

Astrofizyka Układów Planetarnych

7 MAGNETOSFERY



Magnetosfery

Magnetosfery – magnetyczne bąble

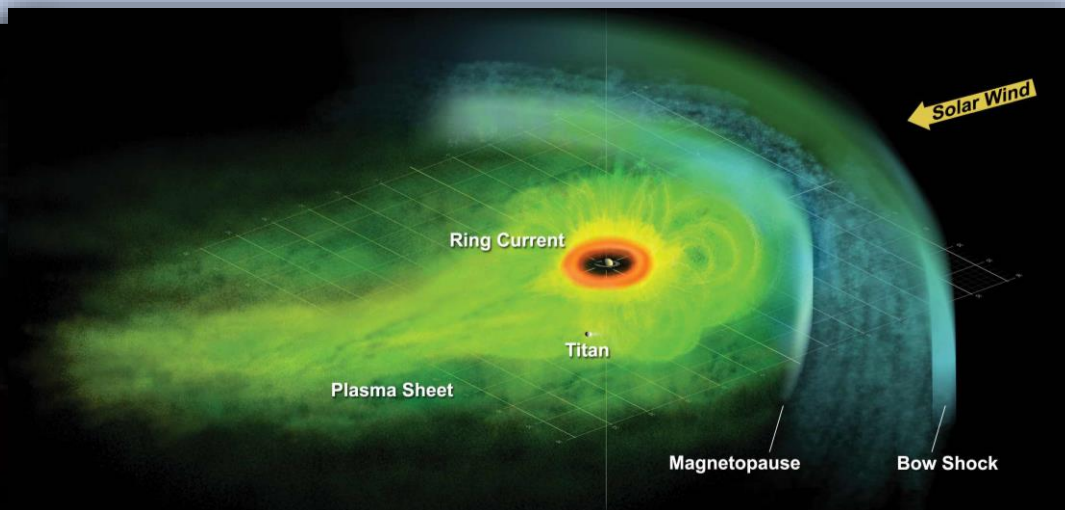
Większość planet otoczonych jest przez własne pola magnetyczne, tzw. magnetosfery. Są to jedne z największych struktur w Układzie Słonecznym. Źródłem pola magnetycznego jest mechanizm dynama (Merkury, Ziemia, planety olbrzymy), oddziaływanie jonosfery z wiatrem słonecznym (Wenus, komety) lub namagnesowanie szczątkowe skorupy (Mars).

Kształt magnetosfery zależy od siły pola magnetycznego, przepływu wiatru słonecznego i ruchu naładowanych cząstek w magnetosferze. Źródłami tych cząstek są wiatr słoneczny, atmosfera, satelity lub pierścienie.

Pole mag. generowane we wnętrzu obiektu ogranicza ucieczkę atmosfery, może być więc czynnikiem kształtującym warunki planetarne, w tym te związane z możliwością istnienia życia. Magnetosfery można badać „na miejscu” (orbitery, sondy) lub na odległość (fale radiowe).



Wizja artystyczna indukowanej wiatrem słonecznym magnetosfery Wenus.



Wizualizacja magnetosfery Saturna wykonana na danych z orbitera Cassini.

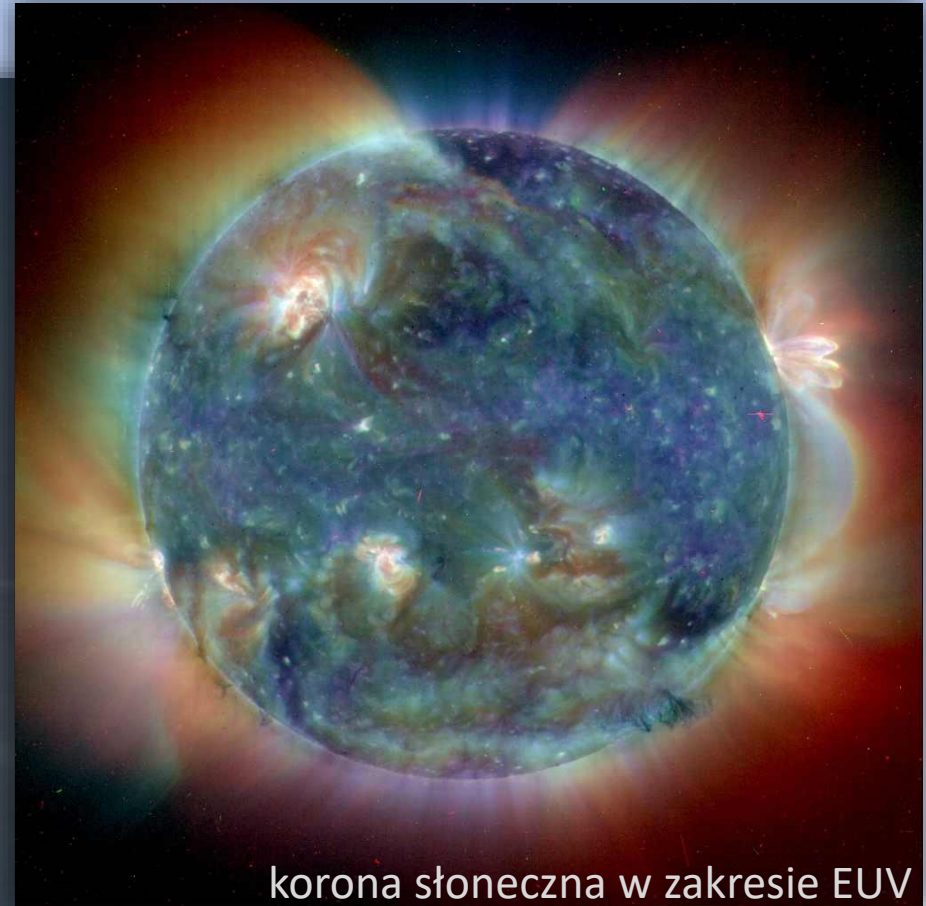
Magnetosfery

Wiatr słoneczny

Z korony słonecznej w sposób ciągły wypływa strumień naładowanych cząstek (H^+ , e^-) unoszący słoneczne pole magnetyczne zwany wiatrem słonecznym. Wiatr ten wypełnia przestrzeń Układu Słonecznego tworząc heliosferę.



korona słoneczna w czasie zaćmienia

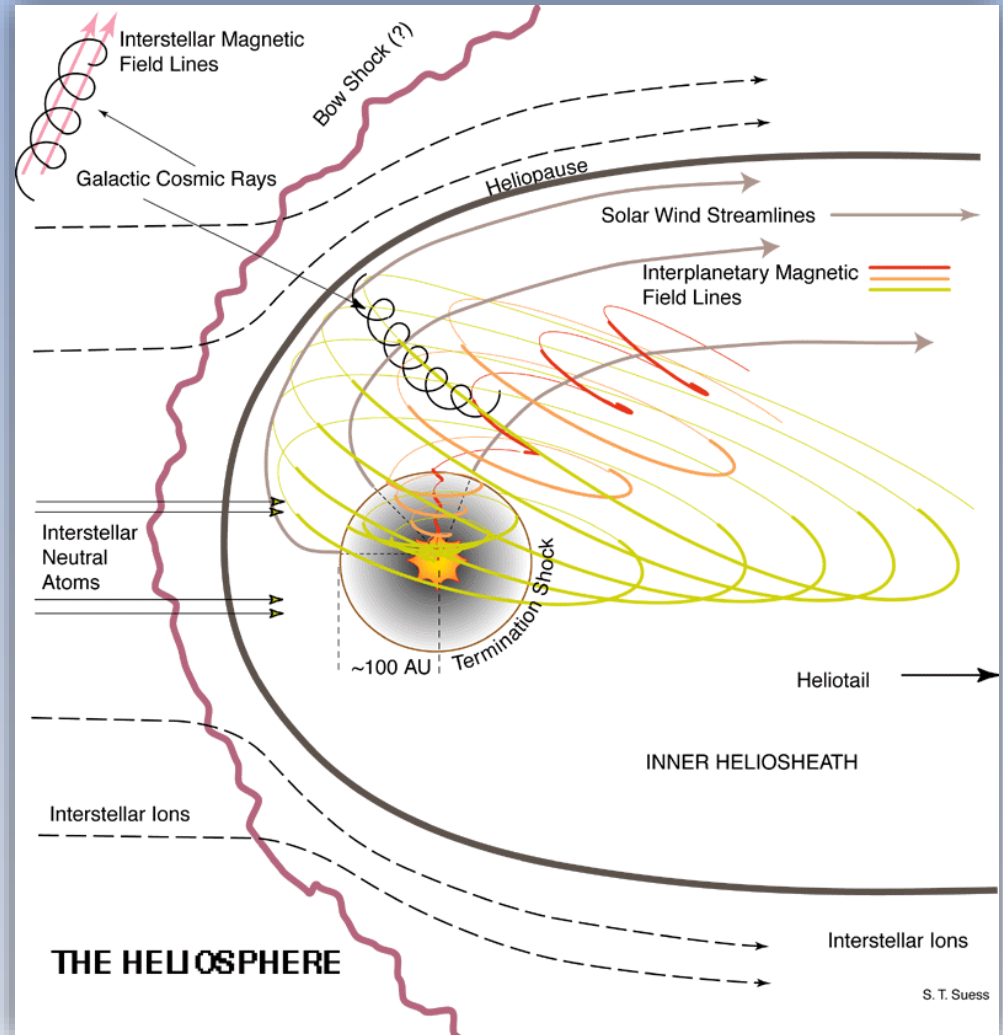


korona słoneczna w zakresie EUV

Magnetosfery

Wiatr słoneczny

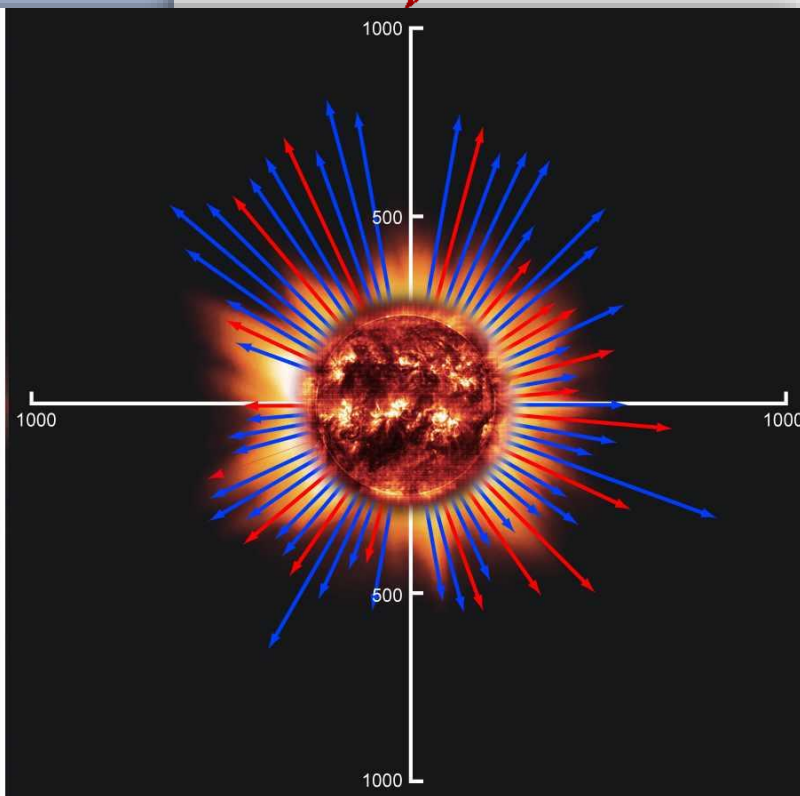
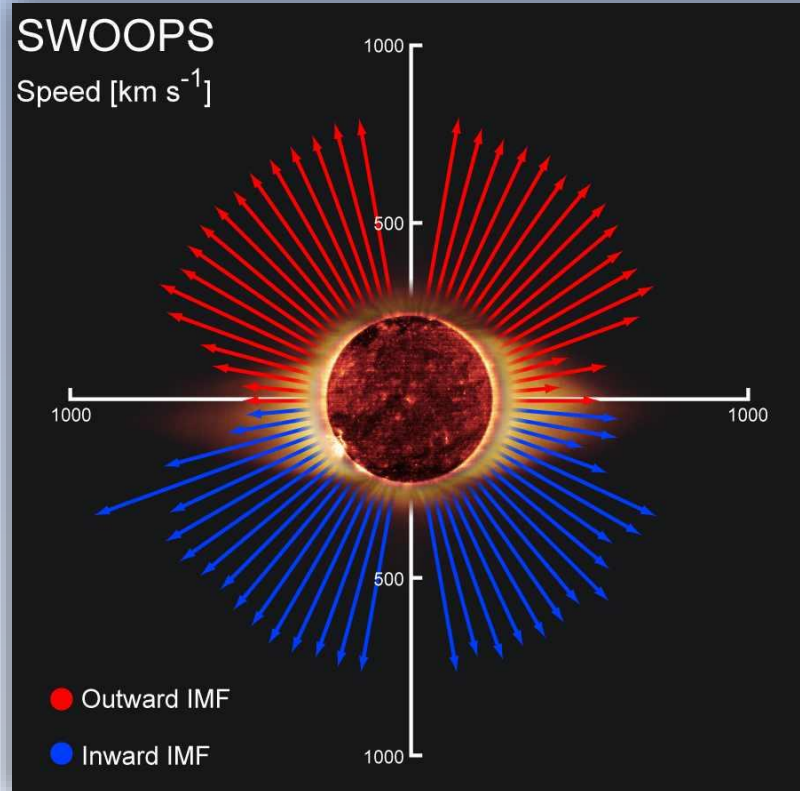
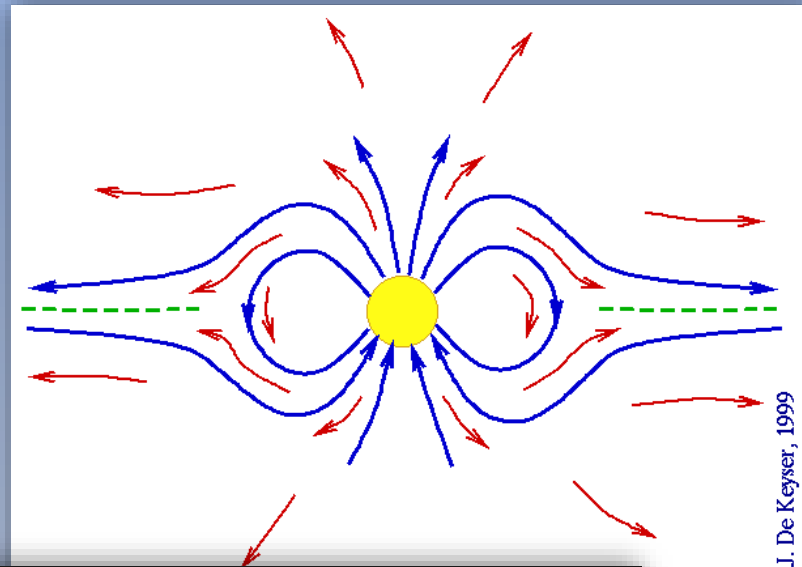
Z korony słonecznej w sposób ciągły wypływa strumień naładowanych cząstek (H^+ , e^-) unoszący słoneczne pole magnetyczne zwany wiatrem słonecznym. Wiatr ten wypełnia przestrzeń Układu Słonecznego tworząc heliosferę.



Magnetosfery

Wiatr słoneczny

Na odległości Ziemi wiatr słoneczny ma średnio prędkość około 400 km/s (przepływ naddźwiękowy) i gęstość ~ 5 protonów /cm³. Wiatr pochodzący z dziur koronalnych jest rzadszy, ale szybszy od wiatru z innych części korony. Struktura wiatru i jego własności zmieniają się z cyklem aktywności Słońca.

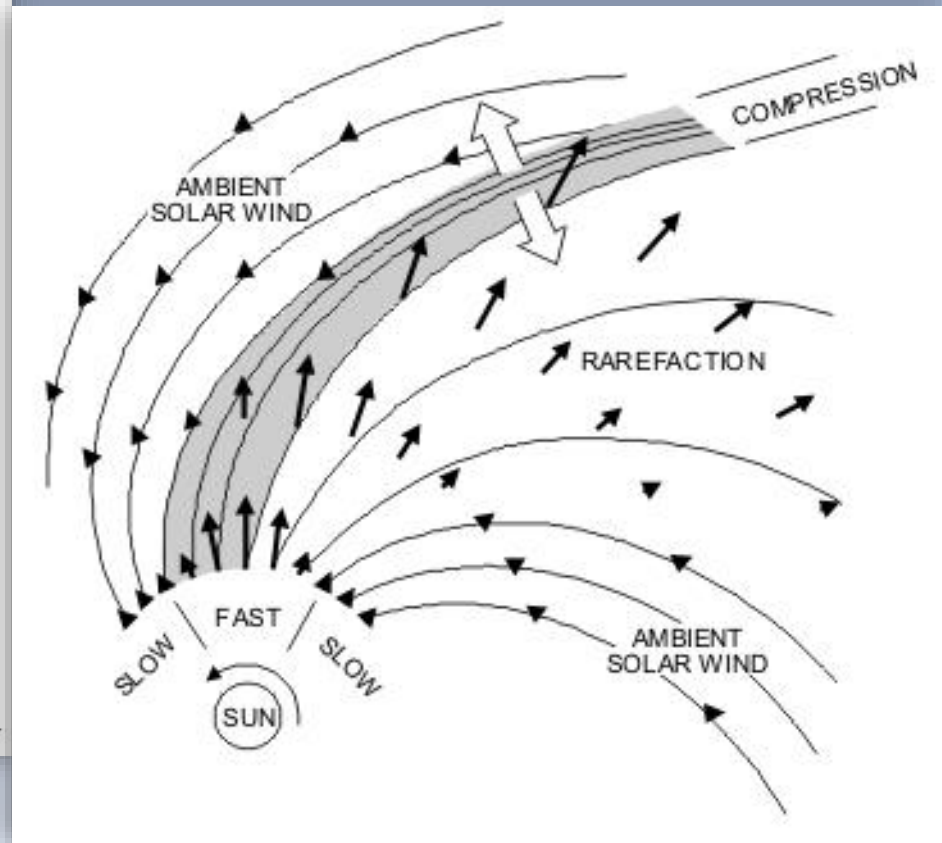
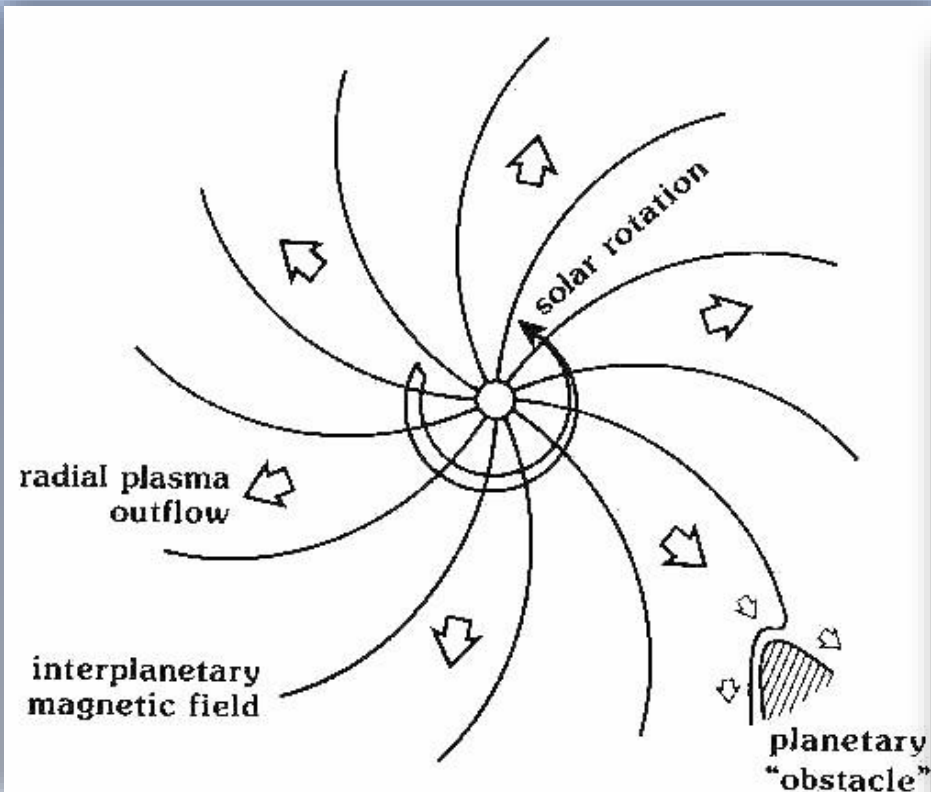


Prędkość wiatru słonecznego zmierzona przez sondę Ulysses dla minimum (lewy) i maksimum (prawy) aktywności.

Magnetosfery

Wiatr słoneczny

Unoszone ze Słońca przez wiatr pole magnetyczne to tzw. **międzyplanetarne pole magnetyczne** (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*). Teoretycznie linie tego pola mają kształt spirali Archimedesesa (radialny wypływ wiatru + obrót Słońca + „wmrożenie” linii magnetycznych w plazmę). Obszary o różnej prędkości wiatru oraz CME zaburzają ten obraz (zagęszczenia, fale uderzeniowe).

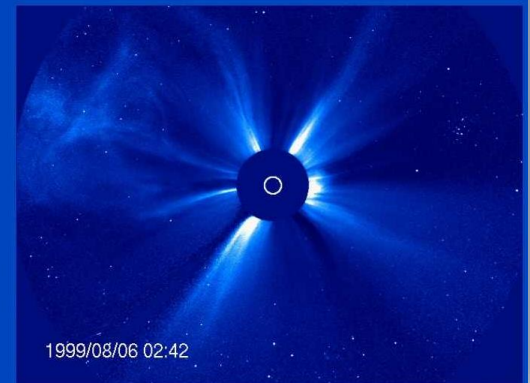
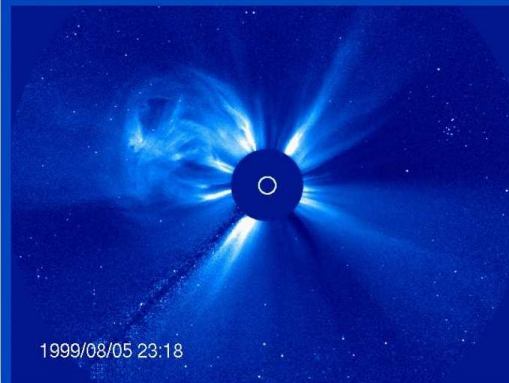
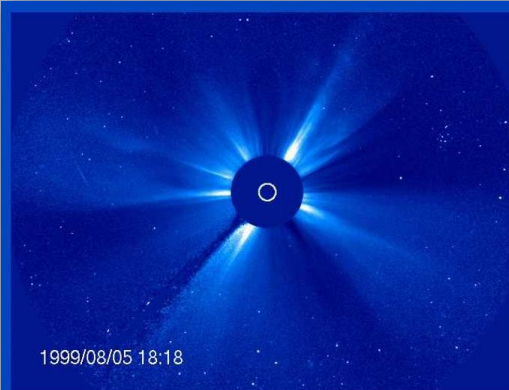
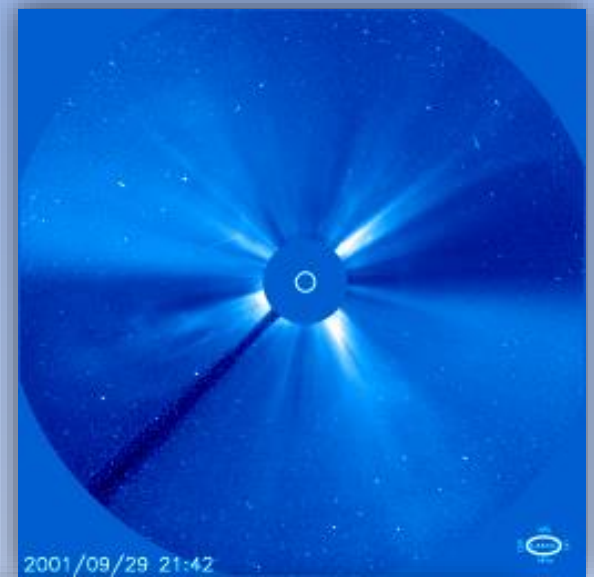


Magnetosfery

Wiatr słoneczny

Podczas **koronalnych wyrzutów masy** (*CME – coronal mass ejection*) do spokojnego wiatru dodawana jest spora porcja gęstszej materii o prędkości nawet >1000 km/s. Liczba CME zależy od stanu aktywności Słońca.

Sekwencja obrazów korony słonecznej wykonanych koronografem LASCO (widoczne CME)



Magnetosfery

Oddziaływanie wiatru słonecznego z ciałami Układu Słonecznego

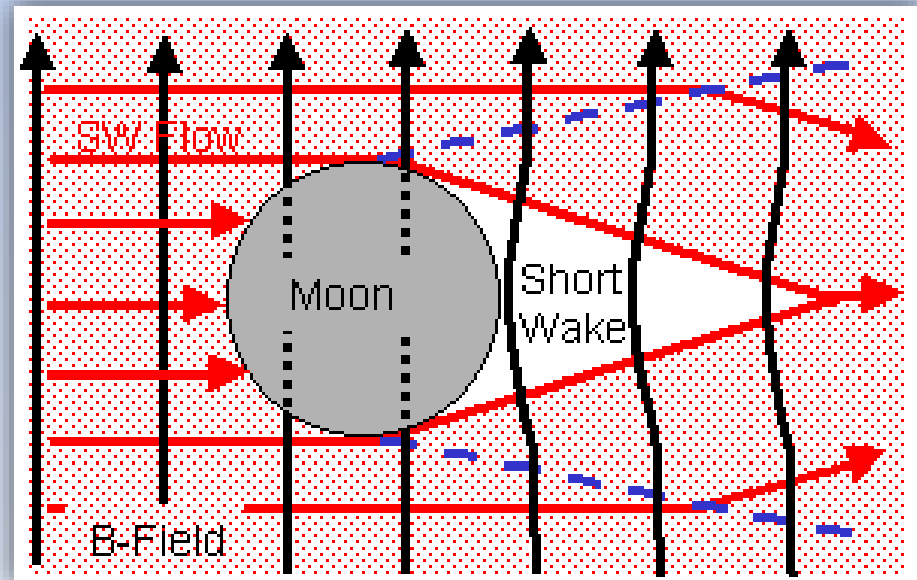
Sposób oddziaływania obiektu z wiatrem słonecznym zależy od jego przewodnictwa elektrycznego, obecności atmosfery i wewnętrznego pola magnetycznego.

słabe przewodnictwo, brak atmosfery i własnego pola mag.

W tym przypadku cząstki wiatru słonecznego uderzają w powierzchnię ciała i są pochłaniane. Pole magnetyczne przenika obiekt. Za obiektem powstaje stożkowy cień plazmowy.

wake – ślad torowy, kilwater

przykład: Księżyc



Magnetosfery

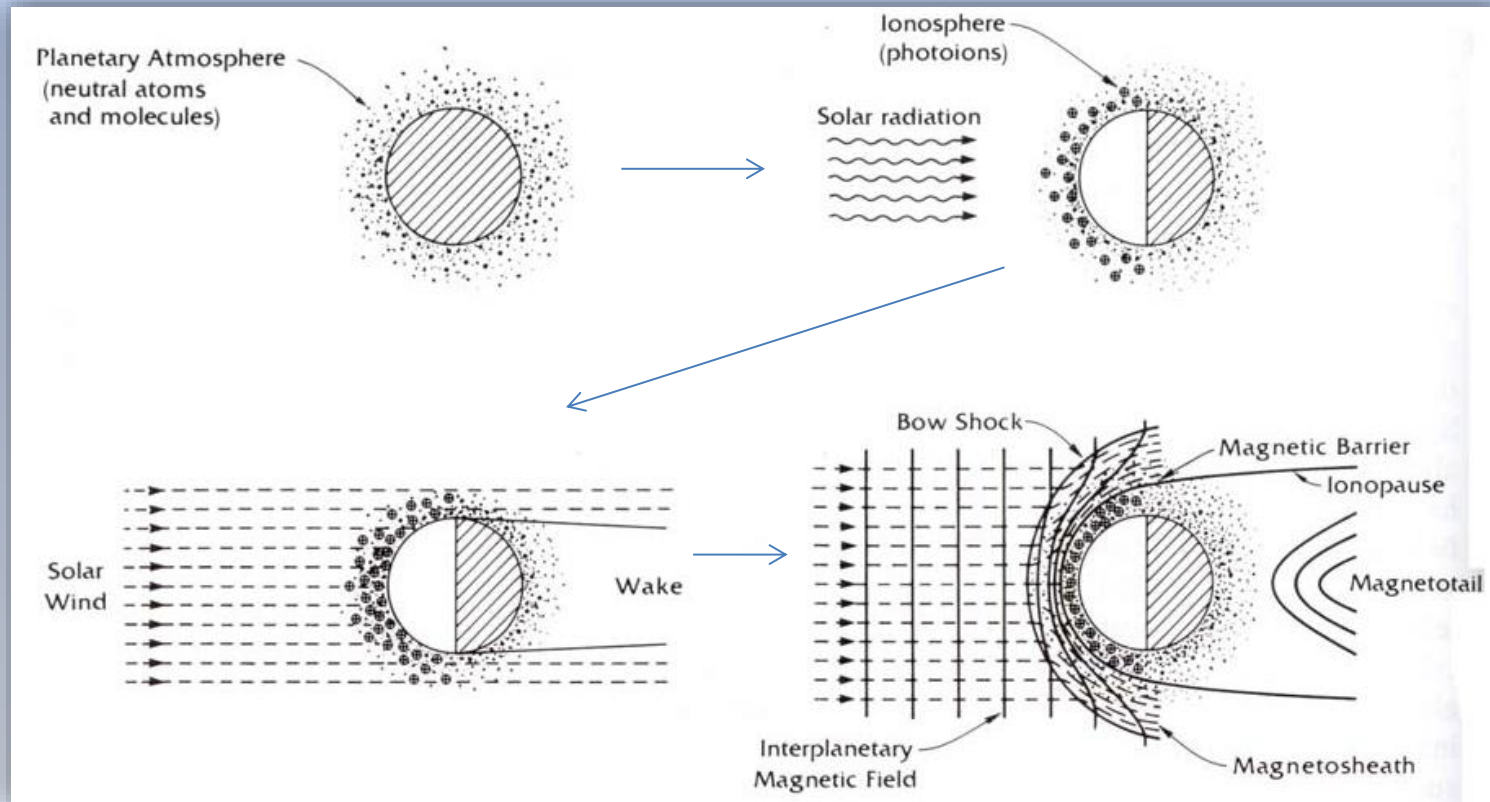
słabe przewodnictwo i brak własnego pola mag., ale obecna atmosfera (jonosfera)

Odziaływanie wiatru słonecznego z jonosferą tworzy magnetosferę indukowaną.

Istnienie jonosfery, obszaru przewodzącego elektrycznie, uniemożliwia polu IMF przenikanie przez obiekt (prądy wzbudzone w jonosferze przez IMF). Linie pola IMF gromadzą się na czole takiej przeszkody, a wiat słoneczny opływa obiekt. Obszar za obiektem wypełnia pole magnetyczne i materia z atmosfery (ogon plazmowy). Granica między wiatrem/IMF a jonosferą to **jonopauza**. Jej położenie określa równowaga ciśnień tych dwu ośrodków.

przykład: Wenus

(www.nasa.gov/press-release/nasa-mission-reveals-speed-of-solar-wind-stripping-martian-atmosphere)



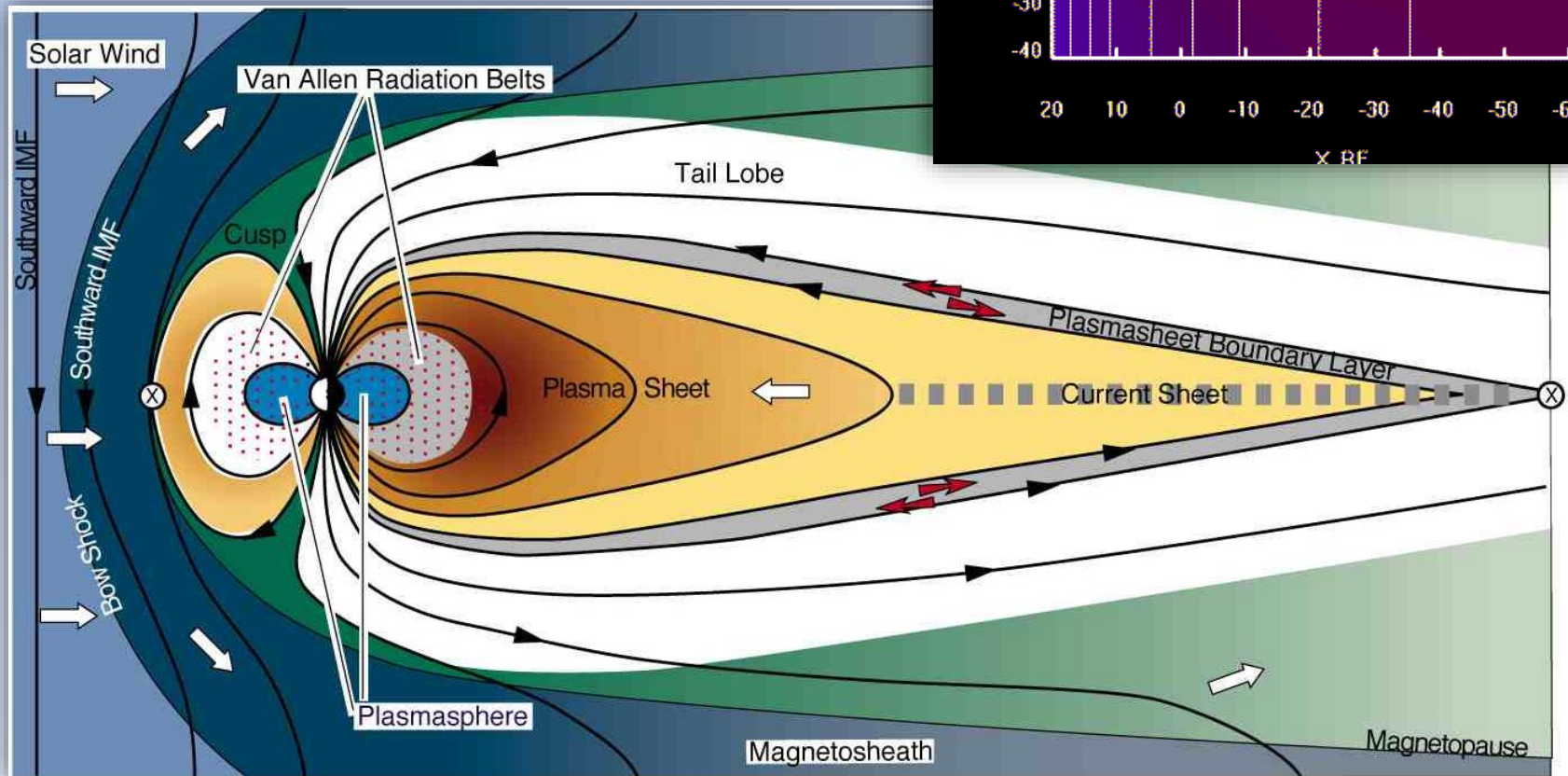
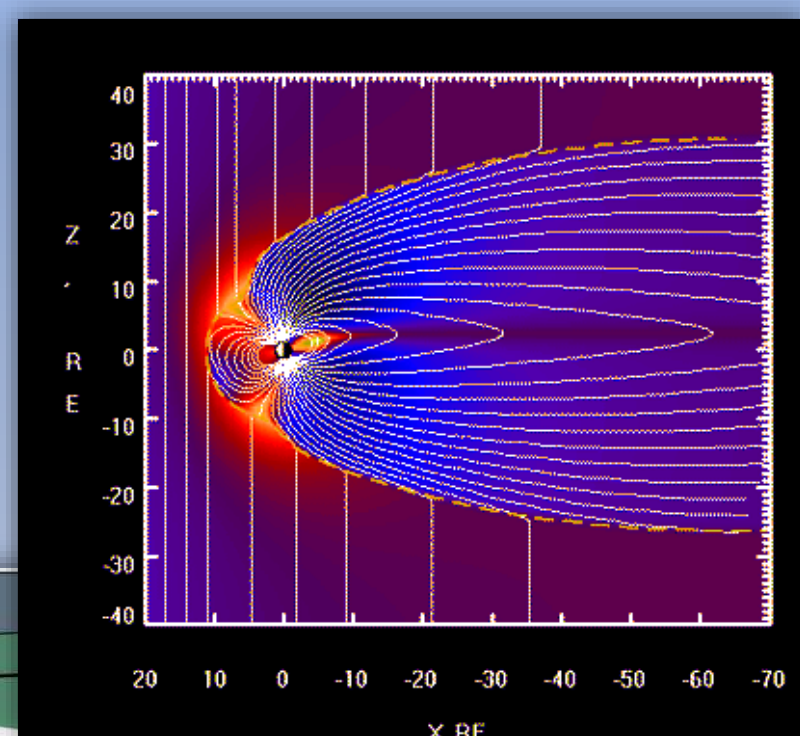
Wyjaśnienie formowania się magnetosfery indukowanej (w 4 krokach)

Magnetosfery

obecne własne pole magnetyczne

Oddziaływanie planetarnego pola magnetycznego (PMF) z wiatrem słonecznym (SW) i polem IMF prowadzi do powstania magnetosfery. Kształt magnetosfery zależy od siły PMF i ciśnienia dynamicznego SW.

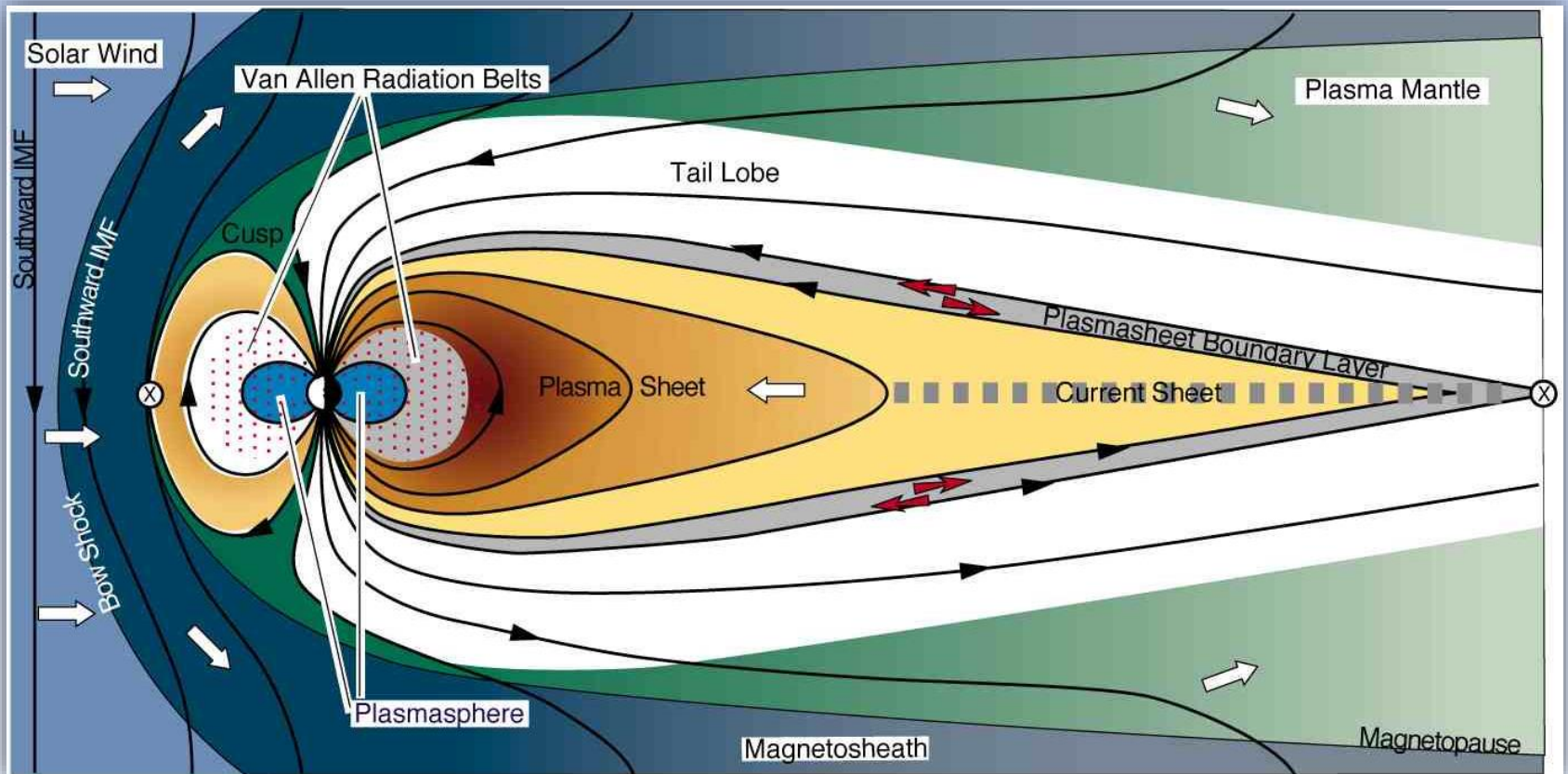
przykład: Ziemia (dalsze szczegóły będą na przykładzie Ziemi)



Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

- **łukowa fala uderzeniowa** (*bow shock*) – przepływ wiatru słonecznego staje się poddźwiękowy (położenie dla Ziemi: 10 – 20 R_z kierunku dosłonecznym).
- **plaszcz magnetyczny** (*magnetosheath*) – obszar turbulentnego, poddźwiękowego przepływu SW

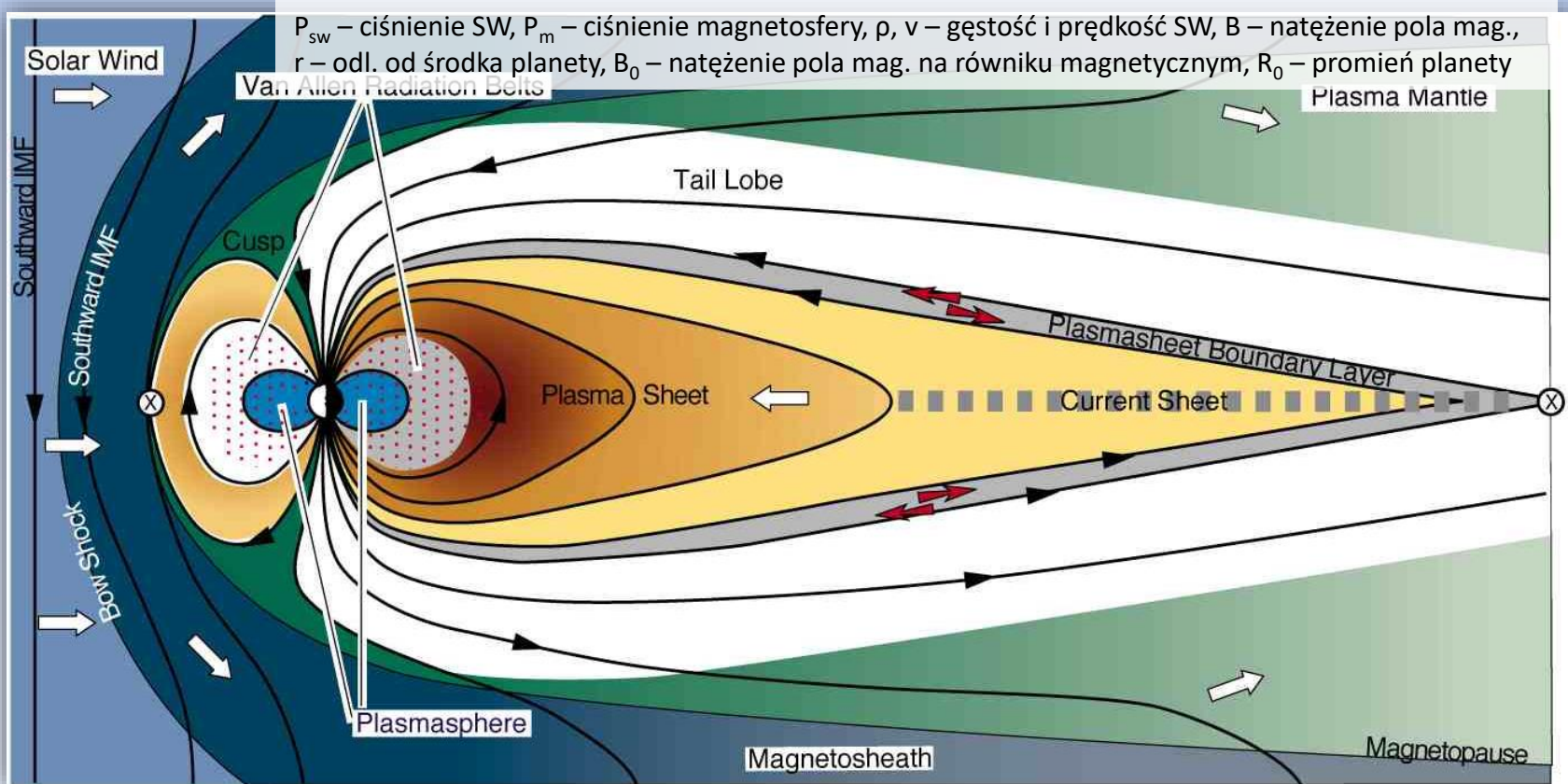


Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

- **magnetopauza** – granica pomiędzy IMF a PMF, jej położenie określa równowaga ciśnień SW i magnetosfery (położenie magnetosfery dla Ziemi: 6 – 15 R_z kierunku dostłonecznym).
Oszacowanie odległości do magnetopauzy w płaszczyźnie równika dipola magnetycznego [CGS]:

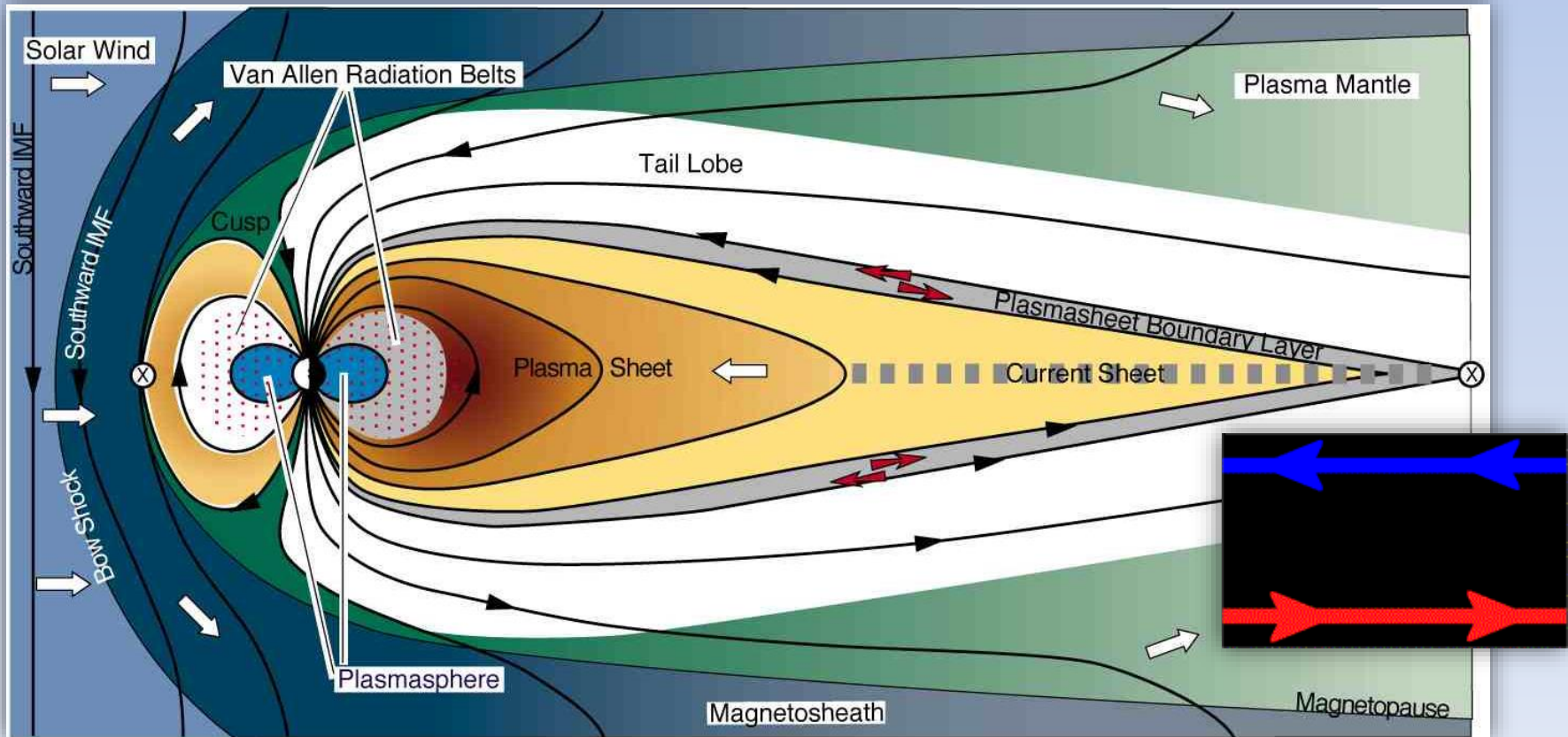
$$P_{sw} = P_m \quad (\rho v^2)_{sw} \approx \left(\frac{B^2(r)}{8\pi} \right)_m \quad B(r) = B_0 \left(\frac{R_0}{r} \right)^3 \quad \rightarrow \quad r \approx \left(\frac{B_0^2}{8\pi \rho v^2} \right)^{1/6} R_0$$



Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

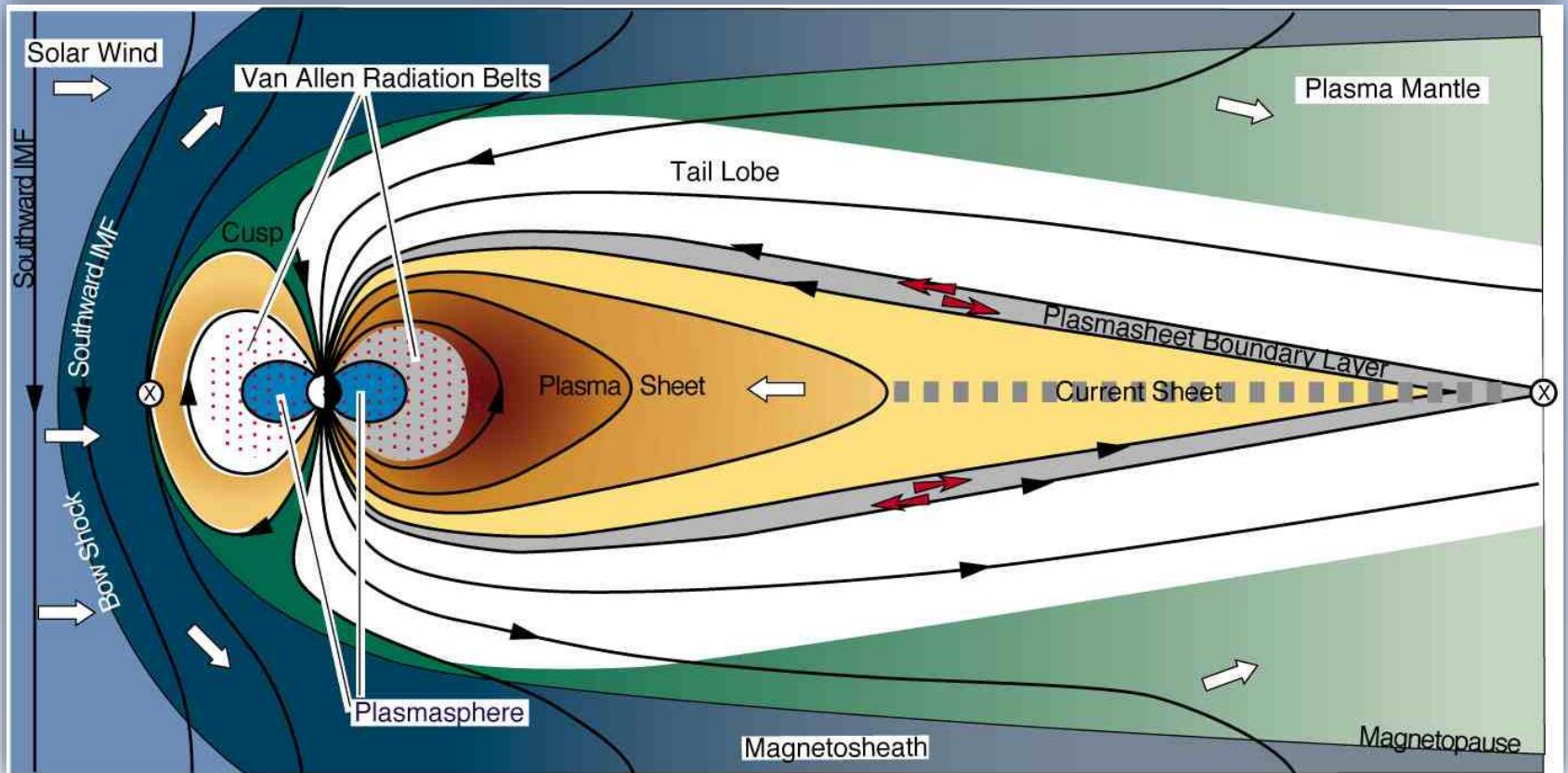
- **ogon magnetyczny** (*magnetotail*) – linie pola PMF wyciągnięte przez wiatr słoneczny w kierunku odslonecznym; w płaszczyźnie równika magnetycznego następuje zmiana kierunku linii pola PMF – **warstwa prądowa**; w warstwie tej dochodzi do przełączania linii magnetycznych (przyspieszanie cząstek)
- **płaszcz plazmowy** (*plasma mantle*) – obszar ogona, w którym występuje mieszanina plazmy z płaszcza magnetycznego i magnetosfery (jonosfery)



Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

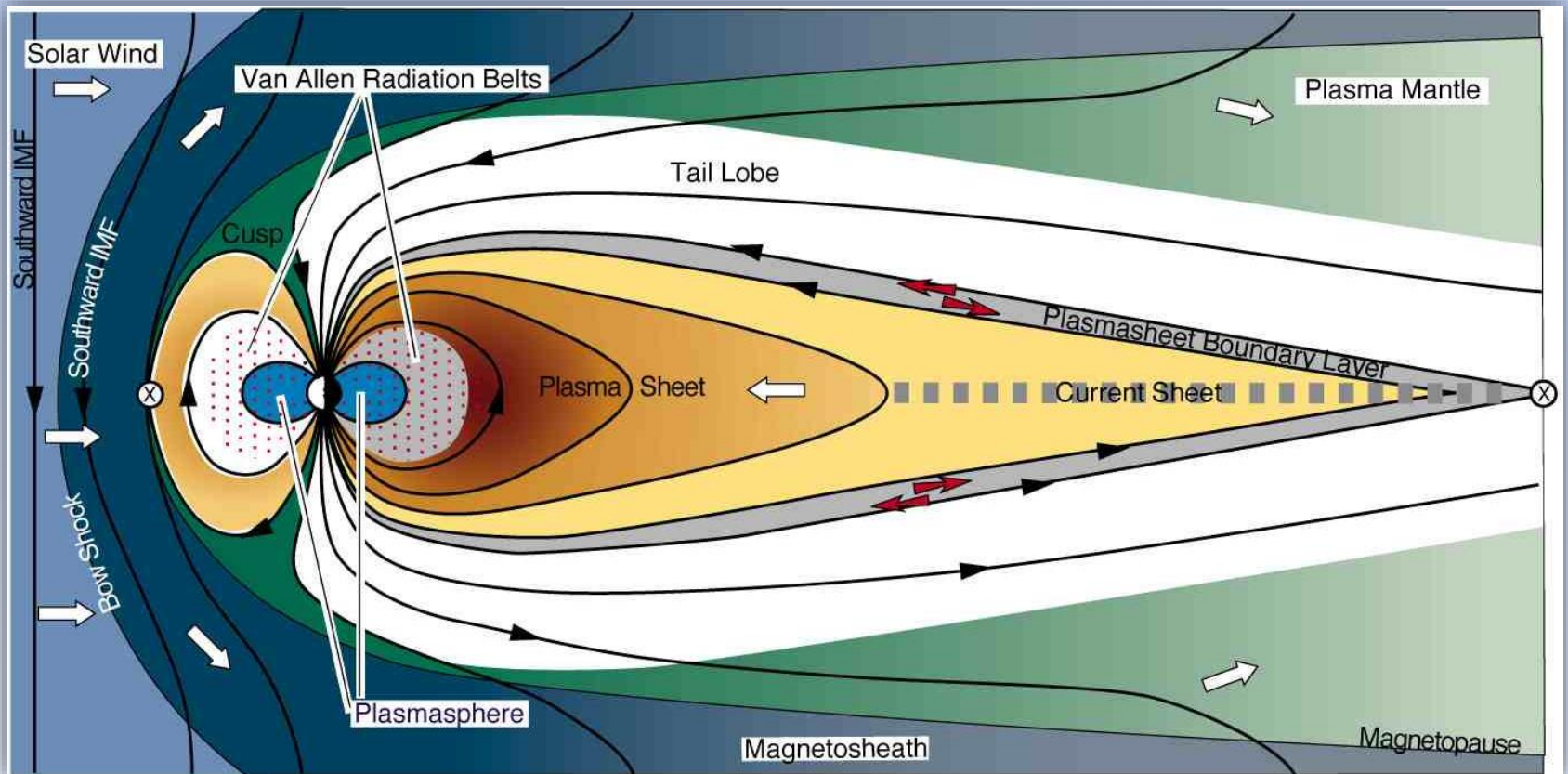
- **lej polarny** (*polar cusp*) – przybiegunowe okna w magnetosferze umożliwiające plazmie wiatru słonecznego dotarcie nawet do jonosfery
- **warstwa plazmowa** (*plasma sheet*) – środkowa część ogona magnetycznego około warstwy prądowej; osłabione ciśnienie magnetyczne równoważone jest zwiększonym ciśnieniem gazowym (plazmy); obszar wypełnia głównie plazma z wiatru słonecznego (+ materia jonosferyczna); linie pola PMF zamknięte



Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

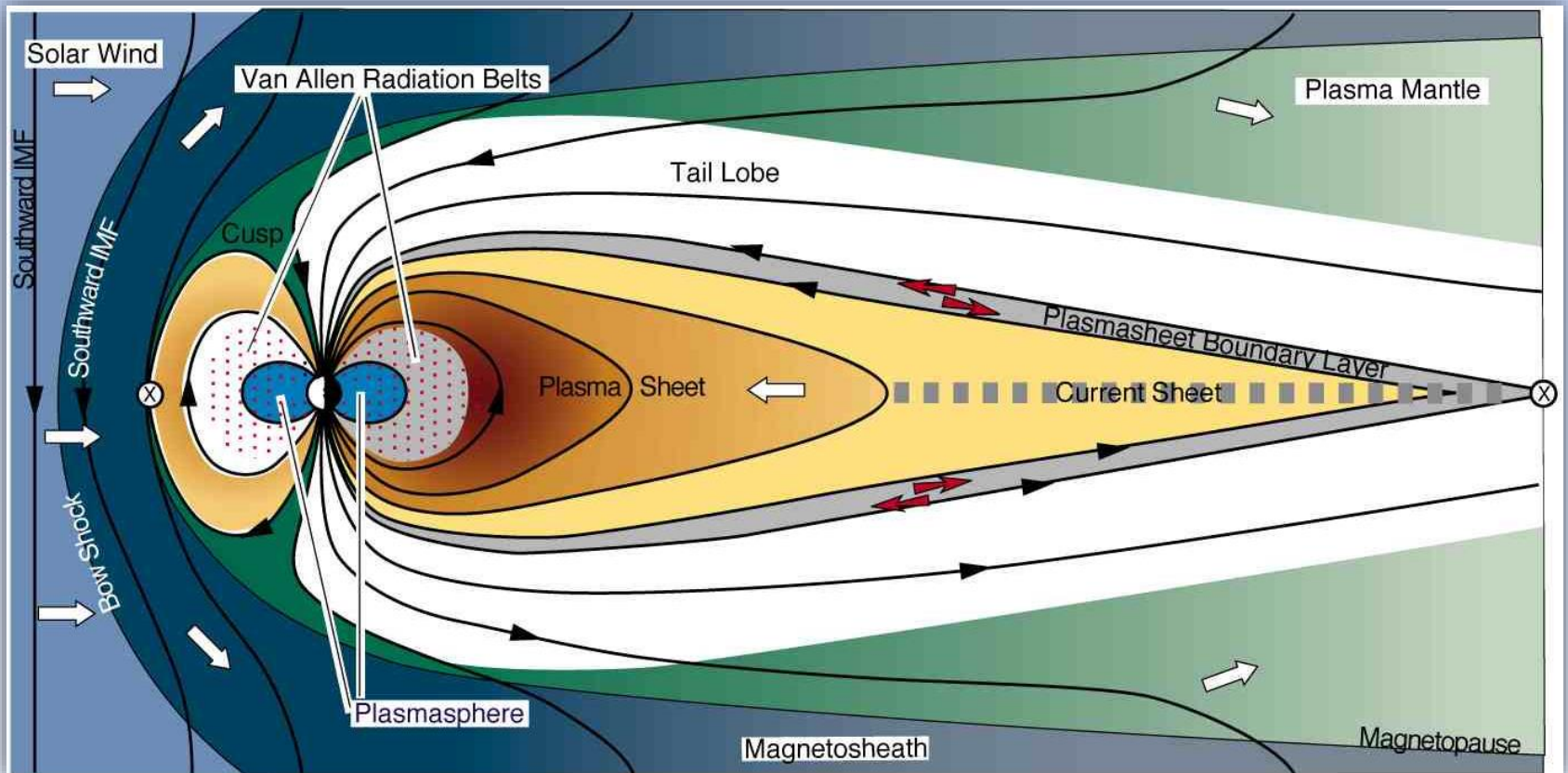
- **plaszczyna graniczna warstwy plazmowej** (*plasmashet boundary layer*) – zewnętrzna część warstwy plazmowej zawierająca cząstki przyspieszone przez rekonekcję pola magnetycznego w ogonie magnetycznym; magnetycznie związana z obszarem zorzowym
- **płat ogona** (*tail lobe*) – słabo wyróżniony obszar pomiędzy warstwą plazmową a płaszczem plazmowym; linie pola PMF otwarte, mała gęstość plazmy; obecność wiatru polarnego



Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

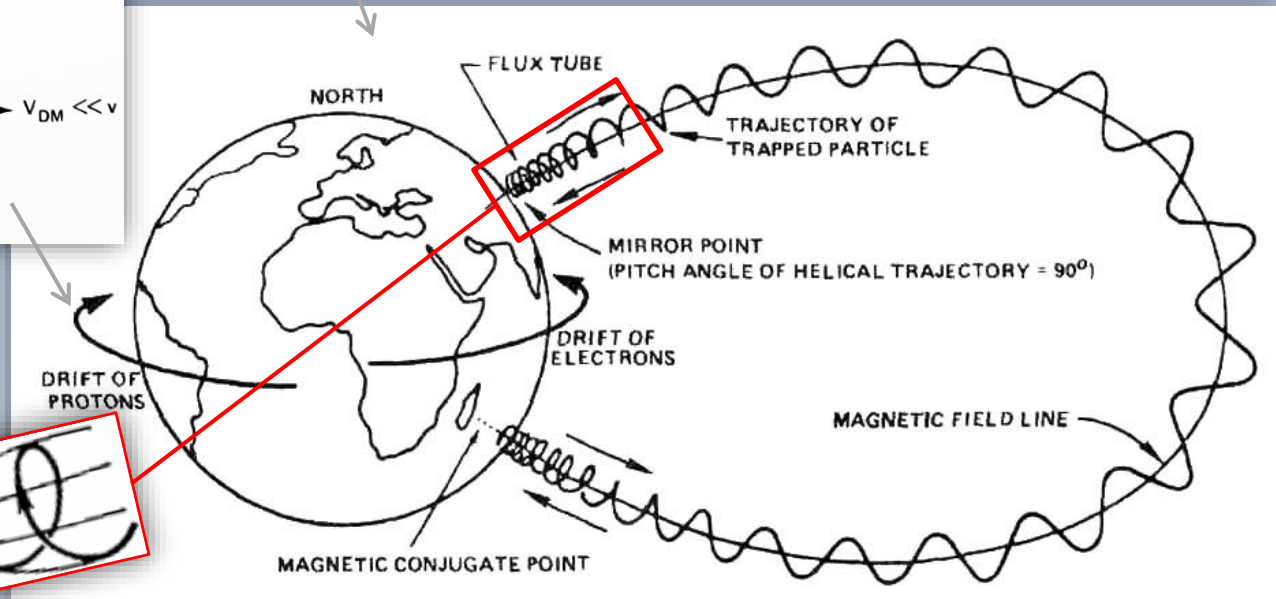
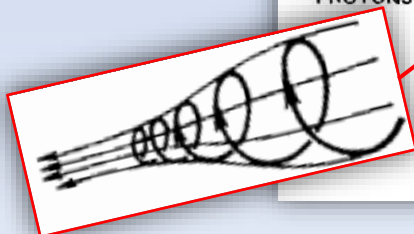
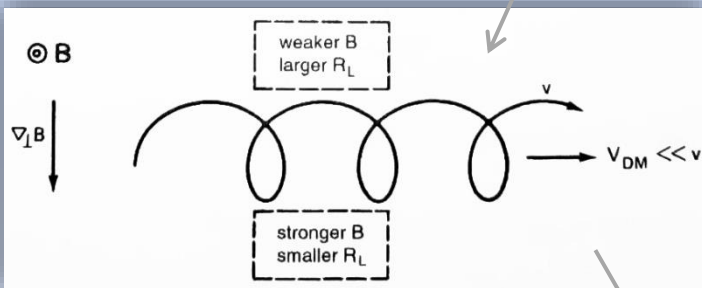
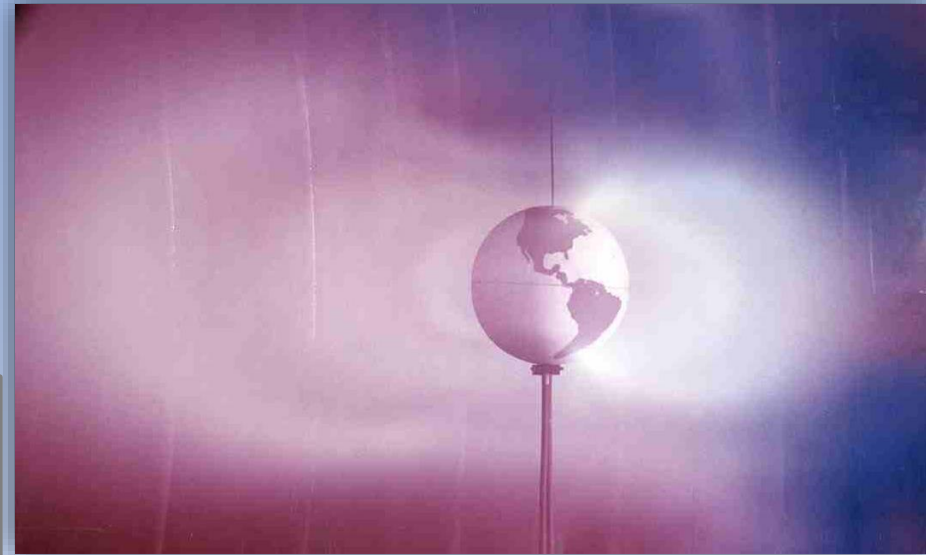
- **pasy radiacyjne Van Allena** (*Van Allen radiation belts*) – obszar wysokoenergetycznych cząstek uwięzionych w polu PMF; cząstki pochodzą z wiatru słonecznego, jonosfery i z oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą (protony)
- **plazmosfera** – obszar stanowiący przedłużenie jonosfery występujący nad niskimi i średnimi szerokościami; zawiera stosunkowo gęstą, ale niskoenergetyczną plazmę



Magnetosfery

Ruch cząstek w pasach radiacyjnych ma 3 składowe:

- cyklotronowy ruch wokół linii pola mag. wynikający z siły Lorentza
- ruch postępowy pomiędzy lustrami magnetycznymi
- dryf zachodni protonów/jonów+ i wschodni elektronów; dryf ten jest równoważny z przepływem prądu zwanego prądem pierścieniowym

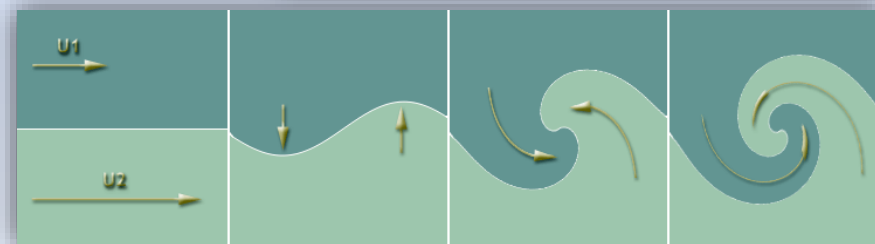
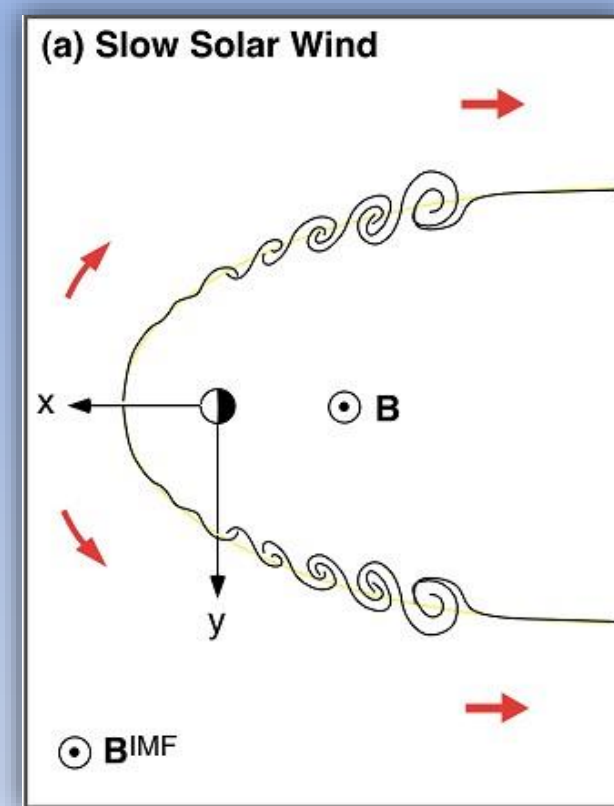


Magnetosfery

źródła i utrata cząstek magnetosferycznych

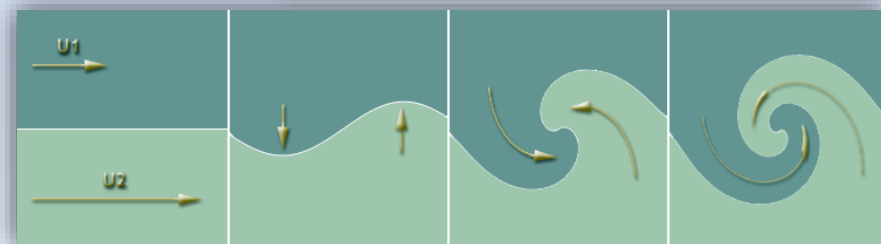
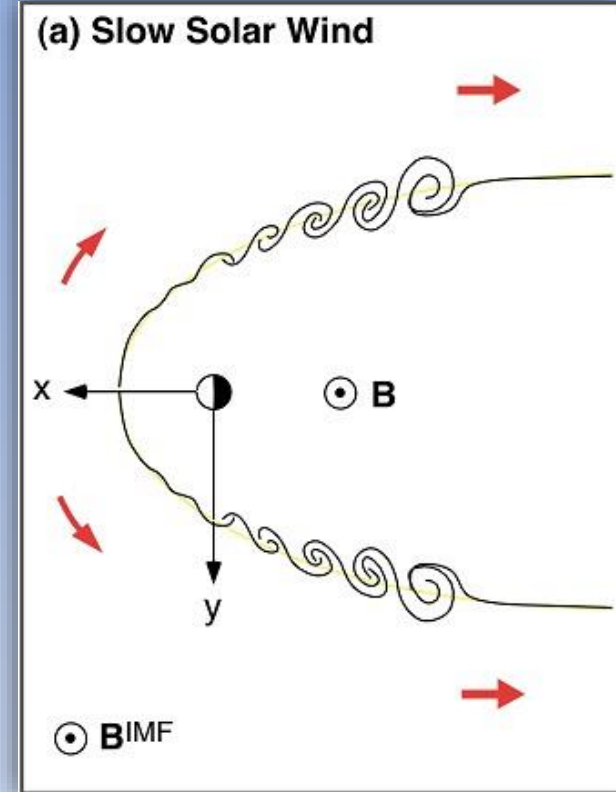
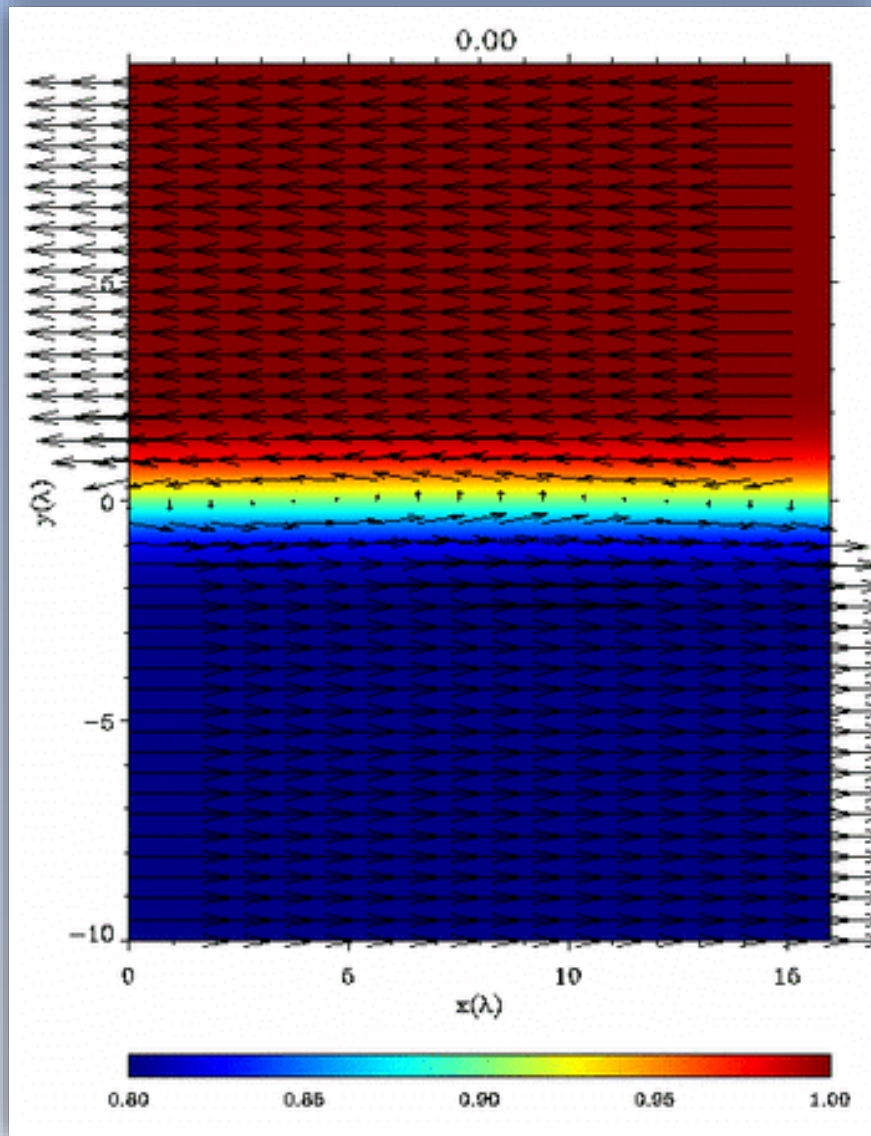
Cząstki magnetosferyczne mogą pochodzić z następujących źródeł (różnice między planetami):

- *promieniowanie kosmiczne i wiatr słoneczny* – wychwyt cząstek możliwy jest na 2 sposoby:
 - przenikanie do magnetosfery dzięki niestabilności Kelvina-Helmholtza pojawiającej się na granicy magnetosfery
 - wnikanie do magnetosfery w miejscach występowania przełączania linii pola PMF i IMF (czoło magnetosfery) i linii pola PMF w ogonie magnetycznym
- *jonosfera* – niektóre cząstki jonosfery mogą z niej uciec do magnetosfery pomimo związania grawitacyjnego z planetą dzięki procesom utraty atmosfery (np. wiatr polarny)
- *księżyce/pierścienie położone (częściowo) wewnątrz magnetosfery* – zasilanie odbywa się przez wyrzucanie materii z księżycy/bryły pierścienia dzięki meteorytom, wysokoenergetycznym cząstkom i fotonom, aktywności wulkanicznej/gejzerom



Magnetosfery

niestabilność Kelvina-Helmholtza – symulacja numeryczna



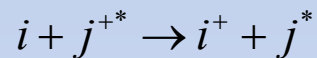
zobacz: <https://youtu.be/oal5N9yvDKo>

Magnetosfery

źródła i utrata cząstek magnetosferycznych

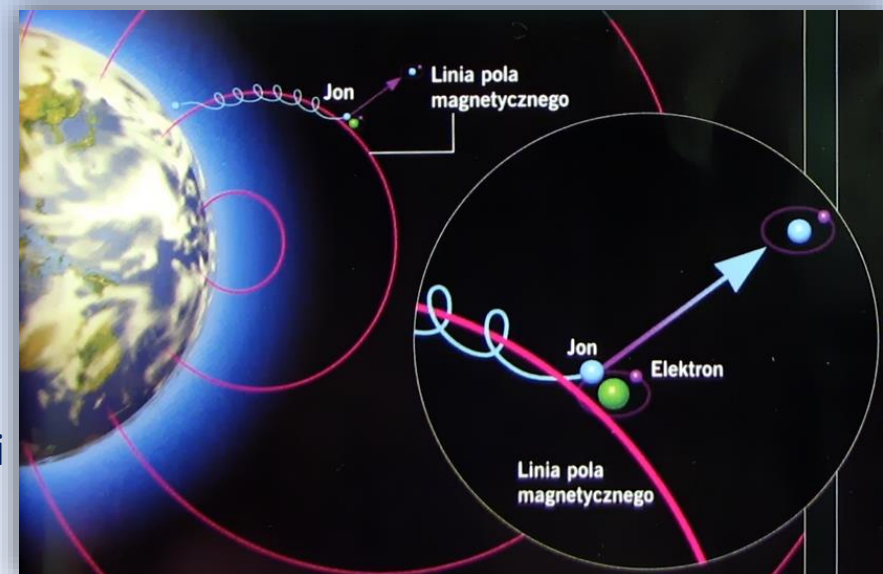
Utrata cząstki magnetosferycznych może zachodzić następująco:

- *zderzenia z księżycami/pierścieniami* – przy zderzeniu cząstka jest absorbowana przez powierzchnię ciała
- *wejście w atmosferę* – jeśli lustro magnetyczne cząstki znajdzie się głębiej w atmosferze to cząstka ta traci energię przy zderzeniach z atomami/molekułami atmosfery i tam pozostaje
- *wymiana ładunku* – jon magnetosferyczny przejmuje ładunek od atomu neutralnego (bez wymiany energii kinetycznej), staje się neutralny i ucieka z magnetosfery (jeśli przekracza prędkość ucieczki)



„Orbity” cząstek magnetosferycznych nie są stabilne, cząstki podlegają procesom rozpraszania (zmiany toru ruchu), co w końcu doprowadza do ich ucieczki z magnetosfery jednym z powyższych mechanizmów.

Plazma magnetosferyczna może stanowić dużą przeszkodę w badaniach in-situ obiektów z silnymi magnetosferami i być istotnym czynnikiem astrobiologicznym.



Magnetosfery

magnetosfery w Układzie Słonecznym

planety z własnym pole magnetycznym – cechy PMF

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Magnetic moment ($\mathcal{M}_{\oplus}$)	4×10^{-4}	1 ^a	20 000	600	50	25
Surface B at dipole equator (gauss)	0.0033	0.31	4.28	0.22	0.23	0.14
Maximum/minimum ^b	2	2.8	4.5	4.6	12	9
Dipole tilt and sense ^c	+14°	+10.8°	−9.6°	0.0°	−59°	−47°
Dipole offset (R_p)		0.08	0.12	~0.04	0.3	0.55
Obliquity	0°	23.5°	3.1°	26.7°	97.9°	29.6°
Solar wind angle ^d	90°	67–114°	87–93°	64–117°	8–172°	60–120°
Magnetopause distance ^e (R_p)	1.5	10	42	19	25	24
Observed size of magnetosphere (R_p)	1.4	8–12	50–100	16–22	18	23–26

After Kivelson and Bagenal (2007).

^a $\mathcal{M}_{\oplus} = 7.906 \times 10^{25} \text{ G cm}^3$.

^b Ratio of maximum to minimum surface magnetic field strength (equal to 2 for a centered dipole field).

^c Angle between the magnetic and rotation axis.

^d Range of angles between the radial direction from the Sun and the planet's rotation axis over an orbital period.

^e Typical standoff distance of the magnetopause at the nose of the magnetosphere, in planetary radii.

Model dynama – generacja PMF wymaga przewodzącego prąd ośrodka wewnątrz planety podlegającego konwekcji (wewnętrzne źródło ciepła) i rotacji planety. PMF jest zmienne w czasie (fluktuacje, przebiegunowania). zobacz: „Pole magnetyczne Ziemi”, M. Lewandowski, Urania 2/2021

Magnetosfery

magnetosfery w Układzie Słonecznym

planety z własnym pole magnetycznym – cechy plazmy magnetosferycznej

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Maximum density (cm^{-3})	1	1000–4000	>3000	~100	3	2
Composition	H^+	O^+ , H^+ , N^+ , He^+ , He^{++}	O^{n+} , S^{n+} , SO_2^+ , Cl^+	O^+ , H_2O^+ , H^+	H^+	N^+ , H^+
Dominant source	solar wind	ionosphere solar wind	Io	rings, Enceladus, Tethys, Dione	atmosphere	Triton
Production rate (ions s^{-1})	?	2×10^{26}	$>10^{28}$	10^{26}	10^{25}	10^{25}
Ion lifetime	minutes	days, ^a hours ^b	10–100 days	1 month–years	1–30 days	1 day
Plasma motion controlled by:	solar wind	rotation ^a solar wind ^b	rotation	rotation	solar wind + rotation	rotation (+ solar wind?)

After Kivelson and Bagenal (2007).

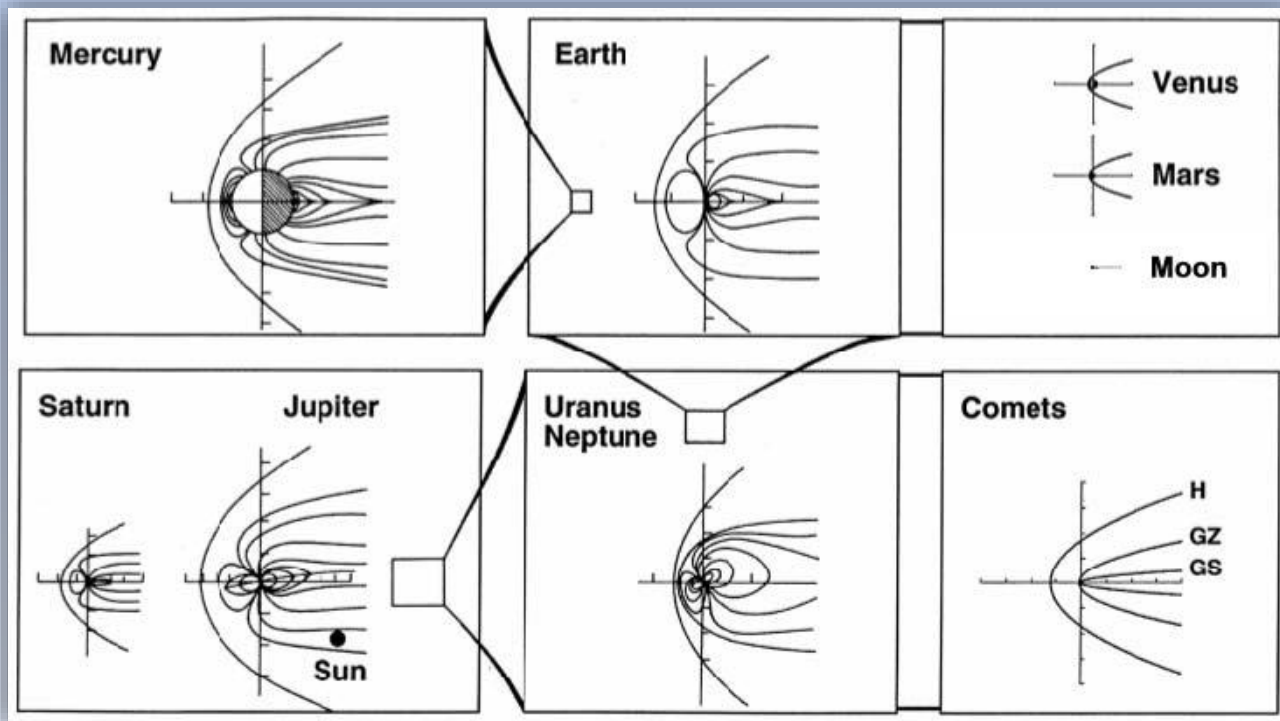
^a Inside plasmasphere.

^b Outside plasmasphere.

Magnetosfery

Pozostałe planety i inne obiekty bez własnego pola mag.:

- ***Venus***: brak własnego pola magnetycznego, interakcja SW i jonosfery (magnetosfera indukowana)
- ***Mars***: podobnie jak Venus + lokalne obszary namagnesowania szczątkowego skorupy
- ***komety***: w fazie aktywnej (obecna koma) – podobnie jak Venus
- ***Księżyc i inne obiekty bez atmosfer***: bezpośredni kontakt SW z powierzchnią
- ***Ganimedes***: własne pole magnetyczne zanurzone w magnetosferę Jowisza



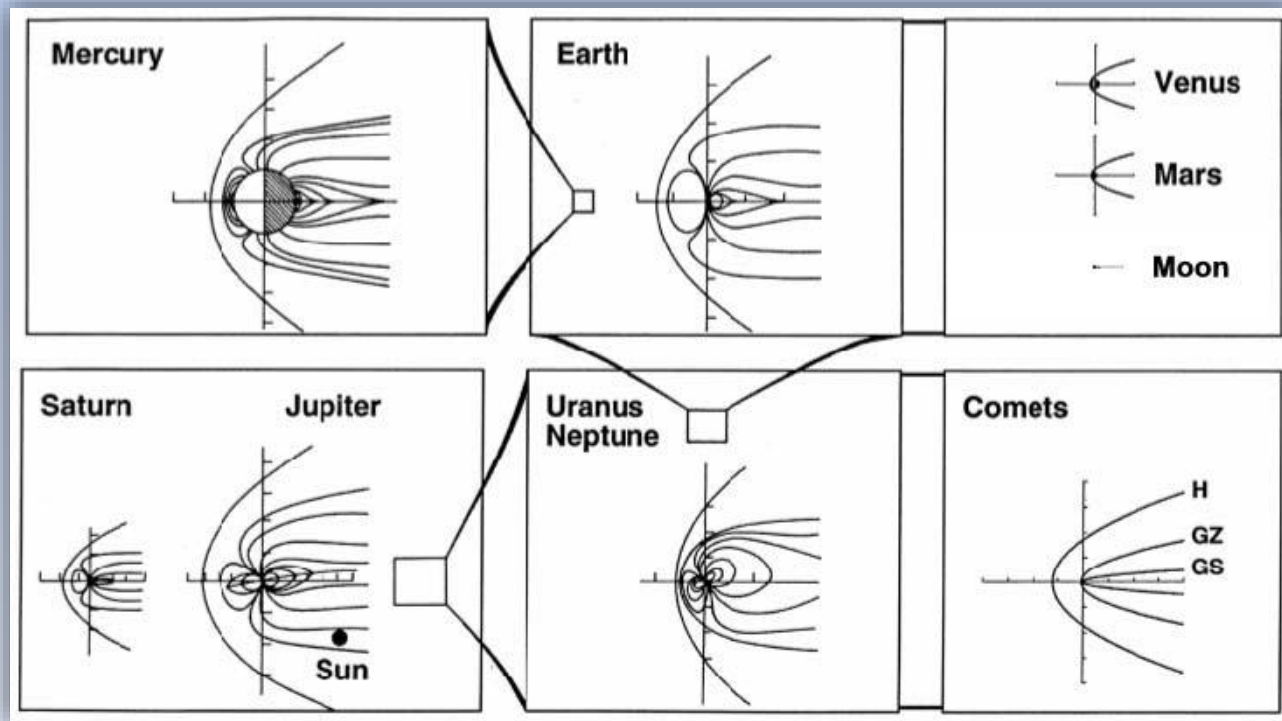
porównanie rozmiarów magnetosfer własnych i indukowanych

Magnetosfery

magnetosfery w Układzie Słonecznym

pozostałe planety i inne obiekty:

- *Wenus*: brak własnego pola magnetycznego, interakcja SW i jonosfery
- *Mars*: podobnie jak Wenus + lokalne obszary namagnesowania szczątkowego skorupy
- *Księżyc*: opływanie ciała bez atmosfery i pola magnetycznego, bezpośredni kontakt SW z powierzchnią
- *Ganimedes*: własne pole magnetyczne zanurzone w magnetosferę Jowisza



porównanie rozmiarów magnetosfer