

# Astrofizyka Układów Planetarnych

7

MAGNETOSFERY

The background of the slide is black, featuring a complex pattern of glowing, multi-colored lines. These lines, in shades of orange, red, and white, radiate from various points, creating a sense of dynamic energy and depth. The lines vary in thickness and brightness, with some appearing as sharp, thin streaks and others as thicker, more diffuse bands. The overall effect is reminiscent of a starburst or a network of light trails.

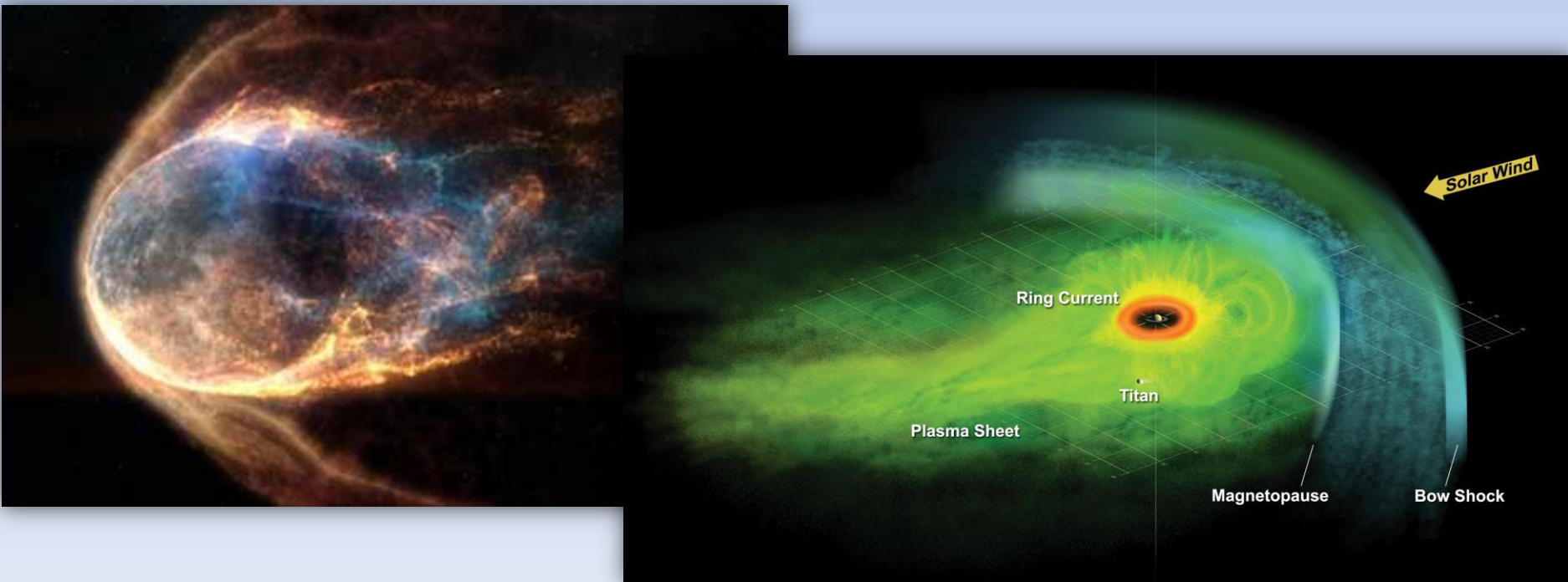
# Magnetosfery

## 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.

Magnetosfery można badać „na miejscu” (orbitery, sondy) lub na odległość (fale radiowe)



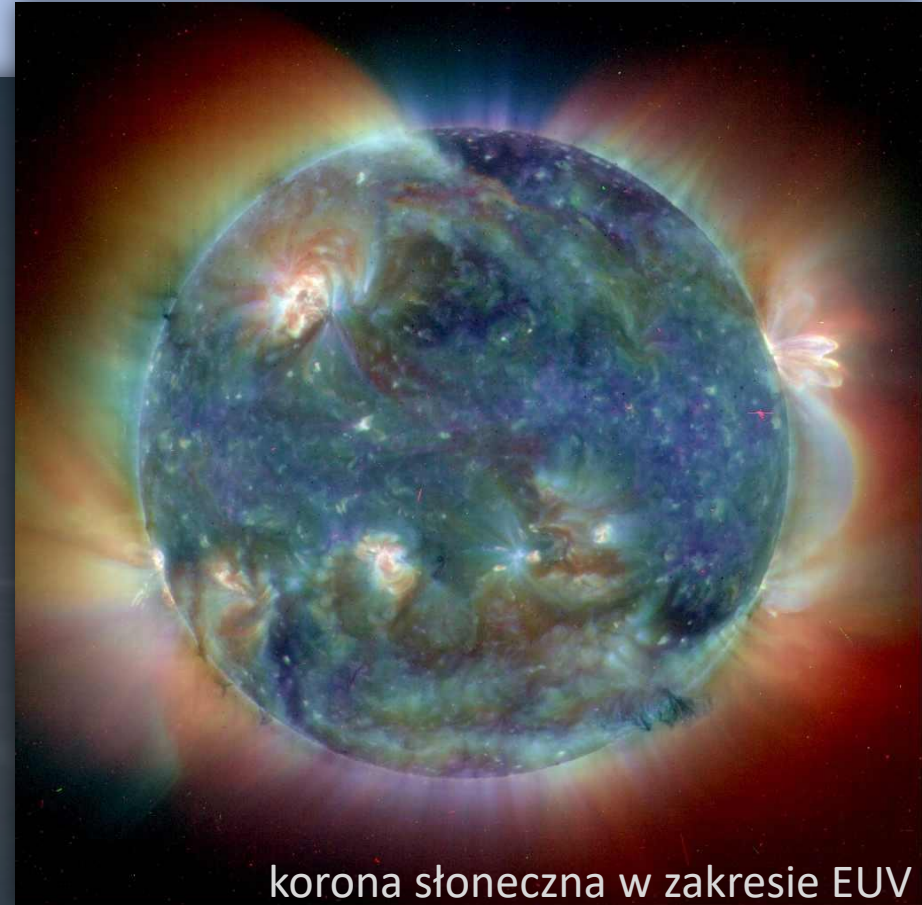
# Magnetosfery

## 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



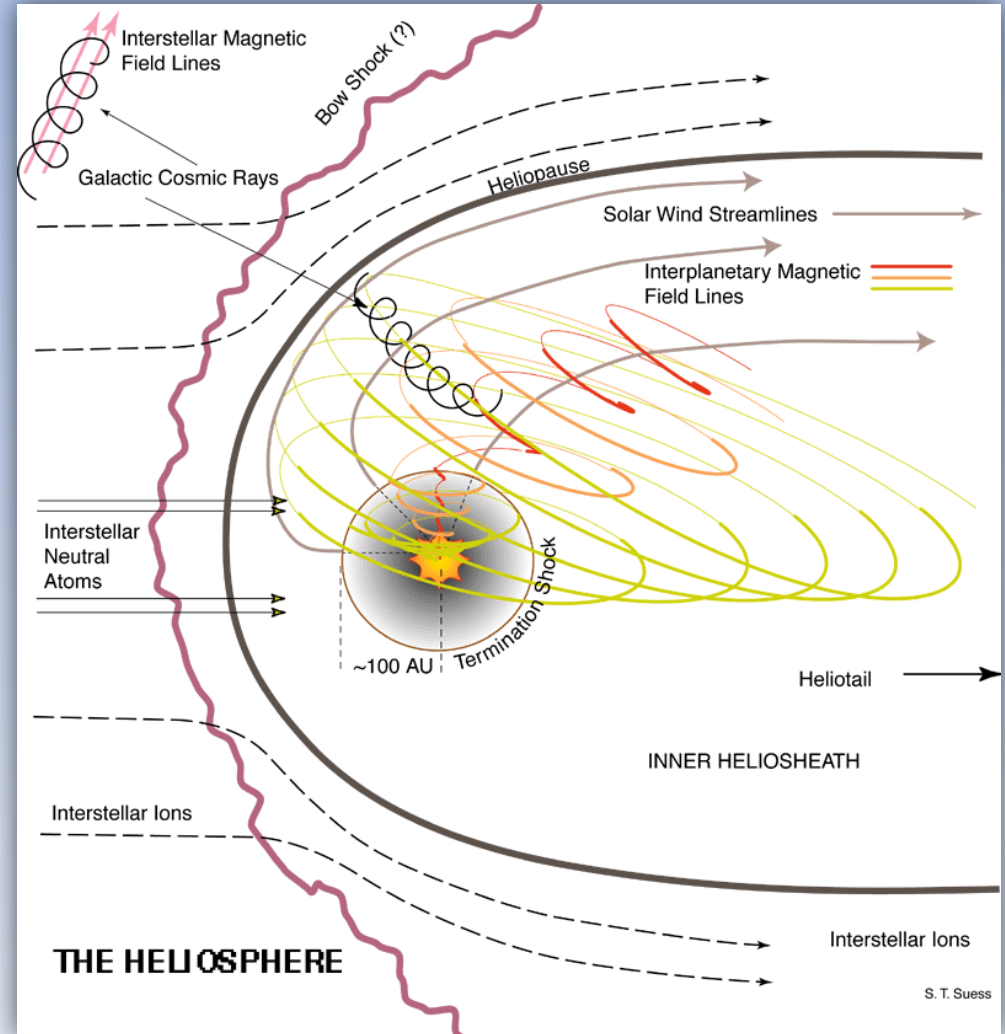
korona słoneczna w zakresie EUV



# Magnetosfery

## Wiatr słoneczny

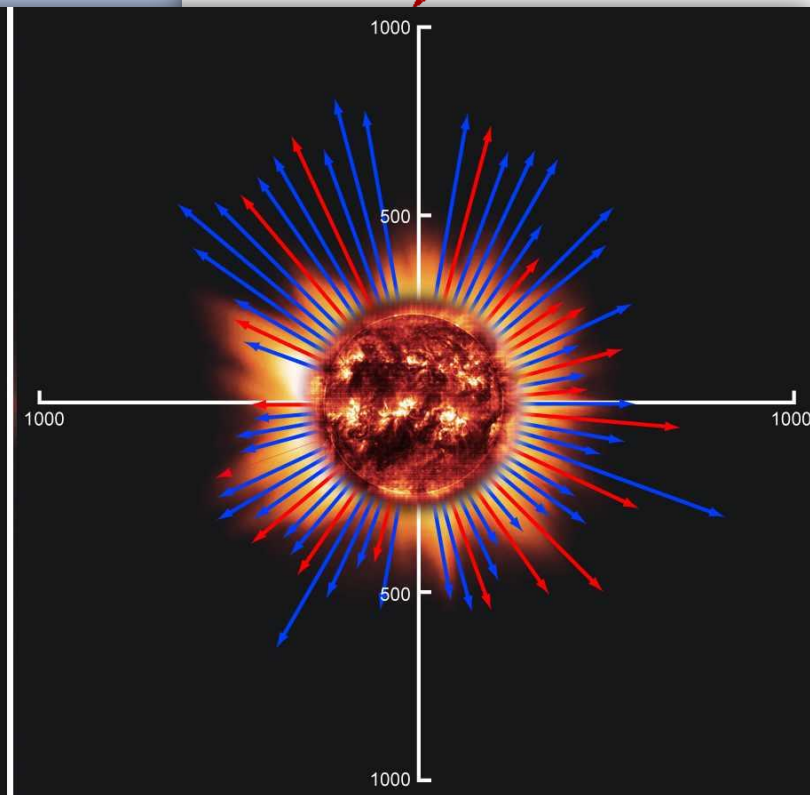
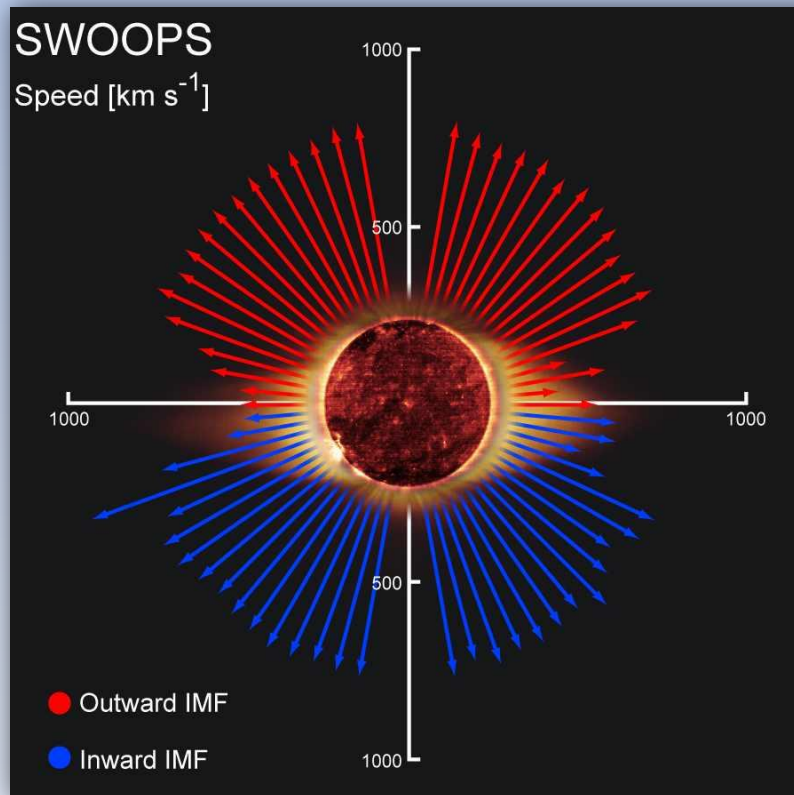
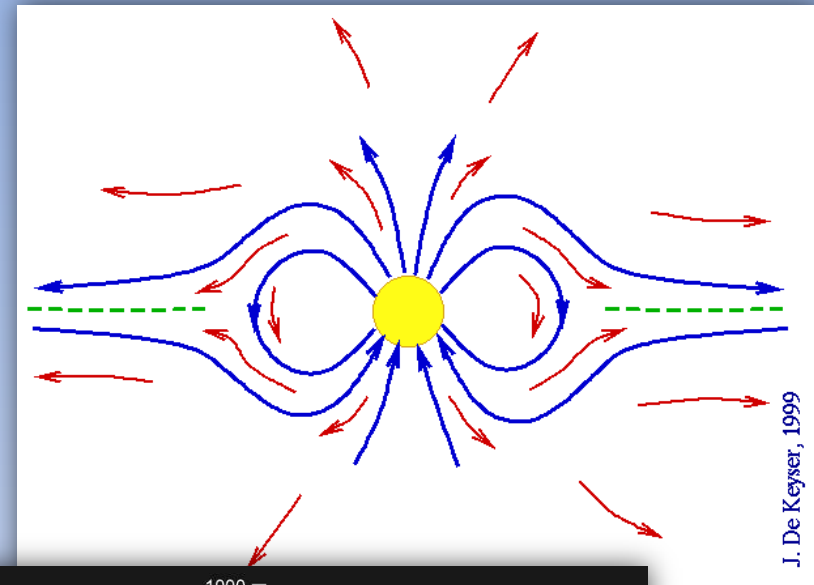
Z korony słonecznej w sposób ciągły wypływa strumień naładowanych cząstek ( $H^+$ ,  $e^-$ ) unoszący słoneczne pole magnetyczne zwany wiatrem słonecznym. Wiatr ten wypełnia przestrzeń Układu Słonecznego tworząc heliosferę.



# Magnetosfery

## Wiatr słoneczny

Na odległości Ziemi wiatr słoneczny ma średnio prędkość około 400 km/s (przepływ naddźwiękowy) i gęstość  $\sim 5$  protonów / $\text{cm}^3$ . 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.

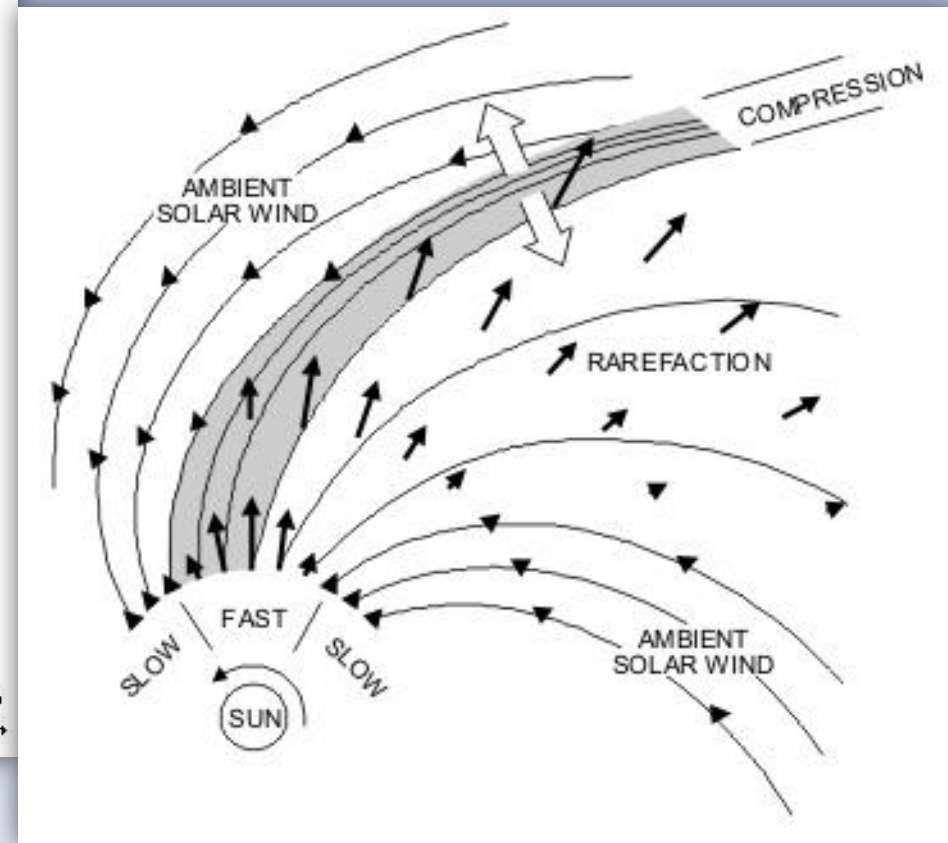
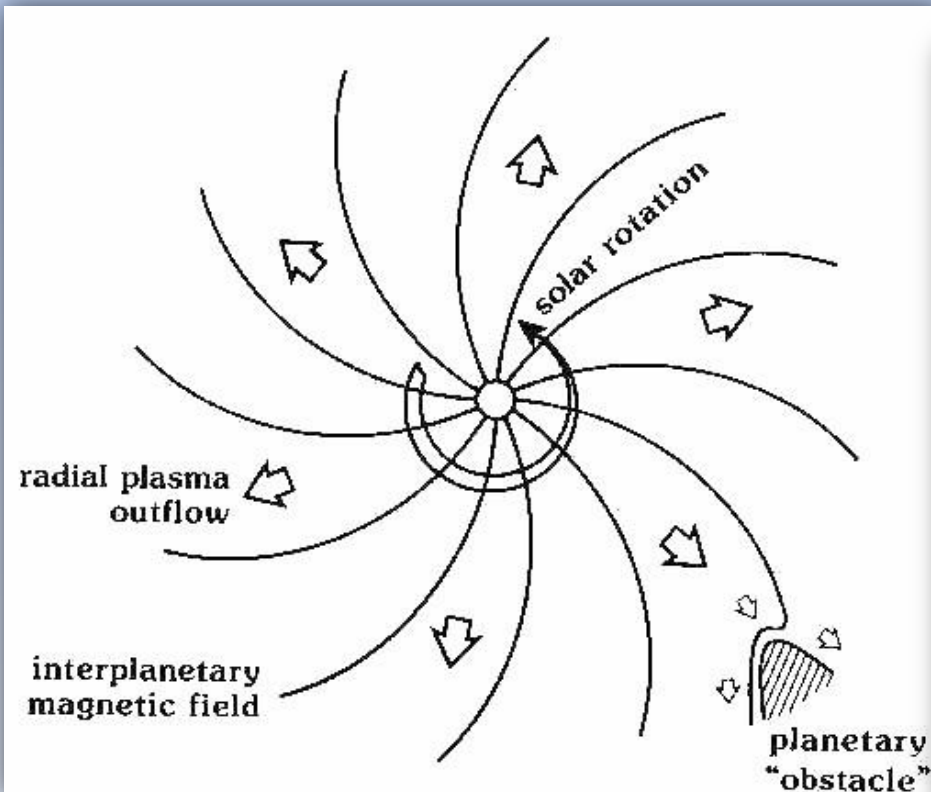


Prędkość wiatru słonecznego zmierzona przez sondę Ulysses dla minimum (lewy) i maksimum (prawy) aktywności.

# 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 zaburzą ten obraz (zagęszczenia, fale uderzeniowe).



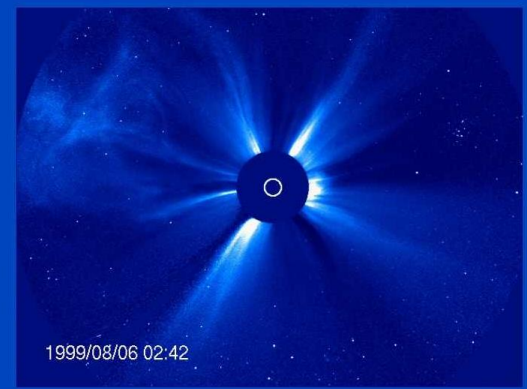
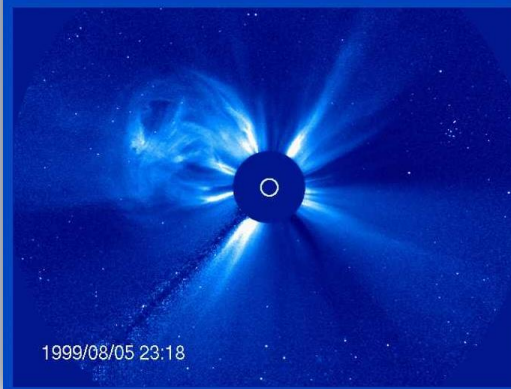
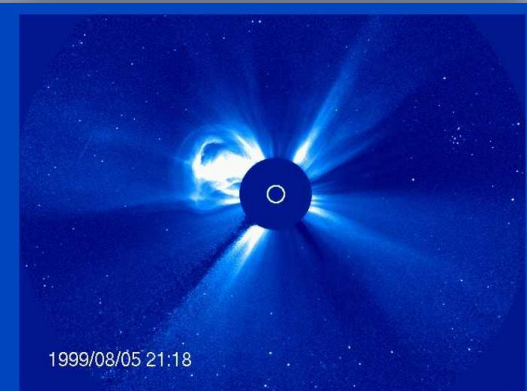
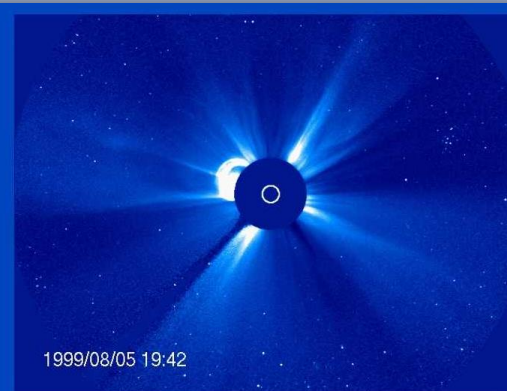
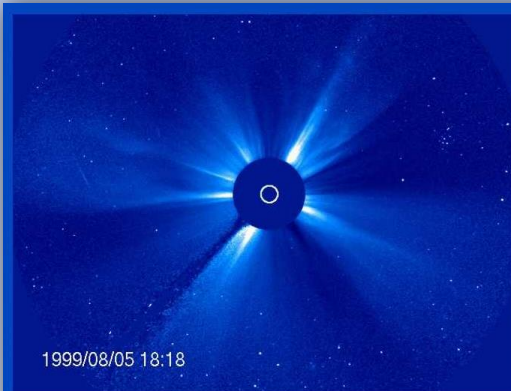
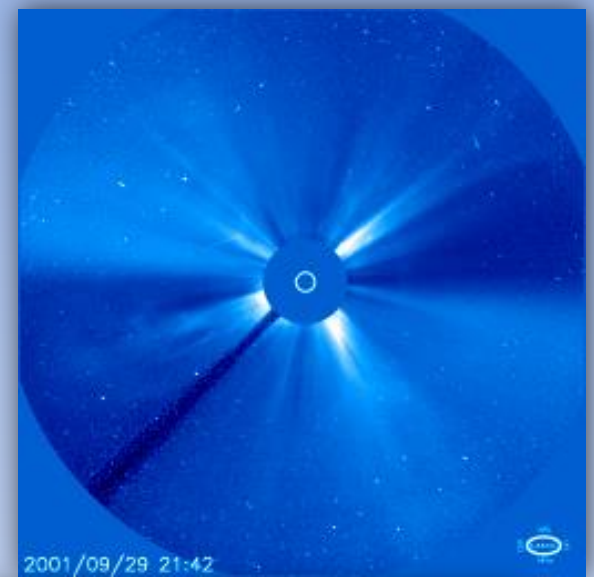


# Magnetosfery

## 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

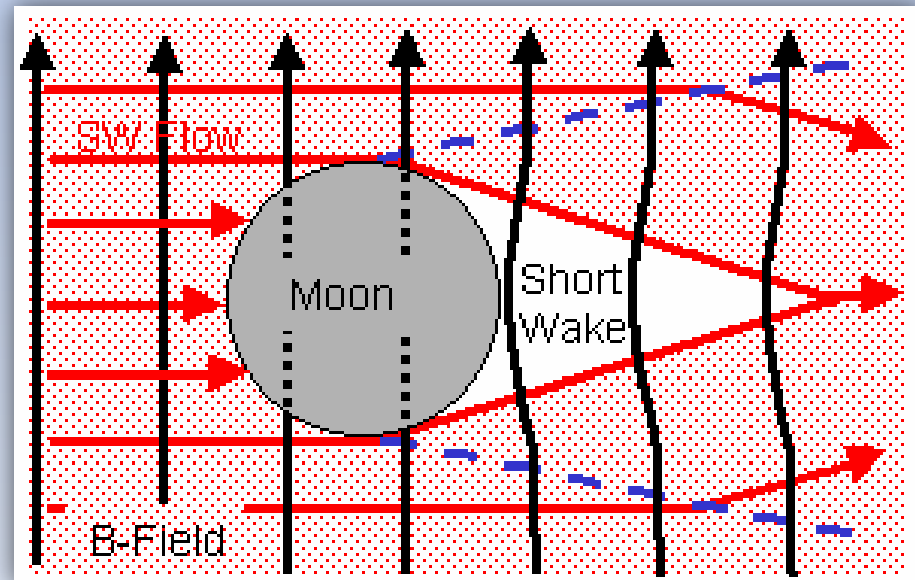
## Oddziaływanie wiatru słonecznego z ciałami Układu Słonecznego

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

### słabe przewodnictwo, brak atmosfery i własnego pola

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

przykład: Księżyc





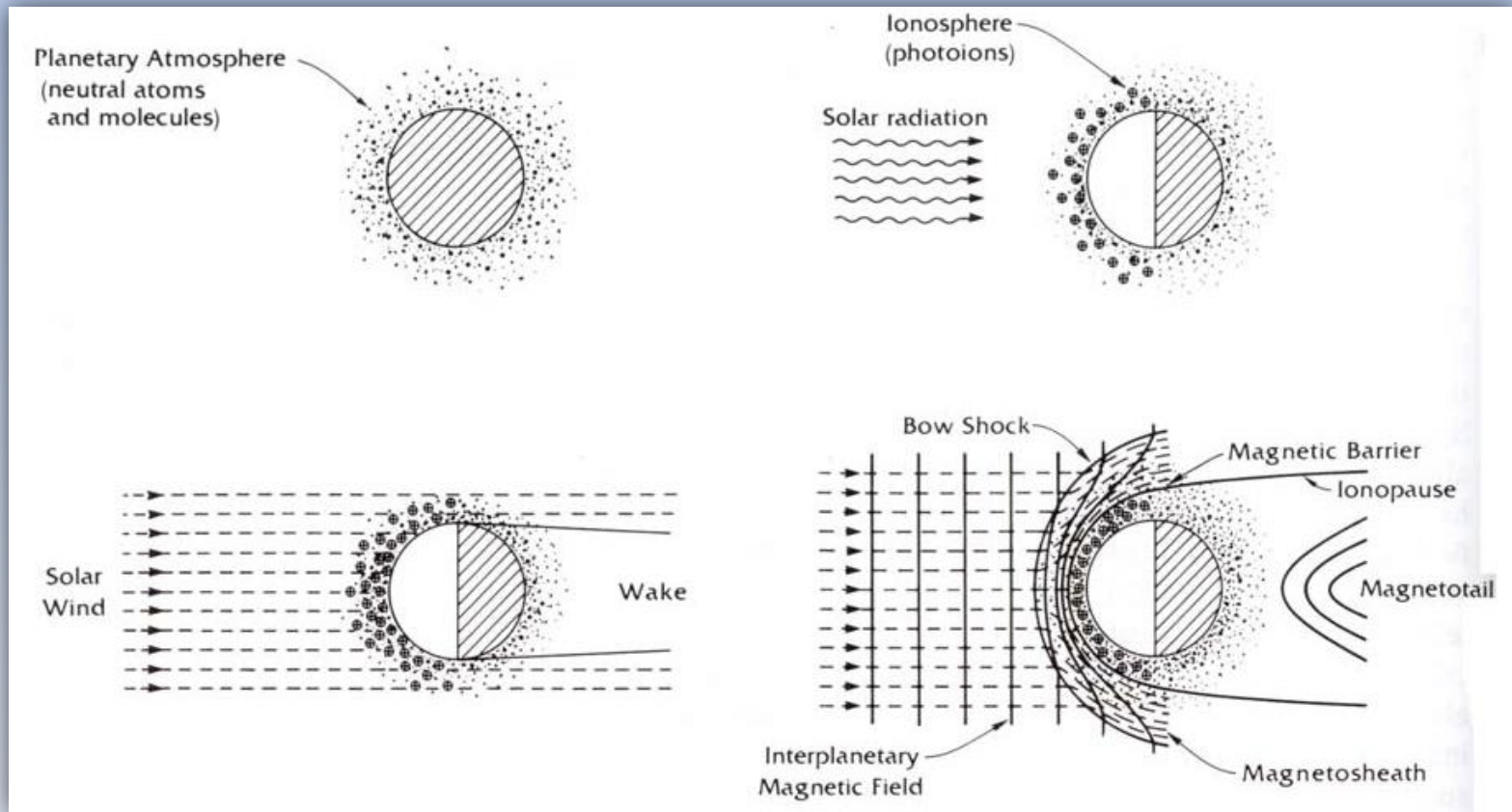
# Magnetosfery

obecna atmosfera, ale słabe przewodnictwo i brak własnego pola

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

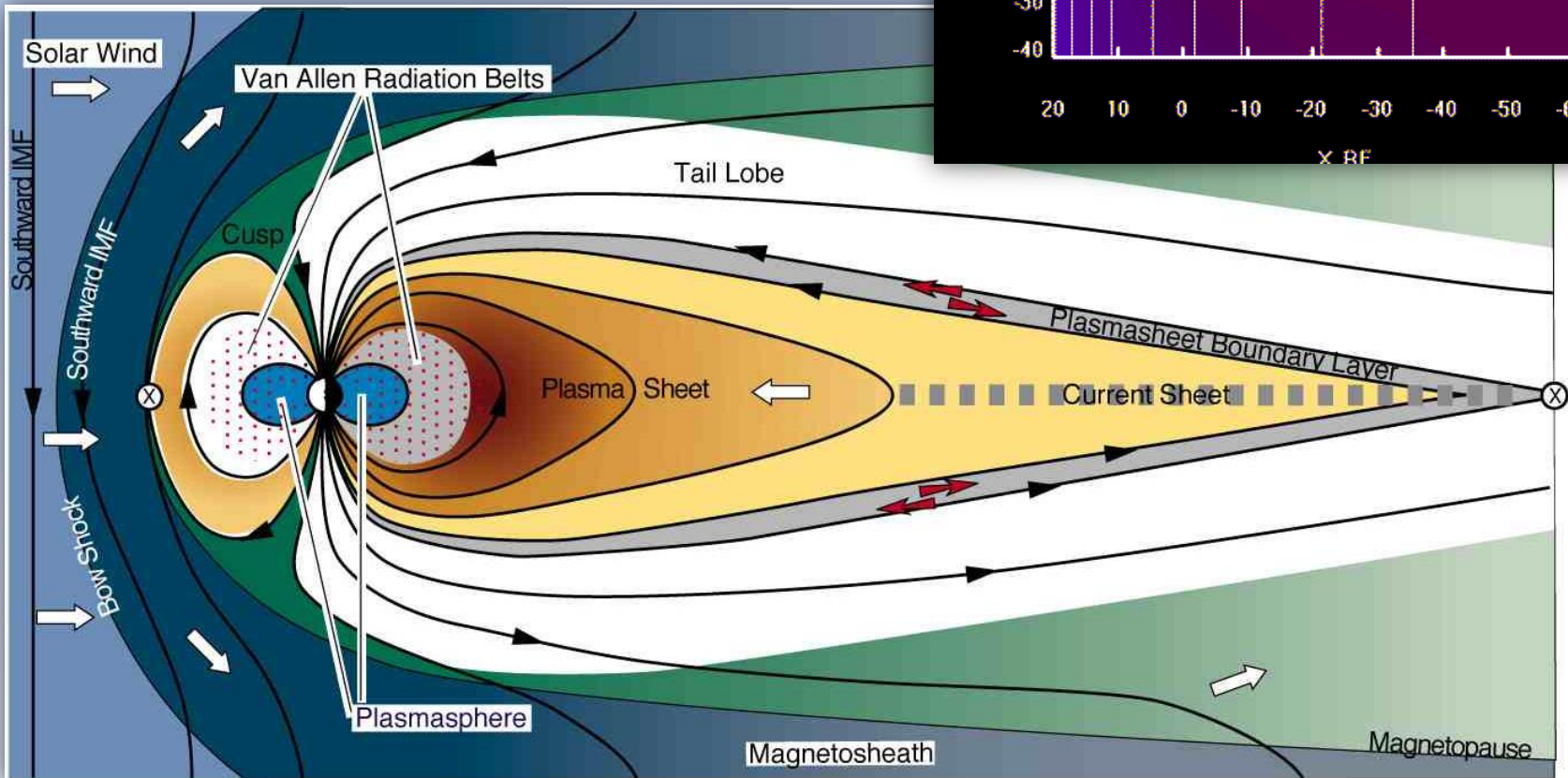
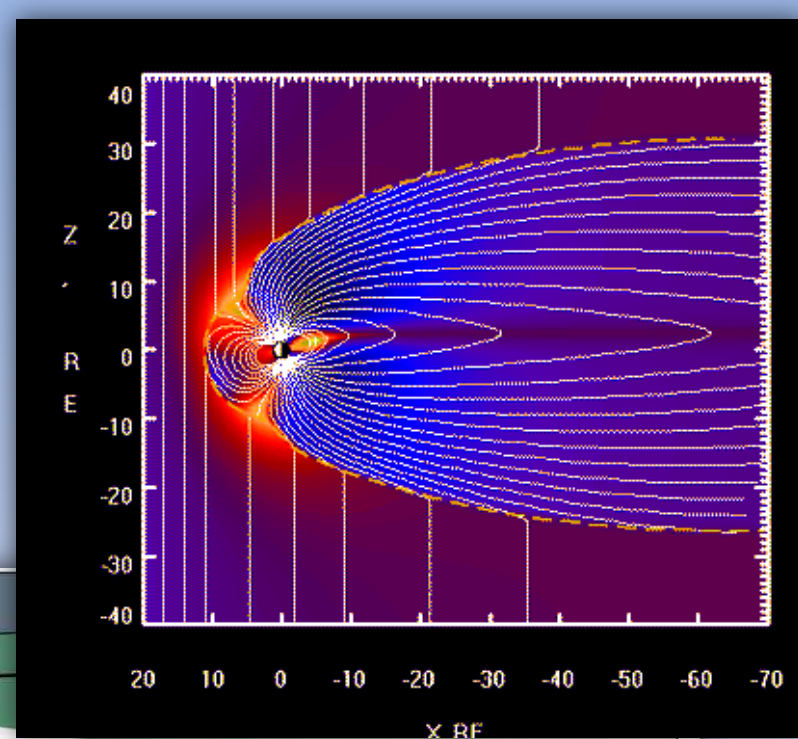


# Magnetosfery

## 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.

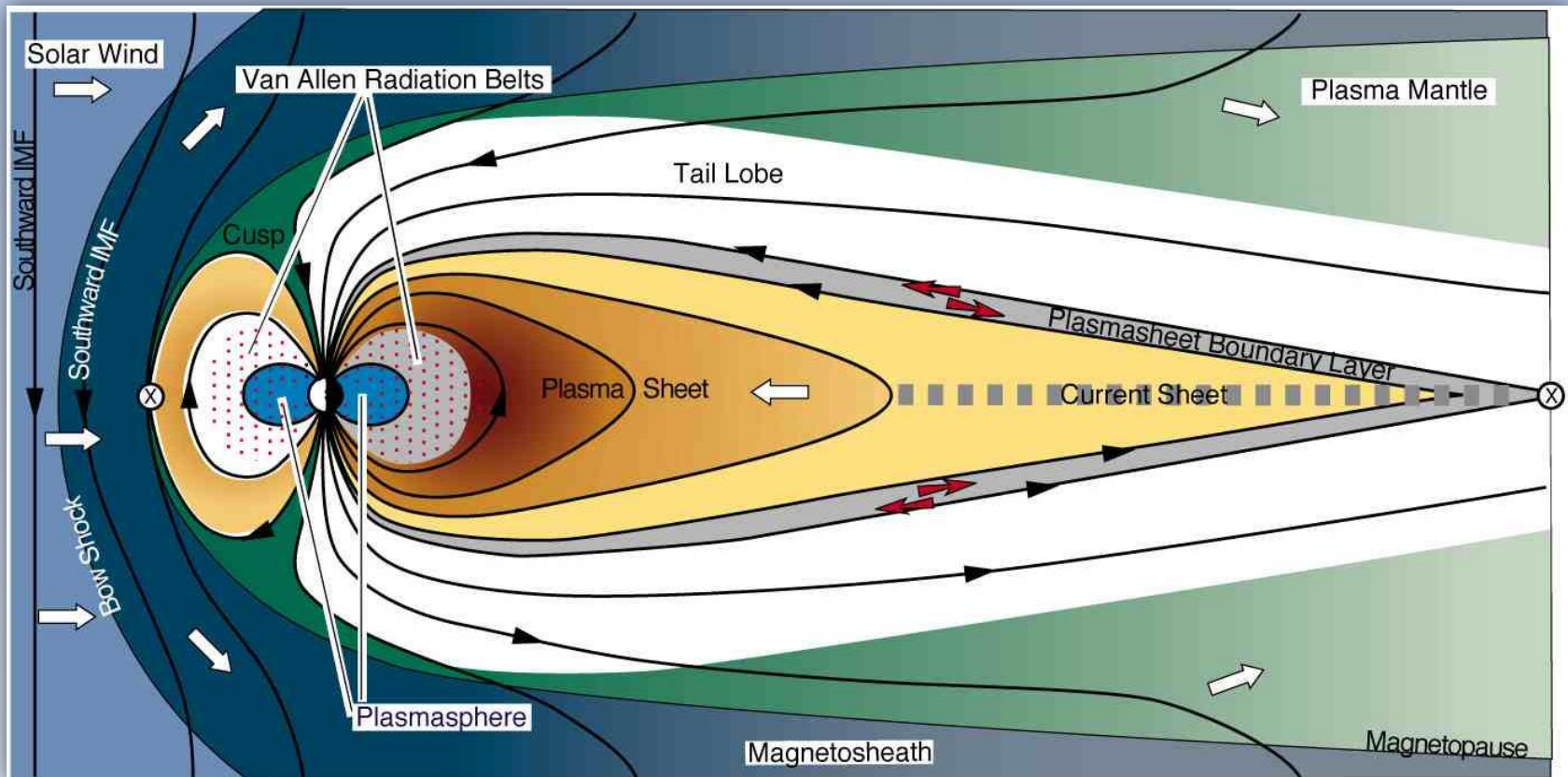
przykład: Ziemia



# Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

- **łukowa fala uderzeniowa** (*bow shock*) – przepływ wiatru słonecznego staje się poddźwiękowy (10 - 20  $R_z$ )
- **plaszcz magnetyczny** (*magnetosheath*) – obszar turbulentnego, poddźwiękowego przepływu SW





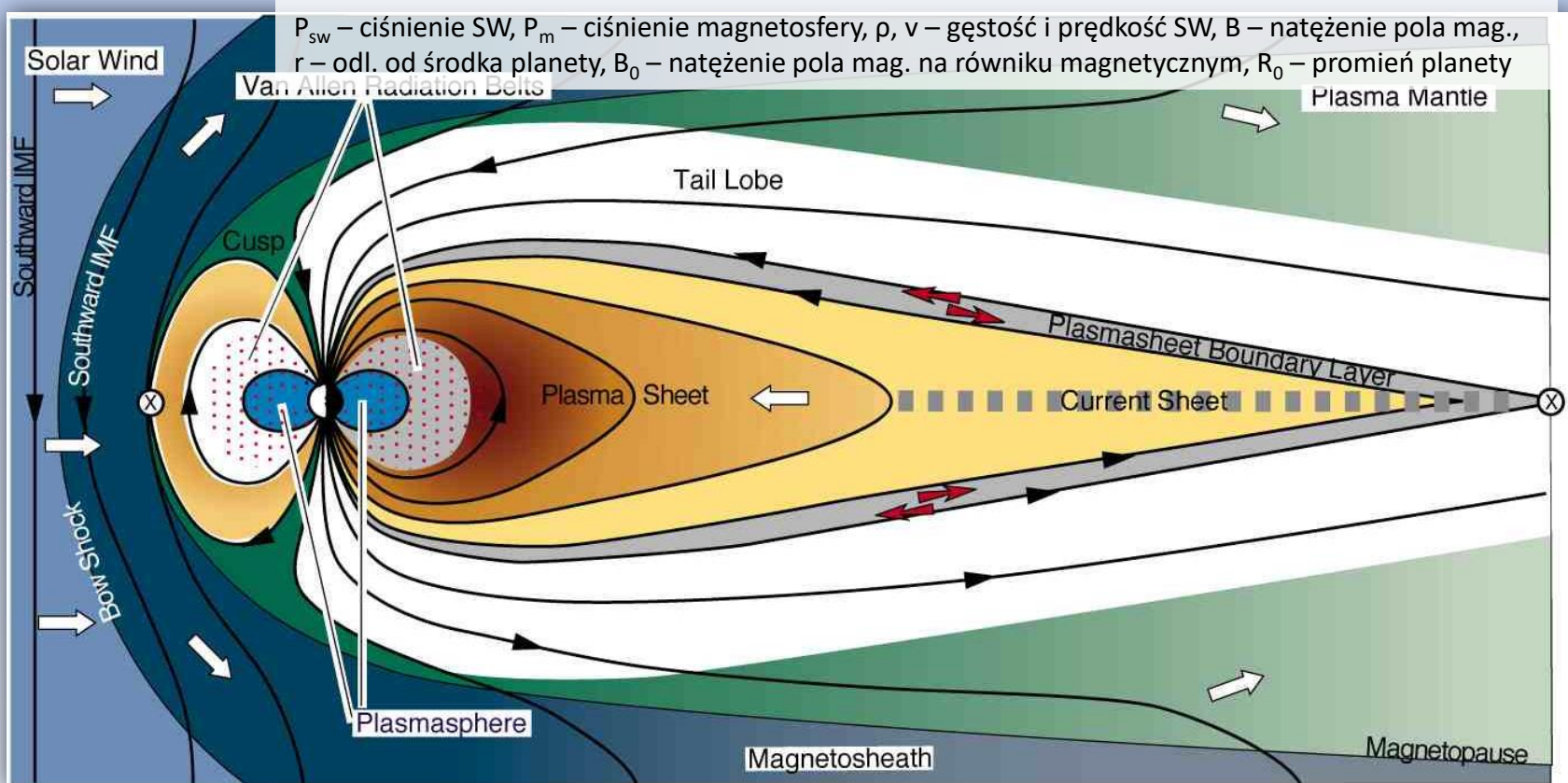
# Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

- **magnetopauza** – granica pomiędzy IMF a PMF, jej położenie określa równowaga ciśnienia SW i magnetosfery (6 - 15  $R_z$ ).

Oszacowanie odległości do magnetopauzy w płaszczyźnie równika dipola magnetycznego [CGS]:

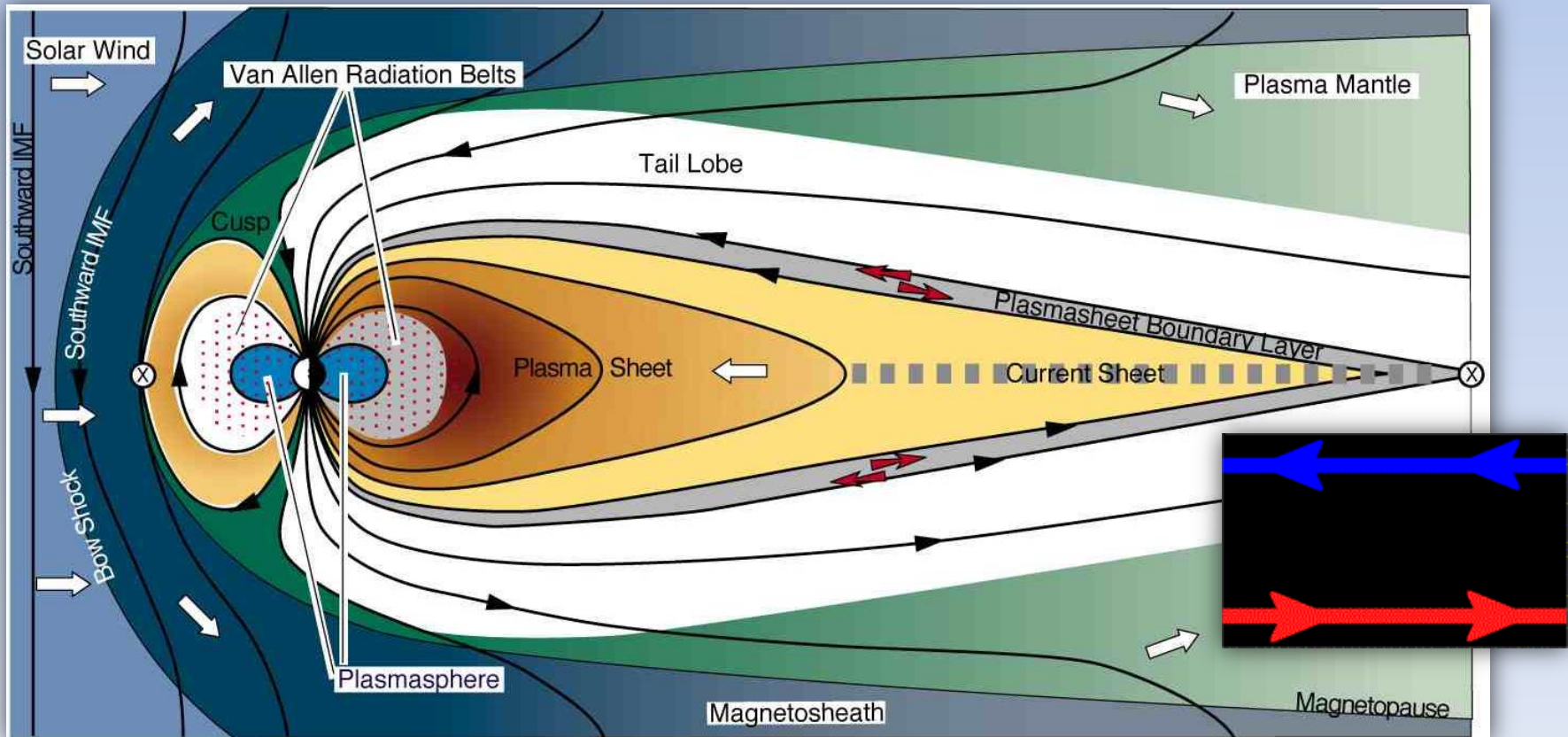
$$P_{sw} = P_m \quad (\rho v^2)_{sw} \approx \left( \frac{B(r)^2}{8\pi} \right)_m \quad B(r) = B_0 \left( \frac{R_0}{r} \right)^3 \quad r \approx \left( \frac{B_0^2}{8\pi \rho v^2} \right)^{1/6} R_0$$



# Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

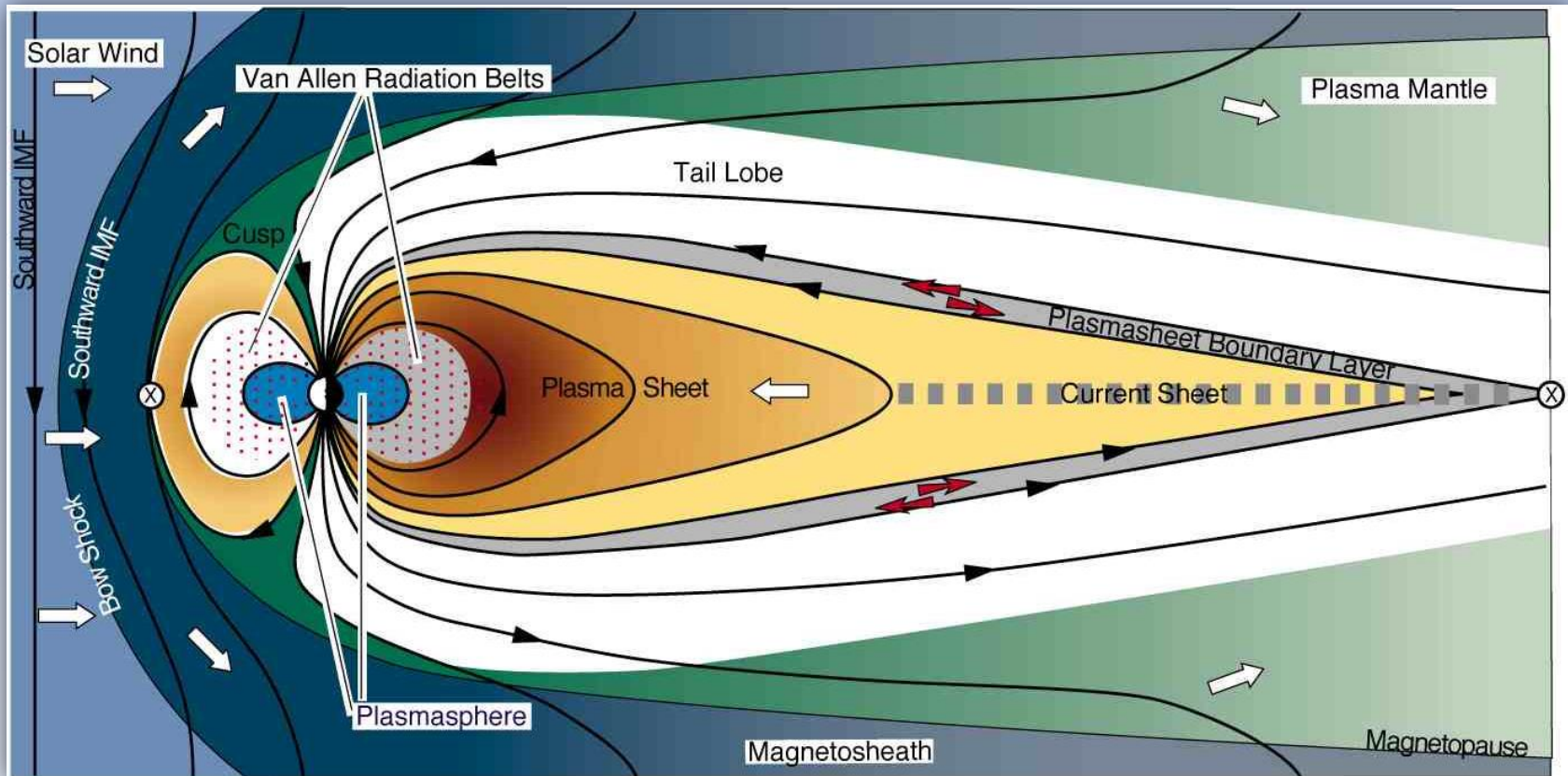
- **ogon magnetyczny** (*magnetotail*) – linie pola PMF wyciągnięte przez wiatr słoneczny w kierunku odslonecznym; w płaszczyźnie równika magnetycznego następuje zmiana kierunku linii pola PMF – **warstwa prądowa**; w warstwie tej dochodzi do przelączania linii magnetycznych (przyspieszanie cząstek)
- **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

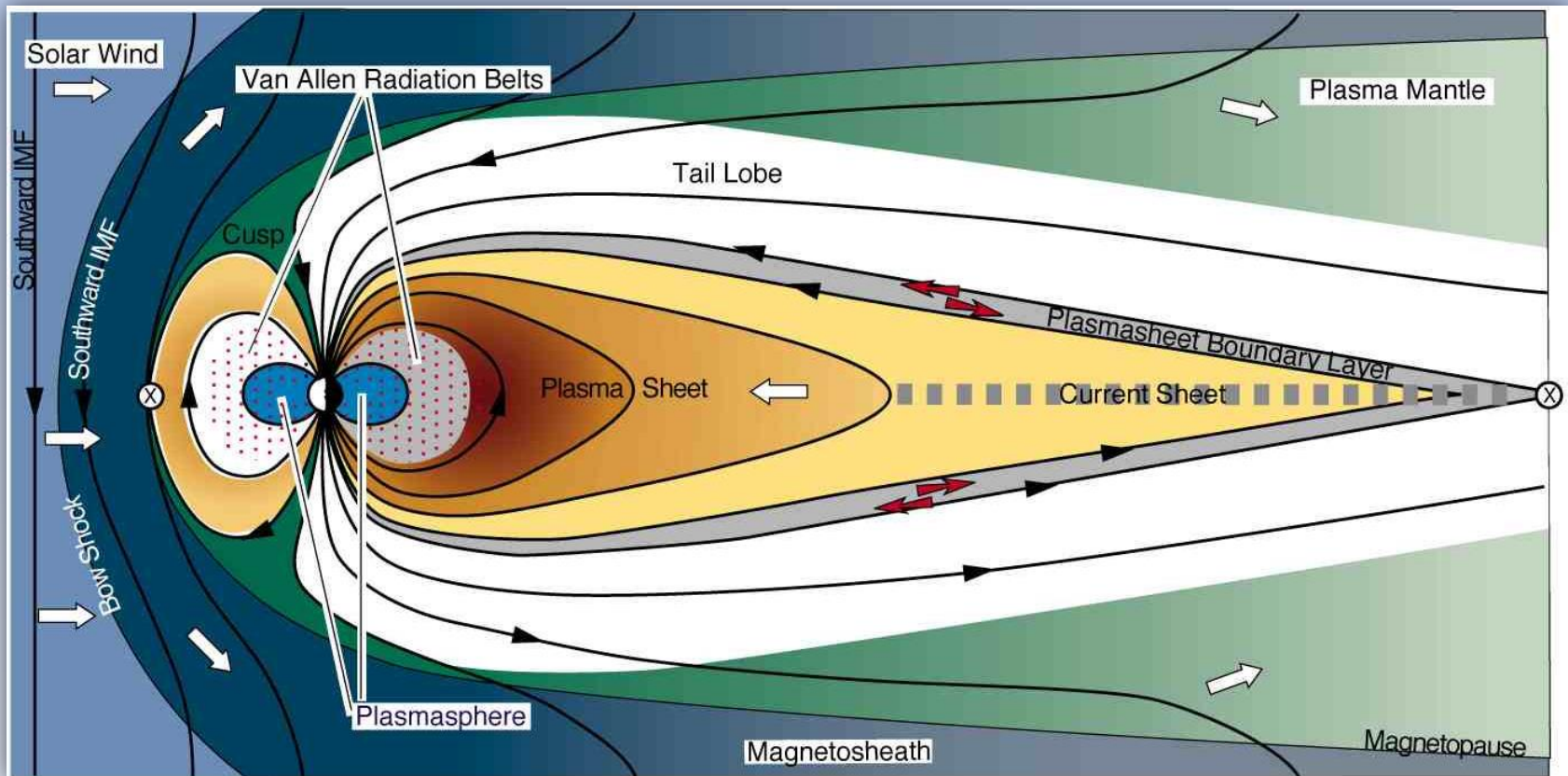




# Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

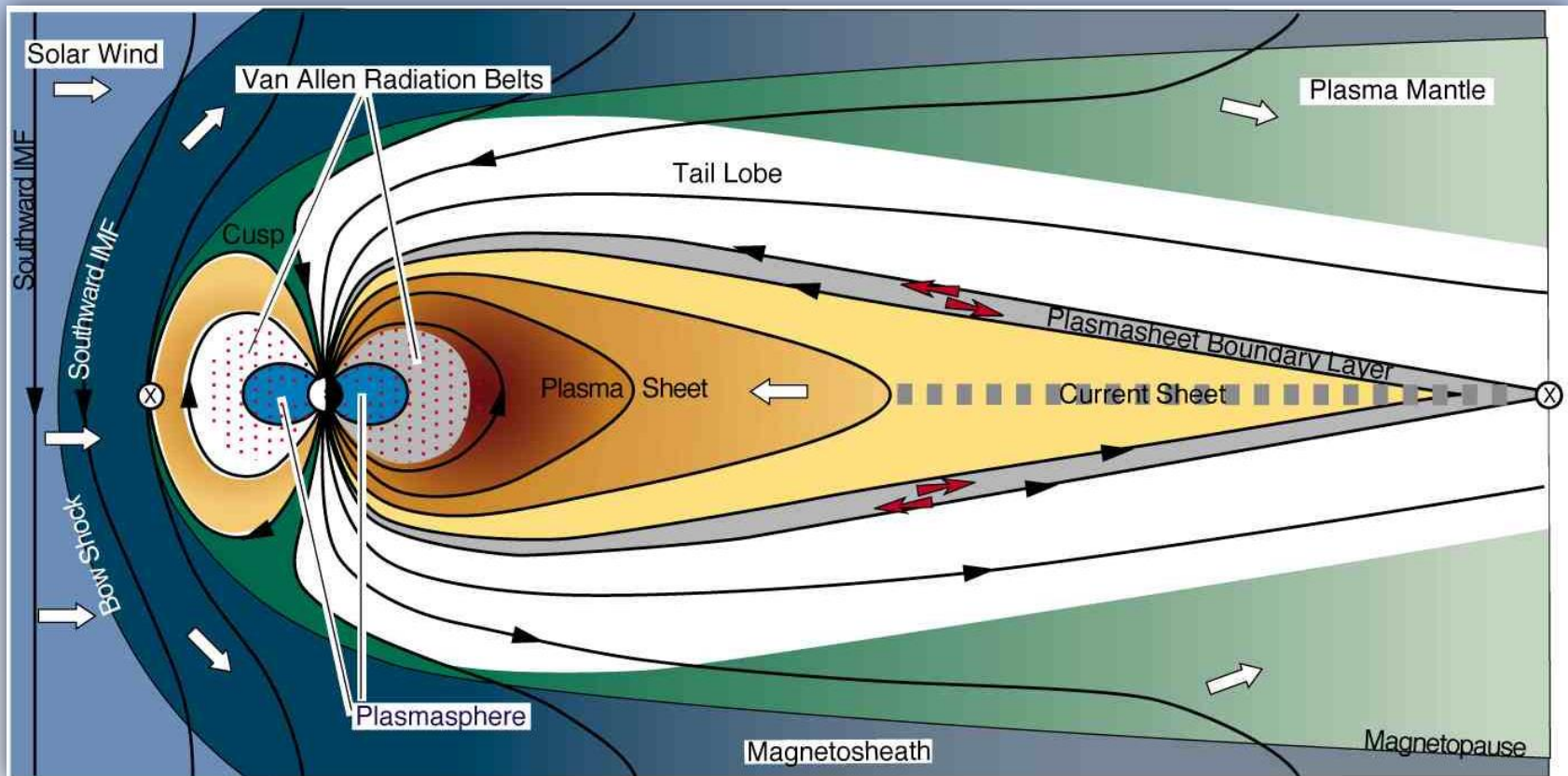
- **plaszczyna graniczna warstwy plazmowej** (*plasmashet boundary layer*) – zewnętrzna część warstwy plazmowej zawierająca cząstki przyspieszone przez rekonekcję pola magnetycznego w ogonie magnetycznym; magnetycznie związana z obszarem zorzowym
- **płat ogona** (*tail lobe*) – słabo wyróżniony obszar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



# Magnetosfery

Struktury magnetosfery to:

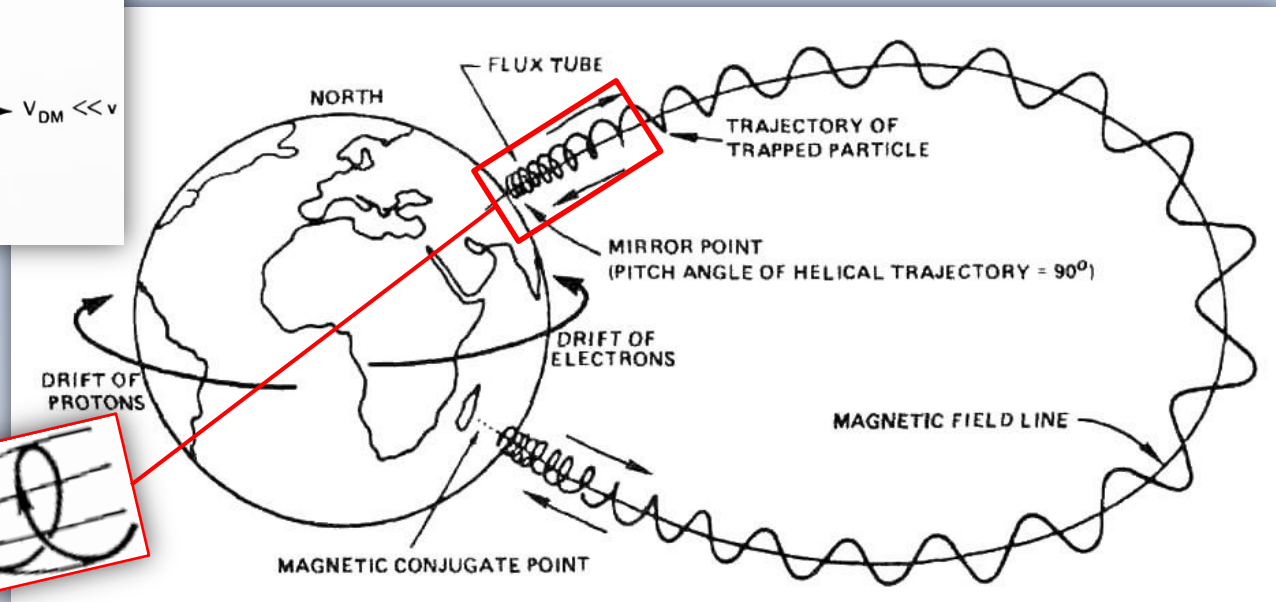
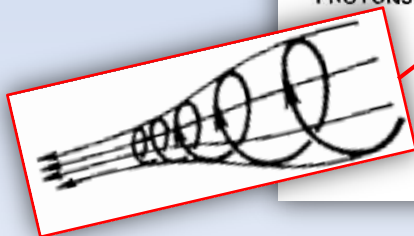
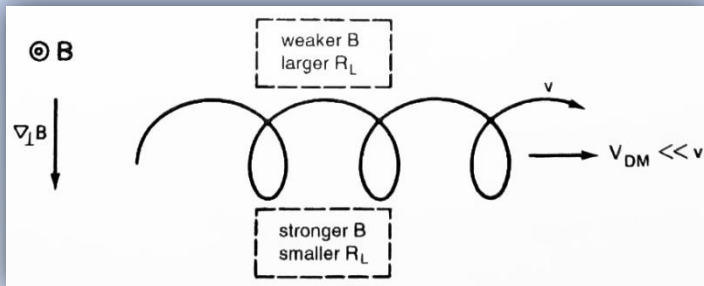
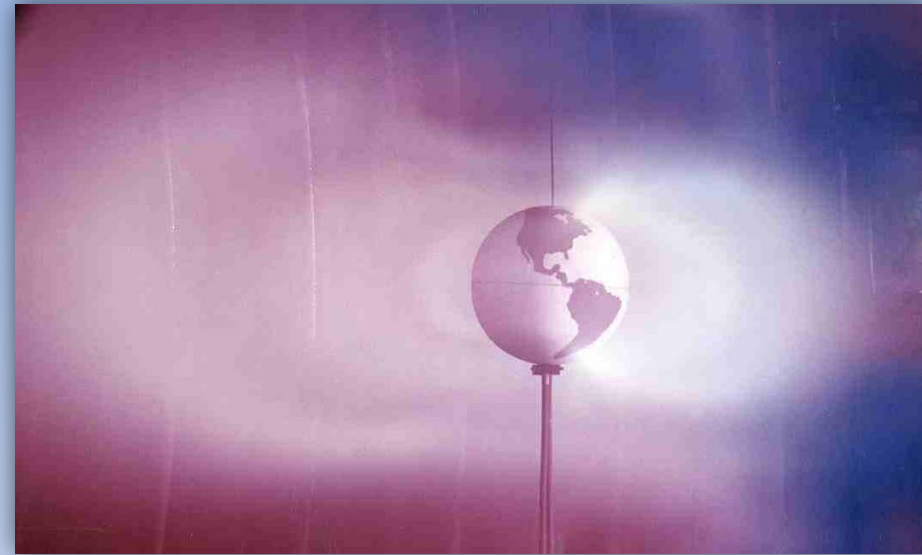
- **pasy radiacyjne Van Allena** (*Van Allen radiation belts*) – obszar wysokoenergetycznych cząstek uwięzionych w polu PMF; cząstki pochodzą z wiatru słonecznego, jonosfery i z oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą (protony)
- **plazmosfera** – obszar stanowiący przedłużenie jonosfery 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



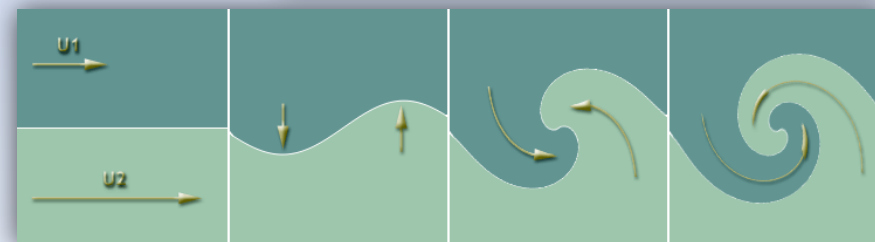
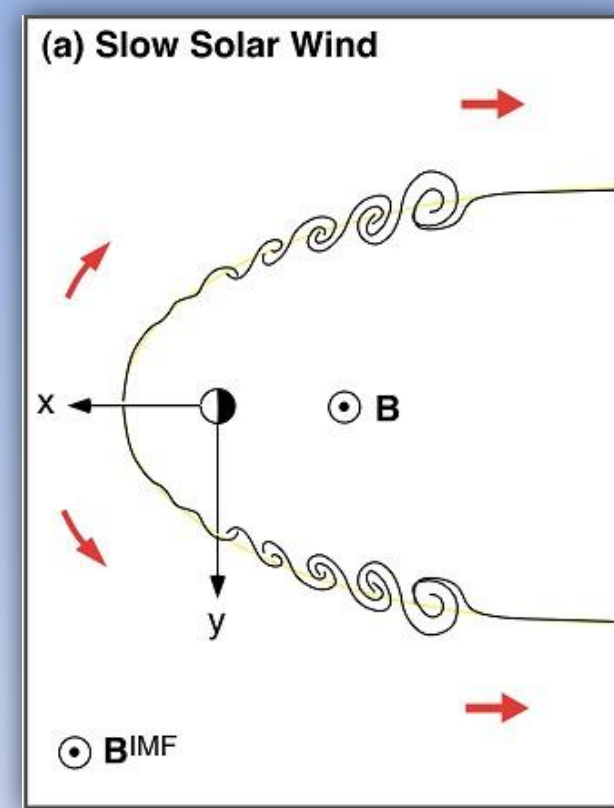


# Magnetosfery

## źródła i utrata cząstek magnetosferycznych

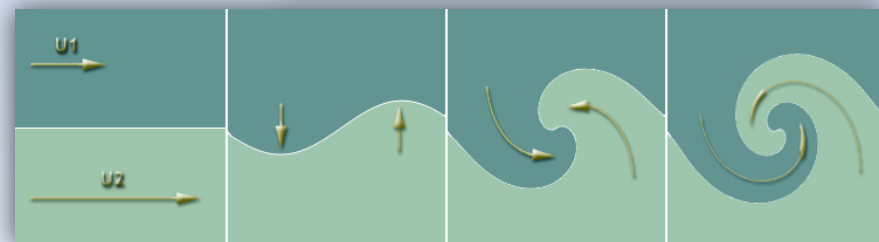
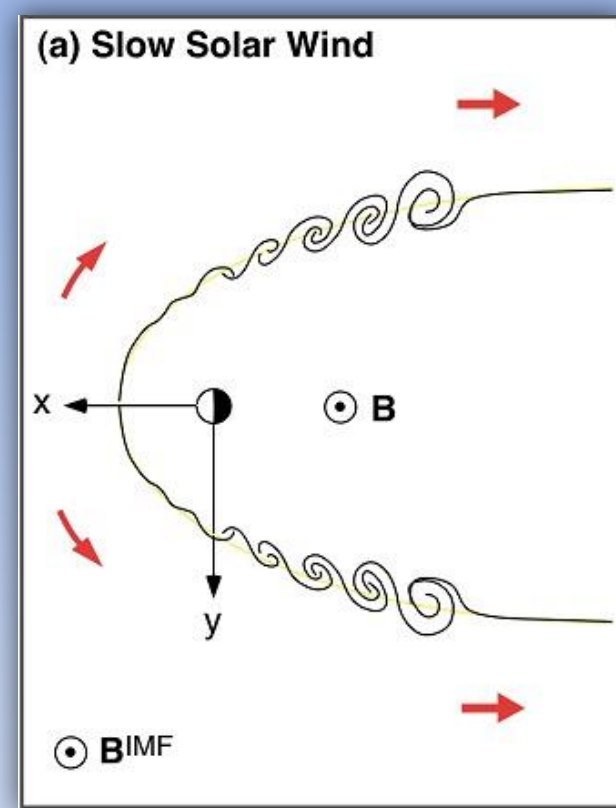
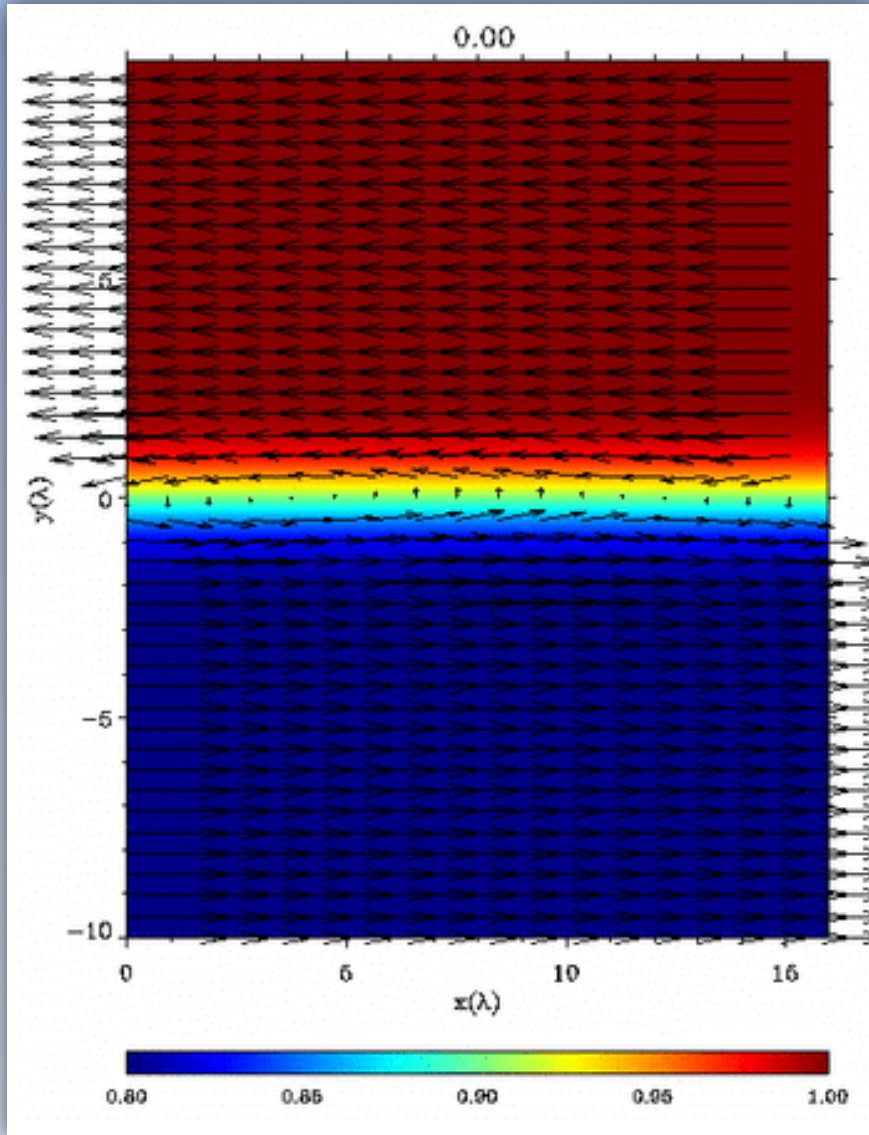
Cząstki magnetosferyczne mogą pochodzić z następujących źródeł (różnice między planetami):

- *promieniowanie kosmiczne i wiatr słoneczny* – wychwyt cząstek możliwy jest na 2 sposoby:
  - dyfundowanie 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

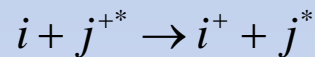


# Magnetosfery

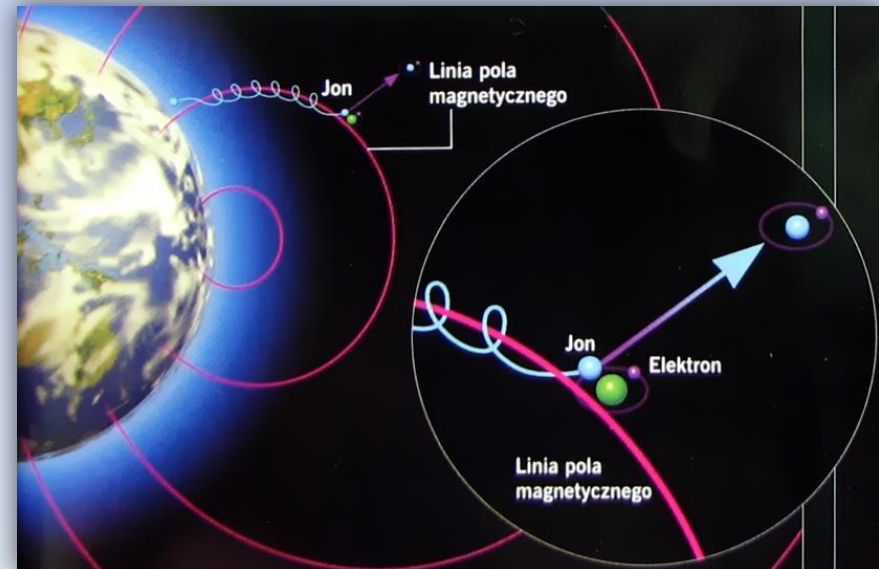
## źródła i utrata cząstek magnetosferycznych

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.





# Magnetosfery

## magnetosfery w Układzie Słonecznym

planety z własnym polem magnetycznym – cechy PMF

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Magnetic moment ( $\mathcal{M}_\oplus$ )	$4 \times 10^{-4}$	1 <sup>a</sup>	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 <sup>b</sup>	2	2.8	4.5	4.6	12	9
Dipole tilt and sense <sup>c</sup>	+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 <sup>d</sup>	90°	67–114°	87–93°	64–117°	8–172°	60–120°
Magnetopause distance <sup>e</sup> ( $R_p$ )	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).

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

<sup>b</sup> Ratio of maximum to minimum surface magnetic field strength (equal to 2 for a centered dipole field).

<sup>c</sup> Angle between the magnetic and rotation axis.

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

<sup>e</sup> Typical standoff distance of the magnetopause at the nose of the magnetosphere, in planetary radii.

**Model dynamo** – generacja PMF wymaga przewodzącego prądu 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 ( $\text{cm}^{-3}$ )	1	1000–4000	>3000	~100	3	2
Composition	$\text{H}^+$	$\text{O}^+$ , $\text{H}^+$ , $\text{N}^+$ , $\text{He}^+$ , $\text{He}^{++}$	$\text{O}^{n+}$ , $\text{S}^{n+}$ , $\text{SO}_2^+$ , $\text{Cl}^+$	$\text{O}^+$ , $\text{H}_2\text{O}^+$ , $\text{H}^+$	$\text{H}^+$	$\text{N}^+$ , $\text{H}^+$
Dominant source	solar wind	ionosphere solar wind	Io	rings, Enceladus, Tethys, Dione	atmosphere	Triton
Production rate (ions $\text{s}^{-1}$ )	?	$2 \times 10^{26}$	$>10^{28}$	$10^{26}$	$10^{25}$	$10^{25}$
Ion lifetime	minutes	days, <sup>a</sup> hours <sup>b</sup>	10–100 days	1 month–years	1–30 days	1 day
Plasma motion controlled by:	solar wind	rotation <sup>a</sup> solar wind <sup>b</sup>	rotation	rotation	solar wind + rotation	rotation (+ solar wind?)

After Kivelson and Bagenal (2007).

<sup>a</sup> Inside plasmasphere.

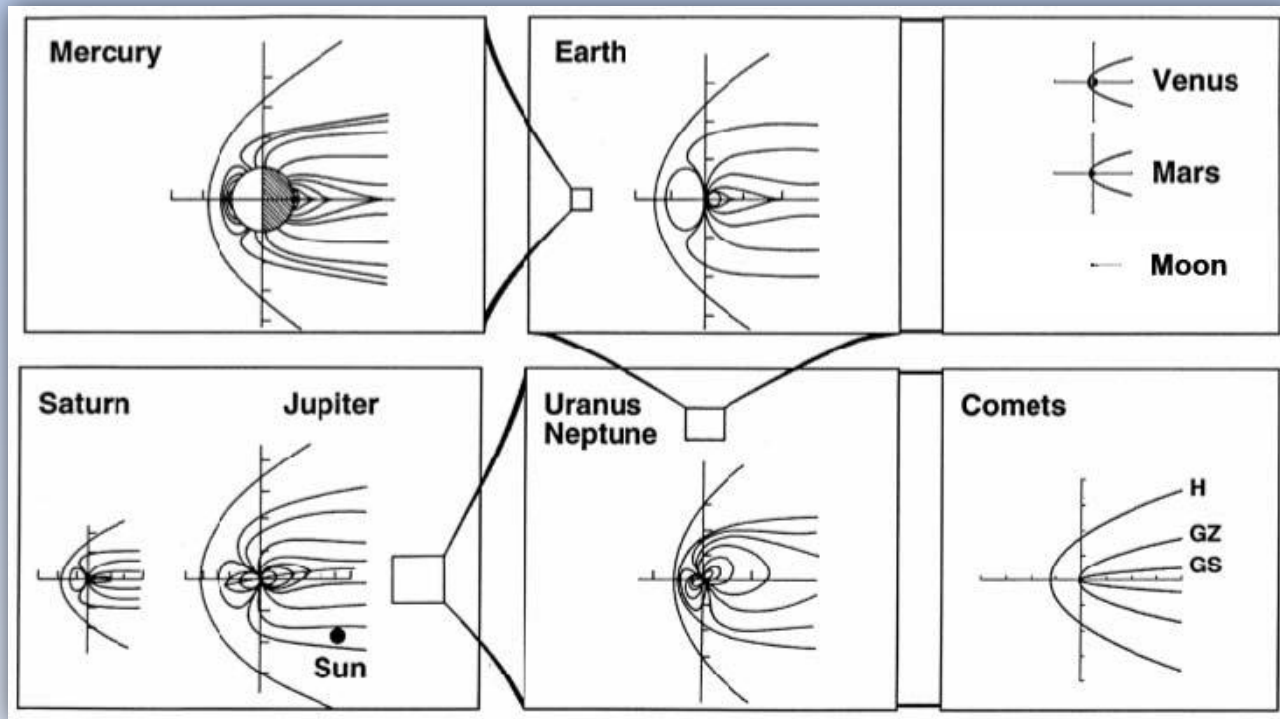
<sup>b</sup> Outside plasmasphere.

# 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