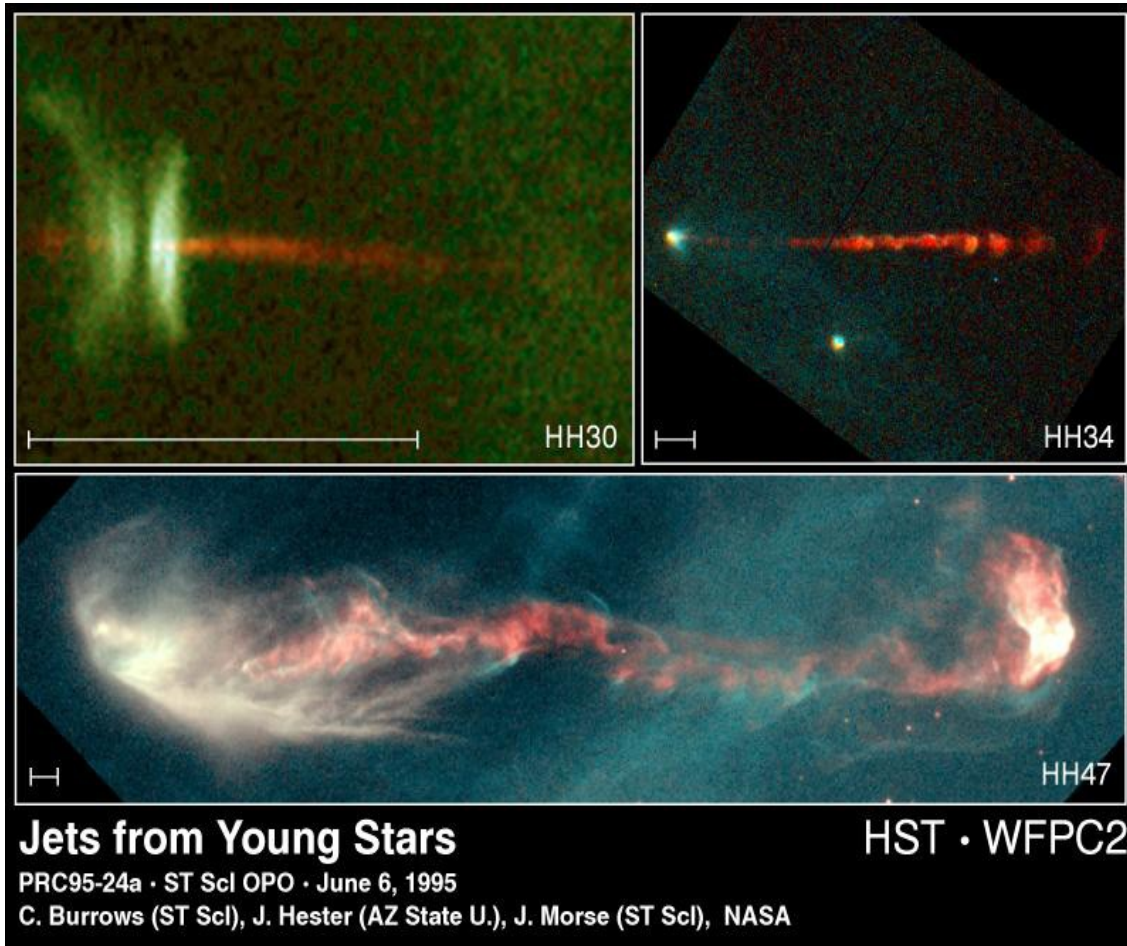
30"

Okolice młodych gwiazd z obłokami gazu i pyłu: obserwacje od końca 19-ego wieku, mgławica Burnhama obok gwiazdy T-Tauri, (HH255), tutaj na zdjęciu z bazy danych SIMBAD.



- HH 1, 2 widziane przez HST.

Dysk akrecyjny i strugi u gwiazd

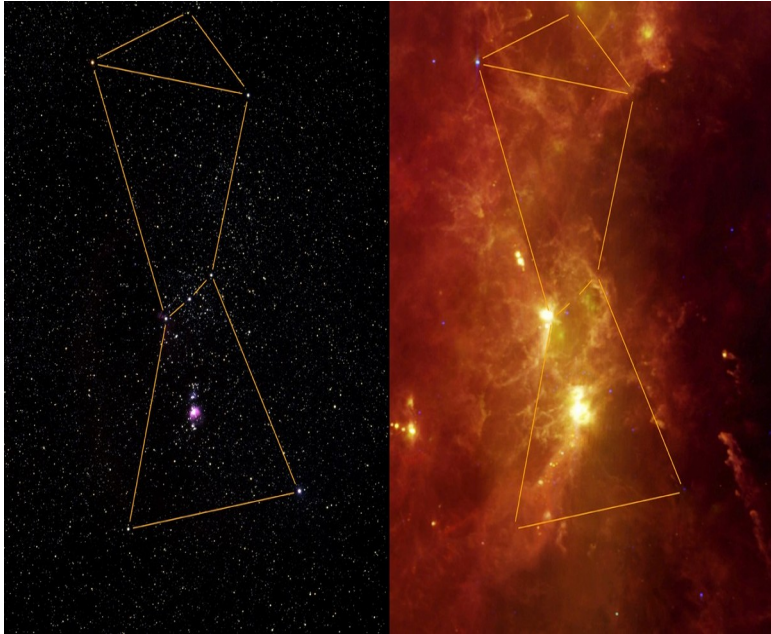


NASA HST/Wide Field and Planetary Camera 2.

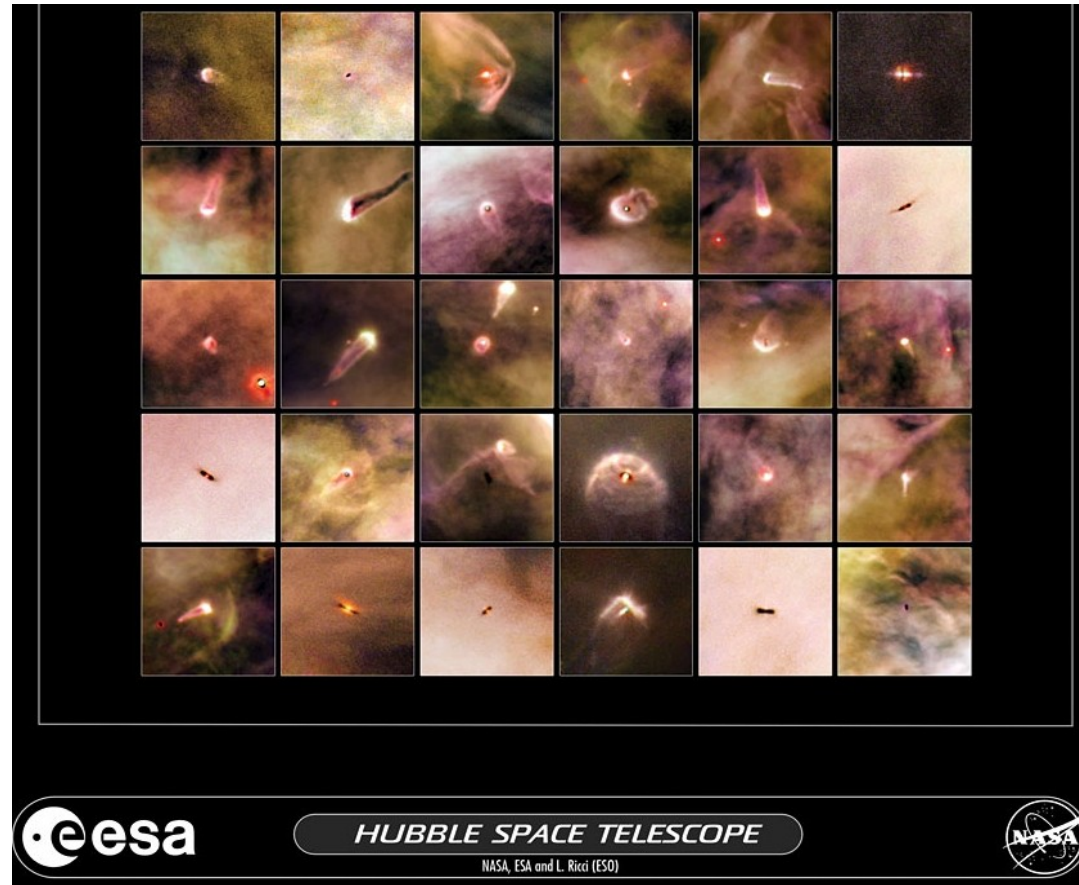
- Dobrze wiemy jak strugi się poruszają przez przestrzeń, ale jeszcze nie wiemy jak powstają. Widać że z dysku, ale jak, dokładnie? W jaki sposób są tak bardzo skolimowane? Skąd “węzły”, poruszająca się substruktura strug?

Dysk akrecyjny i strugi u gwiazd

- Strugi **zawsze** idą w parze z dyskiem akrecyjnym i prędkość strugi jest koło prędkości ucieczki z centralnego obiektu.



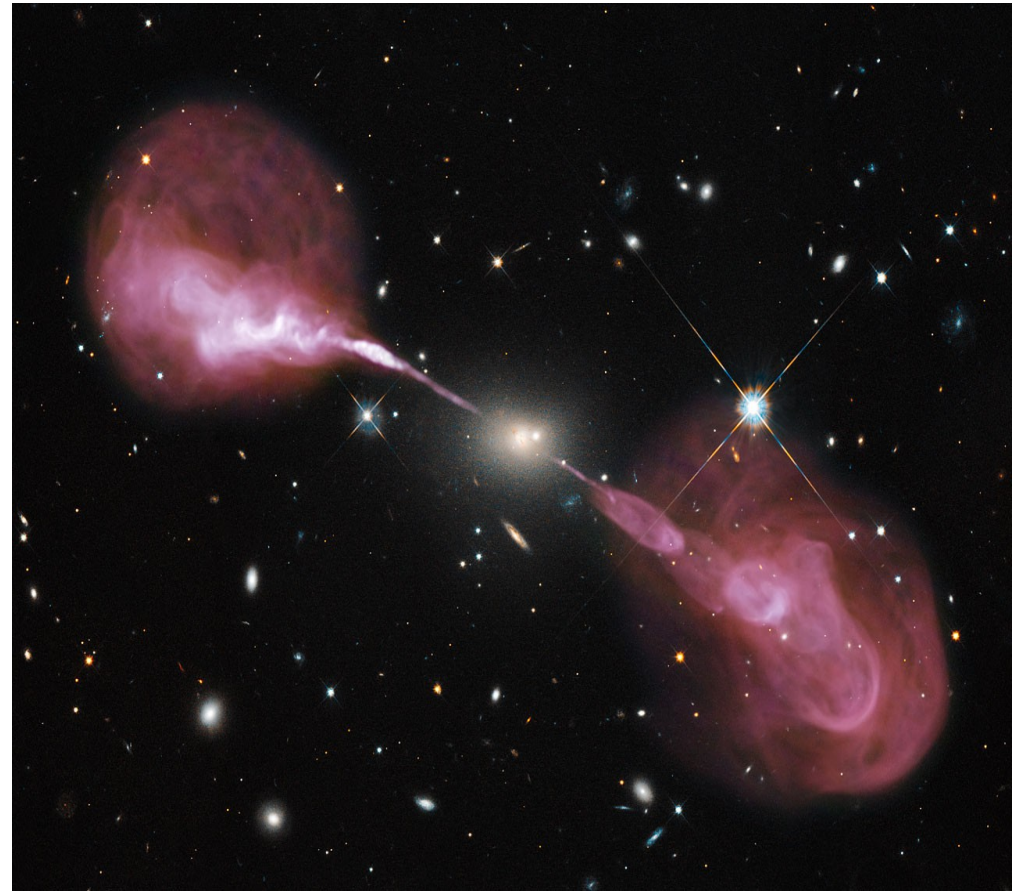
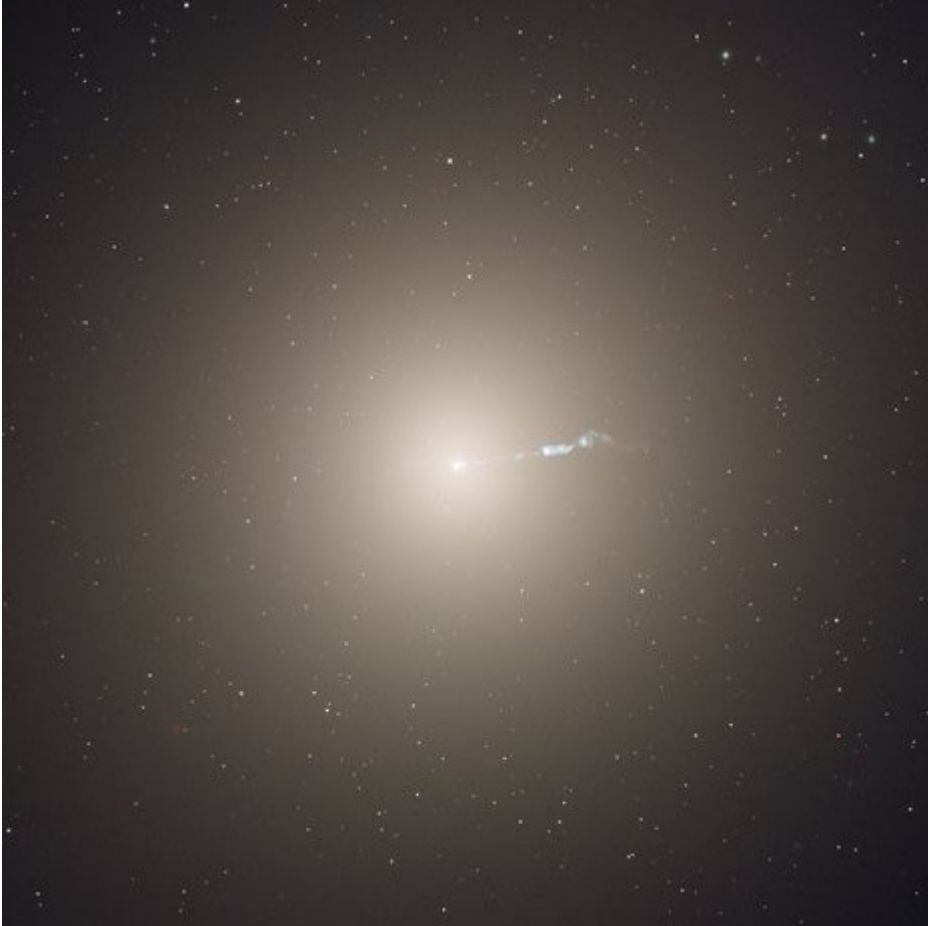
Mgławica Oriona i dyski i strugi w niej.



- Mechanizm wyprowadzenia momentu pędu z systemu. Pole magnetyczne wydaje się mieć istotną rolę w wyprowadzenia momentu pędu z systemu. Dyskom często towarzyszą strugi.
- Strugi z młodych gwiazd mogą wprowadzać pole magnetyczne w przestrzeń międzygwiazdową, a z aktywnych galaktyk w przestrzeń międzygalaktyczną.

Galaktyczne dyski i strugi

- Przez długi czas tylko jedna galaktyka, M87 (Curtis 1918), była przykładem galaktyki z strugą, ale HST pokazał nam ich o wiele więcej.



- M87 na zdjęciu z HST.

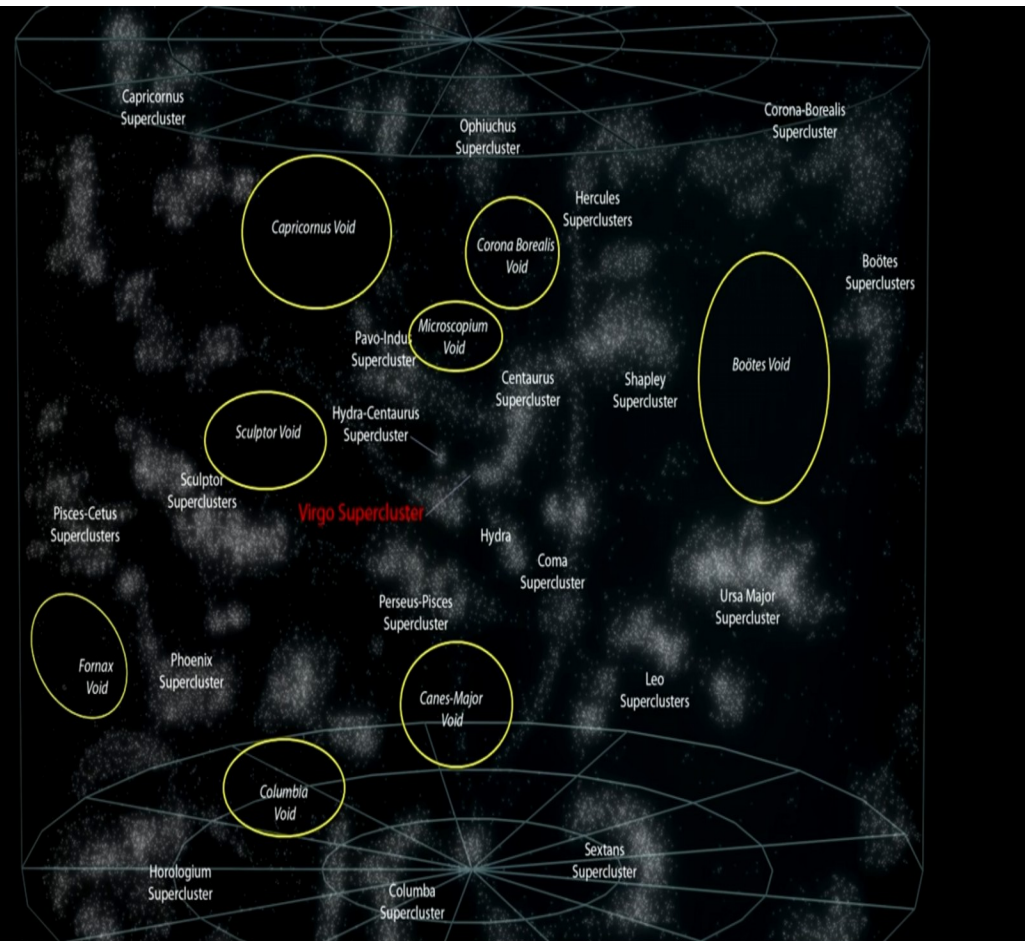
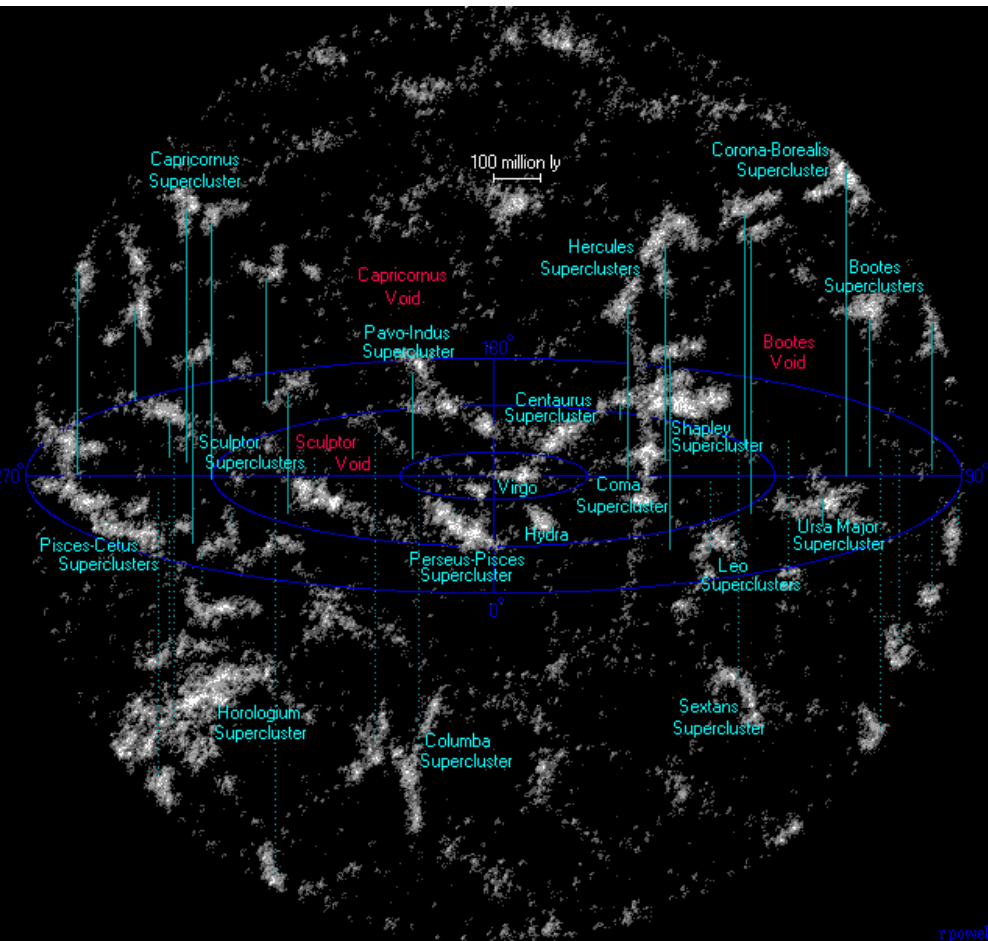
- Strugi z supermasywnej czarnej dziury w centrum galaktyki Hercules A. HST i VLA radio teleskop.

Pole magnetyczne galaktyk: jak go mierzymy

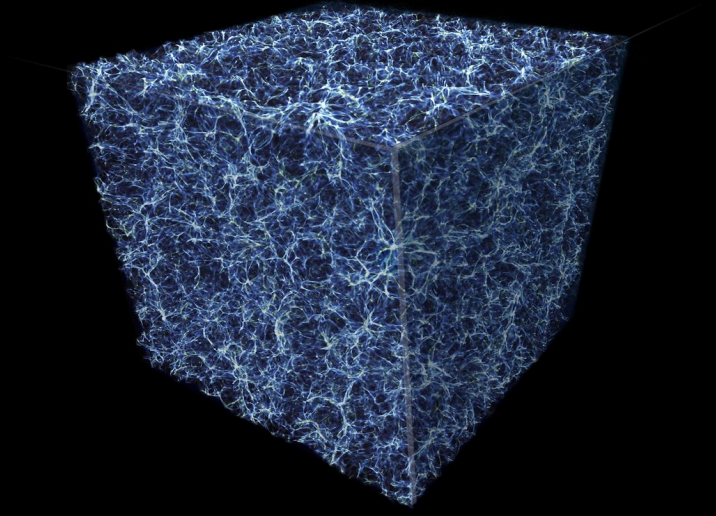


Obserwując strukturę wiązek koło galaktyk, można ustalić natężenie pola magnetycznego w przestrzeni międzygalaktycznej w gromadzie galaktyk. Średnica zdjęcia jest koło 260 000 lat świetlnych.

Pole magnetyczne między galaktykami, pustki



- Pomiedzy gromadami galaktyk obserwujemy mniejsze lub większe pustki, w których jest znacznie mniej galaktyk niż wokół nich. Czy w tych pustkach też istnieje pole magnetyczne? Jeżeli tak, jak powstało? Takie galaktyki nie miały od powstania wystarczająco czasu żeby się obrócić koło osi na tyle razy żeby zadziałało dynamo.



Pierwotne pole magnetyczne

- Na razie nie wiemy dokładnie skąd pole magnetyczne we wszechświecie. Większość mechanizmów, np. dynamo magnetyczne w galaktykach czy gwiazdach, potrafi jedynie wzmocnić już istniejące pole ale nie może go wytworzyć “od zera”
- Jeden z zaproponowanych mechanizmów jest niestabilność Weibela, którą odkryto w 1959 r., która powoduje powstanie pola magnetycznego w jednorodnej plazmie w której poruszają się dwa przeciwnie skierowane strumienie cząstek (np. gdy w plazmie obecne są obszary o różnej temperaturze). W wyniku ruchu cząstek pojawia się pole elektromagnetyczne.
- Istnieje wielu innych modeli, z fazowymi przejściami, efektami kwantowymi itp.

Podsumowanie

- Skąd pola magnetyczne we wszechświecie? **Nie wiemy dokładnie.**
- Dlaczego nas interesują? **Są istotne do wytłumaczenia niektórych zjawisk.**
- Na jakich skalach je obserwujemy? **Od atomowych do kosmologicznych.**
- Jakiego są natężenia? **Nano-Gauss (10^{-9}) do 10^{15} Gauss**
- Gdzie się powołujemy na pole magnetyczne w astrofizyce do wytłumaczenia obserwowanych zjawisk? **Wszędzie! Ziemia, gwiazdy (Słońce!), dyski i strugi (gwiazdne i galaktyczne), przestrzeń międzygwiazdowa i międzygalaktyczna.**