

3.1.1. Atmosfera wzorcowa ISA

W celu sprowadzenia wyników badań obiektów latających (np. samoloty, rakiety) do jednolitych warunków, czy prowadzenia obliczeń konstrukcyjnych dla porównywalnych warunków wprowadzono modele matematyczne stanu atmosfery statycznej, określone jako atmosfera wzorcowa. W Polsce obowiązywała norma PN-76/N-xxxx obecnie zastąpiona przez normę PN-ISO 5843-6:2005 Normy te obejmują zakres wysokości od $-2...+80km$.

Model ten jest modelem statycznym i opiera się na równaniu równowagi hydrostatycznej słupa gazu. Stosowne równanie równowagi otrzymuje się albo z równań eulera dla ruchu płynu doskonałego, przy założeniu prędkości przepływu równej zero, lub z równowagi hydrostatycznej elementu gazowego o gęstości ρ i wysokości dh zmiana ciśnienia z wysokością wynosi $-dp$. Zakładamy również, że związek gęstości i ciśnienia opisuje adiabata Poissona, a gaz jest suchy. Ponieważ wraz ze zmianą wysokości zmienia się przyspieszenie grawitacyjne obliczenia prowadzimy przy założeniu stałego $g=g_0$. Natomiast używana do obliczeń wysokość nie odpowiada wysokości geometrycznej h a jest tak zwaną wysokością geopotencjalną H definiowaną jako:

$$H = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h, \theta) dh \quad (3.1)$$

gdzie: h -wysokość geometryczna, a φ -szerokość geograficzna (wpływ asferyczności Ziemi i ruchu obrotowego planety)

Wówczas to, mamy:

$$dp = -g_0 \rho dH \quad (3.2)$$

ale równanie stanu:

$$p = \rho R_i T \quad (3.3)$$

Mnożąc obustronnie równanie równowagi hydrostatycznej elementu słupa gazu przez ciśnienie, dostajemy i uwzględniając równanie Clapeyrona (3.3):

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g_0}{RT} dh \quad (3.4)$$

Postać rozwiązania równania różniczkowego o zmiennych rozdzielonych zależy od prawa zmiany temperatury z wysokością. Wyróżniamy tu dwa rodzaje warstw atmosfery: z liniowym gradientem temperatury i warstwy izotermiczne. W przypadku warstwy izotermicznej rozwiązaniem jest tzw. wzór barometryczny tj.

$$p = p_0 \exp \left(-\frac{g_0}{RT_0} (H - H_0) \right) \quad (3.5)$$

Przy czym p_0 , T_0 , H_0 oznaczają parametry „na dolnej granicy rozpatrywanej warstwy”

Dla przemiany izotermicznej gęstość zmienia się proporcjonalnie do ciśnienia, zatem mamy natychmiast:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{g_0}{RT_0}(H - H_0)\right) \quad (3.6)$$

W przypadku warstw gradientowych przyjmujemy liniową zależność zmiany temperatury z wysokością:

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \beta(H - H_0) \\ \beta &= dT/dH \end{aligned} \quad (3.7)$$

Wówczas to, całkowanie (3.4) daje:

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-g_0/R_t\beta} \quad (3.8)$$

oraz:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-(1+g_0/R_t\beta)} \quad (3.9)$$

Ze względu na rozkłady temperatur umownie wyróżniono następujące warstwy atmosfery:
Standardowa atmosfera 1976

Nazwa warstwy	Geopotencjalna wysokość podstawy H [m]	Wysokość podstawy geometryczna h [m]	Gradient temperatury β [K/m]	Temperatura podstawy T [K]	Ciśnienie w podstawie p [Pa]
troposfera	0,0	0,0	-0,0065	288,15	101 325
tropopauza	11 000	11 019	+0,0	216,95	22 632
stratosfera	20 000	20 063	+0,001	216,95	5474,9
stratosfera	32 000	32 162	+0,0028	228,65	868,02
stratopauza	47 000	47 350	+0,0	270,65	110,91
mezosfera	51 000	51 413	-0,0028	270,65	66,939
mezosfera	71 000	71 802	-0,002,0	214,65	3,9564
mezopauza	84 852	86 000	—	186,95	0,3734

Troposfera to warstwa ta sięgająca od powierzchni Ziemi do wysokości ok. 10 km. W średnich szerokościach geograficznych. Jej górna granica zmienia wysokość w zależności od pory roku i od szerokości geograficznej. Nad biegunami sięga ona do 6 km w zimie i do 8 km w lecie. W umiarkowanych szerokościach geograficznych od 10 km w zimie do 12 km w lecie. Nad równikiem troposfera sięga nawet do 20 km. Zróżnicowana grubość troposfery wynika z różnic nagrzewania się obszarów leżących na różnych szerokościach geograficznych oraz różnej wartości siły odśrodkowej działającej na cząsteczki gazów atmosferycznych. Charakterystyczną cechą tej warstwy jest ciągły spadek temperatury wraz ze wzrostem wysokości, przeciętnie 6°C na 1000 m.

Troposfera jest najbardziej dynamiczną częścią atmosfery zachodzi w niej większość zjawisk pogodowych, i zawiera ok 80% masy atmosfery ziemskiej. Mimo pionowego gradientu temperatury może dochodzić do lokalnego zjawiska inwersji termicznej. Warstwa ta przez swoją warstwę przyziemną (warstwa przyścienna) oddziałuje cieplnie i dynamicznie z powierzchnią planety.

Tropopauza jest bardzo cienką warstwą o grubości ok. 1..2 km, tworząca strefę przejściową między troposferą i stratosferą. Nad biegunami rozciąga się na wysokości od ok. 6..8 km, w szerokościach umiarkowanych do 10..12 km, a nad równikiem jest to nawet do 15...17 km. Jej położenie zależy również od pory roku. Latem sięga wyżej niż zimą. Temperatura w warstwie tej sięga ok. -56°C .

Stratosferą nazywamy warstwę atmosfery planetarnej, w której ma miejsce [inwersja temperatury](#). Jest położona nad troposferą, od której dzieli ją [tropopauza](#), a pod [mezosferą](#), od której oddziela ją [stratopauza](#). Stratosfera zaczyna się od wysokości ok. 10 km nad powierzchnią Ziemi na średnich szerokościach geograficznych, a kończy na wysokości ok. 50 km. W obszarach równikowych jej dolna granica, tropopauza, znajduje się wyżej, nawet do 20 km, a w obszarach podbiegunowych zimą obniża się do 7 km. Wiąże się to z nasłonecznieniem Ziemi i jej ruchem obrotowym. W dolnej części stratosfery panuje prawie stała temperatura powietrza, w górnej stratosferze ze wzrostem wysokości temperatura rośnie. Ruchy turbulentne powietrza są niewielkie więc pionowe mieszanie powietrza jest małe, stąd mamy do czynienia z uwarstwieniem osrodka, od czego wzięła się nazwa stratosfery. W stratosferze znajduje się warstwa ozonowa odpowiedzialna za absorpcję promieniowania UV. Do zjawisk występujących w stratosferze należą, wyładowania elektryczne do jonosfery, tzw. błękitne smugi występujące ponad chmurami burzowymi. Występują też czasami tzw. obłoki perłowe

Stratopauza to cienka warstwa przejściowa pomiędzy stratosferą a mezosferą, znajdująca się na wysokości około 50 km nad powierzchnią Ziemi. Temperatura w tej warstwie wynosi w przybliżeniu 0°C

W atmosferze wyróżniamy również **jonosferę**, zjonizowaną warstwę atmosfery występująca powyżej 50–60 km do 1000 km nad powierzchnią Ziemi, w termosferze. Zawiera ona dużo plazmy. Plazma ta powstaje na skutek jonizacji cząsteczek gazów, obecnych w atmosferze pod wpływem promieniowania kosmicznego oraz UV słonecznego lub przez reakcję wymiany ładunku (pomiędzy jonem a cząsteczką niezjonizowaną). W jonosferze następuje załamywanie, odbijanie, pochłanianie i polaryzacja fal radiowych.

Mezosfera to warstwa atmosfery planety, w której temperatura maleje z wysokością, i jest położona nad stratosferą, od której dzieli ją stratopauza, a pod termosferą, od której oddziela ją termopauza. Najważniejszą różnicą pomiędzy mezosferą a niższymi warstwami jest bardzo mała gęstość ośrodka, śladowa zawartość pary wodnej i występowanie ozonu O_3 . W górnej części mezosfery można czasami w nocy zaobserwować tzw. obłoki srebrzyste: najwyższe chmury w atmosferze Ziemi. W mezosferze obserwuje się też tzw. sprite'y i elfy, rodzaje potężnych wyładowań atmosferycznych do jonosfery występujące wysoko nad chmurami burzowymi.

Mezopauza jest to cienka izotermiczna warstwa atmosfery ziemskiej, znajdująca się na wysokości 80–90 km i oddzielająca mezosferę od leżącej wyżej termosfery. W mezopauzie temperatura powietrza wynosi około -100°C , a ciśnienie około 0,1 hPa. Mezopauza jest związana z występowaniem zórz polarnych w wyższych szerokościach geograficznych.

Badania w obszarze mezosfery i mezopauzy są możliwe jedynie sondażom raketowym: jest to z wysoko dla samolotów i balonów i za nisko dla satelitów.

Termosfera zewnętrzna warstwa atmosfery Ziemi, w której ma miejsce absorpcja promieniowania, co skutkuje wzrostem temperatury z wysokością (o czym dalej w tym rozdziale). Gazy w termosferze są bardzo rozrzedzone i może być ona uznawana już za część przestrzeni kosmicznej. Jest położona nad mezosferą, od której dzieli ją mezopauza, a pod najbardziej zewnętrzną egzosferą, od której oddziela ją termopauza. Warstwa ta zawdzięcza nazwę szybkiemu wzrostowi temperatury. Jest to spowodowane absorpcją słonecznego UV i X, powodującą dysocjację i jonizację gazów atmosferycznych. Powyżej wysokości $H=90\ldots100$ km (homopauza) gazy atmosferyczne nie są już w istotny sposób mieszane przez ruch turbulentny a skład chemiczny zmienia się z wysokością. Obszar ten nosi nazwę heterosfery i obejmuje termosferę.

Termopauza to z kolei przejściowa warstwa atmosfery ziemskiej, oddzielająca termosferę od egzosfery. Znajduje się na wysokości 500...1000 km.

Egzosfera to najbardziej zewnętrzna warstwa atmosfery planetarne zwana inaczej sferą dyssypacji (rozpraszania). Egzosfera stanowi płynną strefę przejściową między atmosferą a otwartą przestrzenią kosmiczną. Cechą charakterystyczną jest to, że cząstki gazu poruszają się po trajektoriach balistycznych, brak jest też możliwości rozchodzenia się fali dźwiękowej. Temperatura tak rozrzedzonego gazu jest rozumiana, jako miara średniej energii kinetycznej cząsteczek. Ze względu na panującą w egzosferze wysoką próżnię, nie zachodzi tu transport energii cieplnej poprzez przewodnictwo, ani przez konwekcję. Cząstki gazów w egzosferze mogą mieć bardzo duże energie, jednak z powodu znikomej liczby zderzeń nie są w stanie w znaczący sposób przenosić ciepła. Głównym czynnikiem decydującym o temperaturze ciała w egzosferze jest to, czy pada na nie promieniowanie słoneczne.

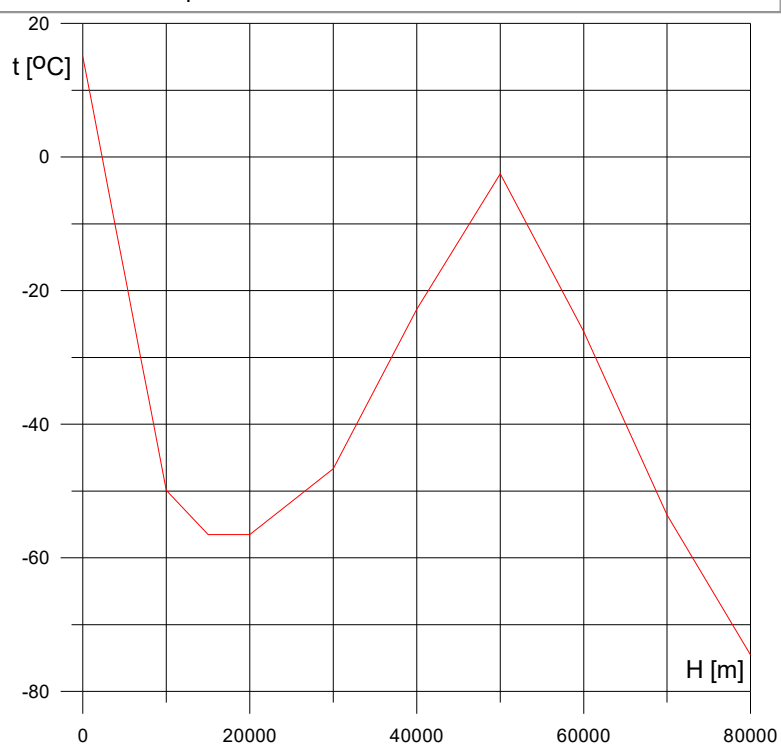
Geokorona, jest najbardziej rozproszona otoczka wodorowa Ziemi, stanowiąca część jej egzosfery, obserwowalna w zakresie ultrafioletu w postaci poświaty wokół naszej planety.

Geokoronę tworzy neutralny wodór, który odbija promieniowanie słoneczne z zakresu dalekiego UV. Jego gęstość sięga od ok. 1000 molekuł na centymetr sześcienny na wewnętrznej granicy prądu pierścieniowego płynącego w pasach radiacyjnych, do mniej niż 100 molekuł na wysokości orbity geostacjonarnej.

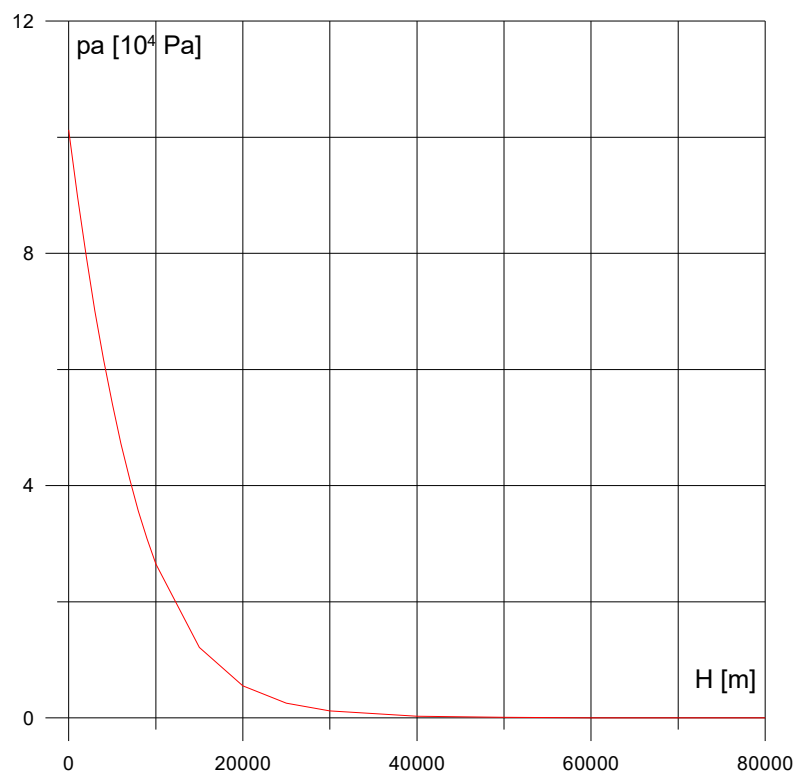
Własności fizyczne wg U.S. Standard Atmosphere, 1976				
wysokość [m]	temperatura [K]	ciśnienie [Pa]	gęstość [kg/m ³]	Lepkość dynamiczna [Pa s]
-2000	301.15	1.27774E+5	1.47808	1.87630E-5
-1,000	294.65	1.13929E+5	1.34700	1.84434E-5
0	288.15	1.01325E+5	1.22500	1.81206E-5
1,000	281.65	8.98746E+4	1.11164	1.77943E-5
2,000	275.15	7.94952E+4	1.00649	1.74645E-5
3,000	268.65	7.01085E+4	9.09122E-1	1.71311E-5
4,000	262.15	6.16402E+4	8.19129E-1	1.67940E-5
5,000	255.65	5.40199E+4	7.36116E-1	1.64531E-5
6,000	249.15	4.71810E+4	6.59697E-1	1.61084E-5
7,000	242.65	4.10607E+4	5.89501E-1	1.57596E-5
8,000	236.15	3.55998E+4	5.25168E-1	1.54068E-5
9,000	229.65	3.07425E+4	4.66348E-1	1.50498E-5
10,000	223.15	2.64363E+4	4.12707E-1	1.46884E-5
12,000	216.65	1.93304E+4	3.10828E-1	1.43226E-5
15,000	216.65	1.20446E+4	1.93674E-1	1.43226E-5
20,000	216.65	5.47489E+3	8.80349E-2	1.43226E-5
25,000	221.65	2.51102E+3	3.94658E-2	1.46044E-5
30,000	226.65	1.17187E+3	1.80119E-2	1.48835E-5

35,000	237.05	5.58924E+2	8.21392E-3	1.54559E-5
40,000	251.05	2.77522E+2	3.85101E-3	1.62096E-5
45,000	265.05	1.43135E+2	1.88129E-3	1.69449E-5
50,000	270.65	7.59448E+1	9.77525E-4	1.72341E-5
60,000	245.45	2.03143E+1	2.88321E-4	1.59104E-5
70,000	217.45	4.63422	7.42430E-5	1.43679E-5
80,000	196.65	8.86280E-1	1.57005E-5	1.31682E-5
84,852	186.95	3.73384E-1	6.95788E-6	1.25915E-5

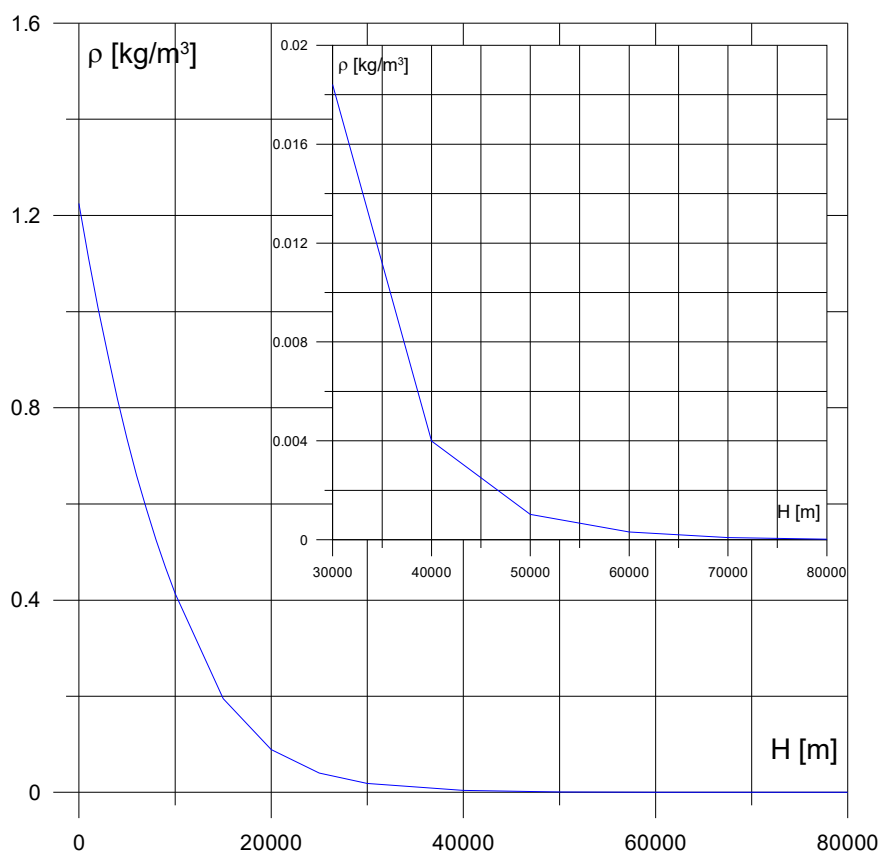
Powietrze jest gazem doskonałym i jest suche; Wykładnik adiabaty Poissona = $\kappa=1,40$; masa molekularna to 86 km = 28.9644
 Skład n.p.m. : N₂–78.084%, O₂–20.9476%, Ar–0.934%, CO₂–0.0314%, Ne–0.001818%, He–0.000524%, CH₄–0.0002%



Rys. 3.xxx Pionowy rozkład temperatury w atmosferze wg Atmosfery Wzorcowej



Rys. 3.xxx Rozkład ciśnienia atmosferycznego w funkcji wysokości wg Atmosfery wzorcowej



Rys. 3.xxx. Rozkład gęstości w funkcji wysokości wg Atmosfery Wzorcowej

Model atmosfery standardowej sprawdza się dobrze do wysokości ok 80 km, gdzie skład powietrza jest stały, a aktywność słoneczna ma stosunkowo niewielki wpływ na parametry ośrodka.

Jednakże, z punktu widzenia techniki raketowej satelitarnej dobrze jest posiadać model atmosfery sięgający nawet wysokości 500 km (choć gęstości ośrodka odpowiadają wysokiej próżni technicznej). Skutkiem tego stworzono modele empiryczne sięgające wysokości 1000 km i uwzględniające wpływ aktywności słonecznej na parametry stanu atmosfery. Najszerzej stosowanym modelem jest model MSISE-90 opisany poniżej

3.1.2. Atmosfera wzorcowa CIRA 2012

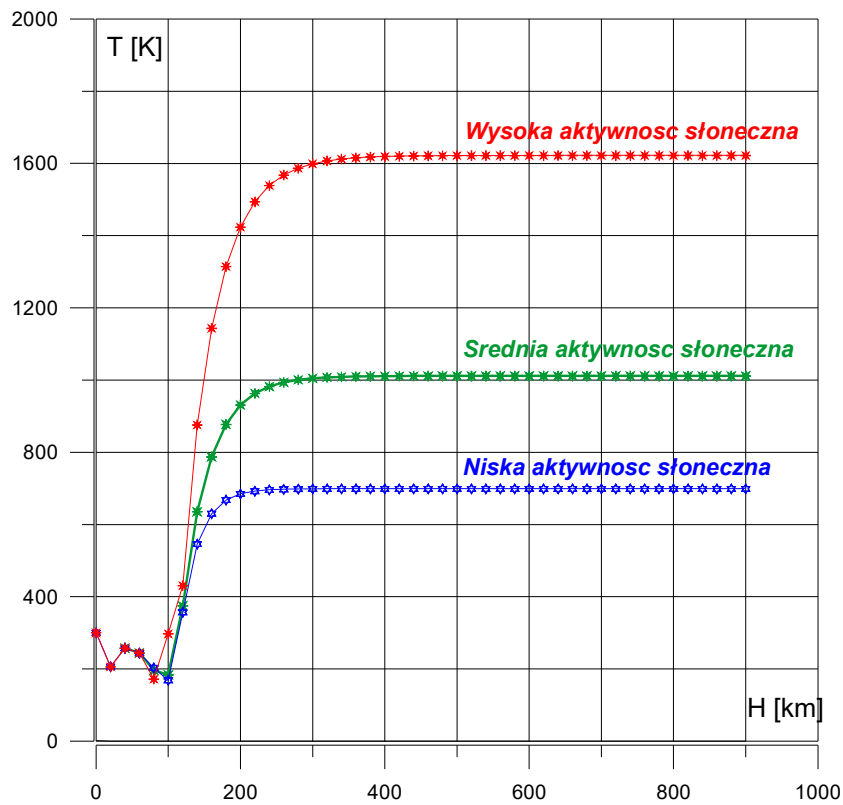
Międzynarodowa Atmosfera Referencyjna COSPAR (CIRA) to empiryczny model atmosfery Ziemi. Składa się z zestawu tabel średnich ciśnień powietrza, wysokości i temperatur. Modele CIRA zostały opracowane przez Komitet ds. Badań Kosmicznych (COSPAR) i są ważne dla planowania lotów kosmicznych. W zakresie wysokości powyżej 120 km jest ona identyczna z amerykańskim modelem MSISE-90 opracowanym przez NASA.

MSISE-90 Model górnej atmosfery ziemskiej												
h [km]	Niska aktywność słoneczna				Średnia aktywność słoneczna				Bardzo wysoka aktywność słoneczna			
	T [K]	ρ (kg/m ³)	p (Pa)	Masa molekularowa [kg/kmol]	T [K]	ρ [kg/m ³]	p [Pa]	Masa molekularowa [kg/kmol]	T [K]	ρ [kg/m ³]	p [Pa]	Masa molekularowa [kg/kmol]
0	300.2511	1.17E+00	1.01E+05	28.9502	300.2511	1.17E+00	1.01E+05	28.9502	300.2511	1.16E+00	9.98E+04	28.9502
20	206.2085	9.48E-02	5.62E+03	28.9502	206.2085	9.49E-02	5.62E+03	28.9502	206.2085	9.41E-02	5.57E+03	28.9502
40	257.6979	4.07E-03	3.01E+02	28.9502	257.6979	4.07E-03	3.02E+02	28.9502	257.6979	4.04E-03	2.99E+02	28.9502
60	244.1212	3.31E-04	2.32E+01	28.9502	244.1212	3.31E-04	2.32E+01	28.9502	244.1212	3.28E-04	2.30E+01	28.9502
80	203.1065	1.69E-05	9.81E-01	29.1353	196.3636	1.68E-05	9.45E-01	29.0175	172.2146	1.68E-05	8.42E-01	28.5290
100	168.7219	5.77E-07	2.89E-02	28.0036	184.0160	5.08E-07	2.81E-02	27.7137	297.3338	2.78E-07	2.63E-02	26.1997
120	356.8669	1.70E-08	1.92E-03	26.3948	374.9715	1.80E-08	2.17E-03	25.8745	430.8385	2.34E-08	3.55E-03	23.6456
140	545.8594	2.96E-09	5.37E-04	25.0665	635.5703	3.26E-09	7.03E-04	24.5349	875.9174	4.93E-09	1.61E-03	22.3209
160	630.0652	9.65E-10	2.13E-04	23.7884	787.5532	1.18E-09	3.31E-04	23.4225	1,143.5426	2.23E-09	9.90E-04	21.4577
180	667.8662	3.90E-10	9.62E-05	22.5037	877.6729	5.51E-10	1.80E-04	22.4106	1,314.3427	1.28E-09	6.76E-04	20.7706
200	684.91	1.75E-10	4.70E-05	21.25	931.280	2.91E-10	1.05E-04	21.47	1,423.64	8.28E-10	4.86E-05	20.18

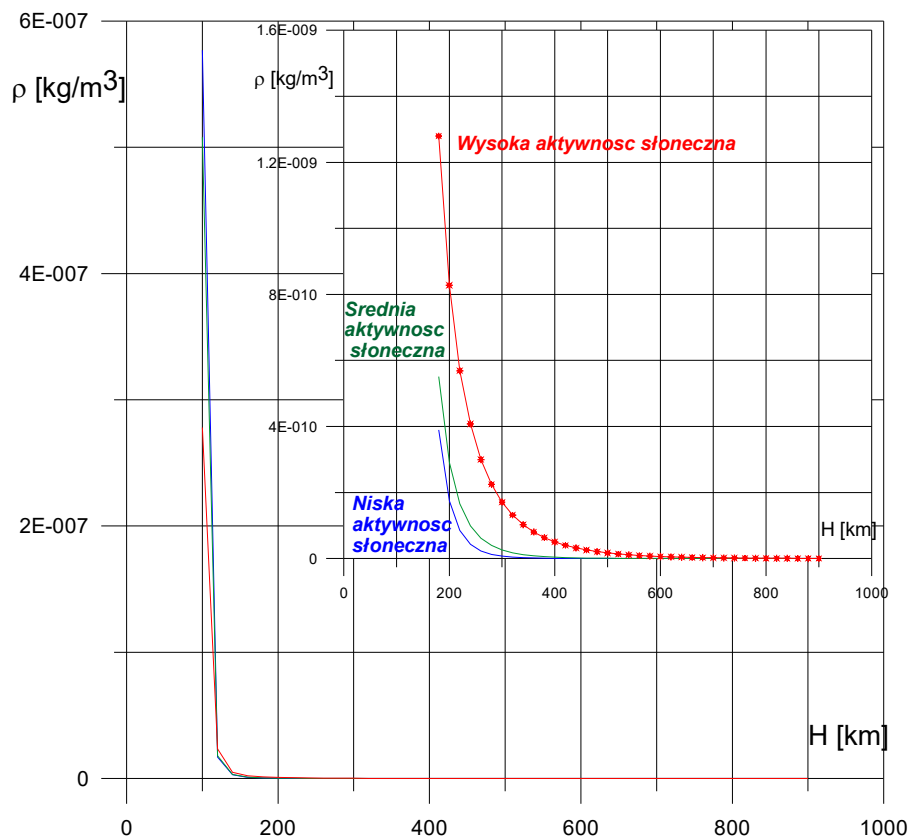
	87	-10	05	16	6	-10	04	34	69	-10	04	36
220	692.64 87	8.47E -11	2.43E- 05	20.09 35	963.270 1	1.66E -10	6.44E- 05	20.61 08	1,493.78 64	5.69E -10	3.60E- 04	19.66 64
240	696.16 97	4.31E -11	1.31E- 05	19.07 89	982.419 1	9.91E -11	4.09E- 05	19.82 92	1,538.91 54	4.08E -10	2.72E- 04	19.20 46
260	697.78 11	2.30E -11	7.31E- 06	18.23 00	993.917 3	6.16E -11	2.66E- 05	19.13 37	1,568.02 94	3.00E -10	2.08E- 04	18.79 01
280	698.52 20	1.27E -11	4.20E- 06	17.54 02	1,000.84 27	3.94E -11	1.77E- 05	18.52 56	1,586.86 13	2.25E -10	1.61E- 04	18.41 78
300	698.86 44	7.22E -12	2.47E- 06	16.98 30	1,005.02 67	2.58E -11	1.20E- 05	18.00 15	1,599.07 43	1.71E -10	1.26E- 04	18.08 39
320	699.02 33	4.21E -12	1.48E- 06	16.52 14	1,007.56 20	1.72E -11	8.20E- 06	17.55 37	1,607.01 54	1.32E -10	9.93E- 05	17.78 52
340	699.09 73	2.50E -12	9.01E- 07	16.11 47	1,009.10 30	1.16E -11	5.69E- 06	17.17 21	1,612.19 20	1.03E -10	7.86E- 05	17.51 86
360	699.13 20	1.51E -12	5.57E- 07	15.72 19	1,010.04 23	7.99E -12	3.98E- 06	16.84 49	1,615.57 51	8.05E -11	6.26E- 05	17.28 12
380	699.14 83	9.20E -13	3.50E- 07	15.30 28	1,010.61 66	5.55E -12	2.81E- 06	16.55 97	1,617.79 16	6.35E -11	5.01E- 05	17.06 99
400	699.15 61	5.68E -13	2.23E- 07	14.81 85	1,010.96 88	3.89E -12	2.01E- 06	16.30 44	1,619.24 76	5.04E -11	4.02E- 05	16.88 18
420	699.15 97	3.54E -13	1.45E- 07	14.23 32	1,011.18 53	2.75E -12	1.44E- 06	16.06 69	1,620.20 62	4.02E -11	3.25E- 05	16.71 42
440	699.16 15	2.23E -13	9.61E- 08	13.51 81	1,011.31 90	1.96E -12	1.04E- 06	15.83 60	1,620.83 90	3.23E -11	2.63E- 05	16.56 43
460	699.16 23	1.42E -13	6.54E- 08	12.65 81	1,011.40 14	1.40E -12	7.55E- 07	15.60 08	1,621.25 77	2.60E -11	2.13E- 05	16.42 97
480	699.16 27	9.20E -14	4.59E- 08	11.65 94	1,011.45 26	1.01E -12	5.53E- 07	15.35 08	1,621.53 54	2.10E -11	1.73E- 05	16.30 79
500	699.16 29	6.03E -14	3.32E- 08	10.55 47	1,011.48 45	7.30E -13	4.07E- 07	15.07 60	1,621.72 00	1.70E -11	1.42E- 05	16.19 67
520	699.16 30	4.03E -14	2.49E- 08	9.400 6	1,011.50 43	5.31E -13	3.03E- 07	14.76 69	1,621.84 30	1.38E -11	1.16E- 05	16.09 40
540	699.16 30	2.75E -14	1.94E- 08	8.265 7	1,011.51 68	3.88E -13	2.27E- 07	14.41 48	1,621.92 53	1.13E -11	9.50E- 06	15.99 80
560	699.16 31	1.93E -14	1.55E- 08	7.214 1	1,011.52 45	2.85E -13	1.71E- 07	14.01 25	1,621.98 03	9.21E -12	7.81E- 06	15.90 67
580	699.16 31	1.39E -14	1.28E- 08	6.290 4	1,011.52 94	2.11E -13	1.31E- 07	13.55 47	1,622.01 72	7.55E -12	6.44E- 06	15.81 87
600	699.16 31	1.03E -14	1.09E- 08	5.514 9	1,011.53 25	1.56E -13	1.01E- 07	13.03 89	1,622.04 21	6.20E -12	5.31E- 06	15.73 21
620	699.16 31	7.90E -15	9.40E- 09	4.886 4	1,011.53 45	1.17E -13	7.89E- 08	12.46 65	1,622.05 88	5.10E -12	4.40E- 06	15.64 57
640	699.16 31	6.24E -15	8.27E- 09	4.389 1	1,011.53 57	8.79E -14	6.24E- 08	11.84 28	1,622.07 02	4.20E -12	3.65E- 06	15.55 78
660	699.16 31	5.06E -15	7.36E- 09	4.001 2	1,011.53 65	6.65E -14	5.01E- 08	11.17 79	1,622.07 78	3.47E -12	3.03E- 06	15.46 72

680	699.16 31	4.21E- 15	6.62E- 09	3.699 9	1,011.53 70	5.08E -14	4.07E- 08	10.48 54	1,622.08 30	2.88E -12	2.52E- 06	15.37 25
700	699.16 31	3.58E- 15	6.00E- 09	3.464 8	1,011.53 74	3.91E -14	3.36E- 08	9.781 8	1,622.08 65	2.38E -12	2.11E- 06	15.27 23
720	699.16 31	3.09E- 15	5.48E- 09	3.278 9	1,011.53 75	3.04E -14	2.82E- 08	9.084 7	1,622.08 90	1.98E -12	1.76E- 06	15.16 53
740	699.16 31	2.70E- 15	5.02E- 09	3.128 9	1,011.53 77	2.39E -14	2.39E- 08	8.411 1	1,622.09 06	1.65E -12	1.48E- 06	15.05 03
760	699.16 31	2.39E- 15	4.63E- 09	3.004 9	1,011.53 77	1.90E -14	2.06E- 08	7.775 3	1,622.09 18	1.37E -12	1.24E- 06	14.92 60
780	699.16 31	2.13E- 15	4.28E- 09	2.899 6	1,011.53 78	1.53E -14	1.79E- 08	7.188 4	1,622.09 25	1.15E -12	1.05E- 06	14.79 12
800	699.16 31	1.91E- 15	3.96E- 09	2.807 5	1,011.53 78	1.25E -14	1.58E- 08	6.657 2	1,622.09 30	9.59E -13	8.84E- 07	14.64 47
820	699.16 31	1.73E- 15	3.68E- 09	2.724 9	1,011.53 78	1.03E -14	1.40E- 08	6.184 9	1,622.09 34	8.04E -13	7.48E- 07	14.48 54
840	699.16 31	1.56E- 15	3.43E- 09	2.649 2	1,011.53 79	8.64E -15	1.26E- 08	5.771 1	1,622.09 36	6.74E -13	6.36E- 07	14.31 23
860	699.16 31	1.42E- 15	3.21E- 09	2.578 4	1,011.53 79	7.32E -15	1.14E- 08	5.413 2	1,622.09 39	5.67E -13	5.42E- 07	14.12 44
880	699.16 31	1.30E- 15	3.00E- 09	2.511 3	1,011.53 79	6.28E -15	1.04E- 08	5.106 6	1,622.09 40	4.77E -13	4.63E- 07	13.92 10
900	699.16 31	1.18E- 15	2.81E- 09	2.447 0	1,011.53 79	5.46E -15	9.47E- 09	4.846 0	1,622.09 40	4.03E -13	3.97E- 07	13.70 15

Jak widać z danych prezentowanych w tabeli temperatura praktycznie nie zależy od aktywności Słonecznej do wysokości ok. 75...80 km. Powyżej pojawiają się istotne różnice pomiędzy niską, średnią a wysoką aktywnością naszej Gwiazdy Diennej. Wpływ tej jest drastyczny, przy wysokościach powyżej 100 km. I tak między minimum a maksimum aktywności słonecznej wzrost w temperatury w termosferze jest ponad dwukrotny! Chodzi tu o temperaturę, jako miarę energii kinetycznej molekuł gazu na tej wysokości. (Przy tak niskich ciśnieniach, woda natychmiast przeszłaby do stanu gazowego)



Rys. 3.xxx. Temperatura w funkcji wysokości i aktywności słonecznej



Rys. 3.xxx. Gęstość atmosfery ziemskiej w funkcji wysokości

W pewnych zakresach, wysokości i do obliczeń wstępnych wygodnie jest się posługiwać modelem izotermiczny atmosfery w którym gęstość wyrażona zostaje wyrażeniem:

$$\rho = \rho_0 \exp(-H/H_0)$$

(3.9)

Atmosferyczna skala wysokości i gęstość do 35,786 km			
H [km]	H ₀ [km]	ρ [kg/m ³]	
		średnia	maksymalna
0	8.4	1.225	1.225
100	5.9	5.25E-7	5.75E-7
150	25.5	1.73E-9	1.99E-9
200	37.5	2.41E-10	3.65E-10
250	44.8	5.97E-11	1.20E-10
300	50.3	1.87E-11	4.84E-11
350	54.8	6.66E-12	2.18E-11
400	58.2	2.62E-12	1.05E-11
450	61.3	1.09E-12	5.35E-12
500	64.5	4.76E-13	2.82E-12
550	68.7	2.14E-13	1.53E-12
600	74.8	9.89E-14	8.46E-13
650	84.4	4.73E-14	4.77E-13
700	99.3	2.36E-14	2.73E-13
750	121	1.24E-14	1.59E-13
800	151	6.95E-15	9.41E-14
850	188	4.22E-15	5.67E-14
900	226	2.78E-15	3.49E-14
950	263	1.98E-15	2.21E-14
1,000	296	1.49E-15	1.43E-14
1,250	408	5.70E-16	2.82E-15
1,500	516	2.79E-16	1.16E-15
2,000	829	9.09E-17	3.80E-16
2,500	1220	4.23E-17	1.54E-16
3,000	1590	2.54E-17	7.09E-17
3,500	1900	1.77E-17	3.67E-17
4,000	2180	1.34E-17	2.11E-17
4,500	2430	1.06E-17	1.34E-17
5,000	2690	8.62E-18	9.30E-18
6,000	3200	6.09E-18	5.41E-18
7,000	3750	4.56E-18	3.74E-18
8,000	4340	3.56E-18	2.87E-18
9,000	4970	2.87E-18	2.34E-18
10,000	5630	2.37E-18	1.98E-18
15,000	9600	1.21E-18	1.16E-18
20,000	14600	7.92E-19	8.42E-19
25,000	20700	5.95E-19	6.81E-19
30,000	27800	4.83E-19	5.84E-19
35,000	36000	4.13E-19	5.21E-19
35,786	37300	4.04E-19	5.12E-1

Jonosfera ziemską rozciąga się od ok. 80 km do 1000 km nad powierzchnią Ziemi. Jonosferę tworzą zjonizowane atomy i cząsteczki gazu oraz swobodne elektrony powstałe na skutek oddziaływania promieniowania UV i X Słońca na bardzo rozrzedzone gazy atmosferyczne. W jonosferze Ziemi wyróżniamy kilka obszarów oznaczanych literami. Kolejno: C, D, E₁, E₂, F₁, F₂, A, G.

Najsłabiej zjonizowane są warstwy C i D. Warstwa C należy do troposfery: 8...13 km, zaś D do stratosfery i mezosfery: 55...90 km. Warstwy E₁ i E₂ oraz F₁ i F₂ są rozdzielone za dnia, nocą zaś tworzą pojedyncze warstwy E i F. Warstwa D jest słabo zjonizowana. Warstwa ta powstaje na skutek fotojonizacji tlenu i azotu, NO przez promieniowanie UV o długości fali 121,5 nm. W okresach zwiększonej aktywności słonecznej, czyli w czasie, gdy w obszarach plam słonecznych o złożonej strukturze pola magnetycznego rejestruje się rozbłyski powodujące burze słoneczne, twarde promienie rentgenowskie (fale o długości poniżej 1 nm) jonizują N₂ i O₂ na wysokości tej warstwy, powodując lokalne zaburzenia pola magnetycznego. Po zachodzie słońca na skutek rekombinacji jonów i swobodnych elektronów, warstwa ta niemal zanika i istnieje tylko dzięki działaniu galaktycznego promieniowania kosmicznego. Warstwa ta powoduje silne tłumienie fal radiowych (z maksimum przy ok. 1 MHz) i odbija jedynie fale długie. Jest głównie odpowiedzialna za absorpcję fal krótkich, szczególnie poniżej 10 MHz, z coraz mniejszym pochłanianiem przy wzroście częstotliwości.

Warstwa E: jonizację miękkie promieniowanie X (1–10 nm) i daleki UV promieniowania słonecznego. Jonizacji ulegają cząsteczki tlenu. Warstwa ta odbija jedynie fale radiowe o częstotliwościach mniejszych niż około 1 MHz. Warstwa E istnieje niezależnie od pory dnia.

Ponieważ warstwa D jest słabo zjonizowana, przyjmuje się, że jonosfera zaczyna się od warstwy E: 105...120 km, która jest słabiej zjonizowana niż warstwa F: 150...170 km. Najsilniej zjonizowana warstwa F₂ rozciąga się na wysokościach 250...275 km. W warstwie tej promieniowanie ultrafioletowe Słońca z zakresu 10–100 nm jonizuje tlen atomowy O. Warstwa F ma duże znaczenie w propagacji fal radiowych i umożliwia długozasięgową łączność krótkofalową na odległość tysięcy kilometrów. Warstwa F nie zanika nocą.

Warstwa G – położoną powyżej warstwy F₂, na wysokościach 700...800 km i ma marginalny wpływ na rozchodzenie się fal radiowych.

3.2. Magnetosfera ziemską

3.3. Pasy promieniowania korpuskularnego wokół Ziemi

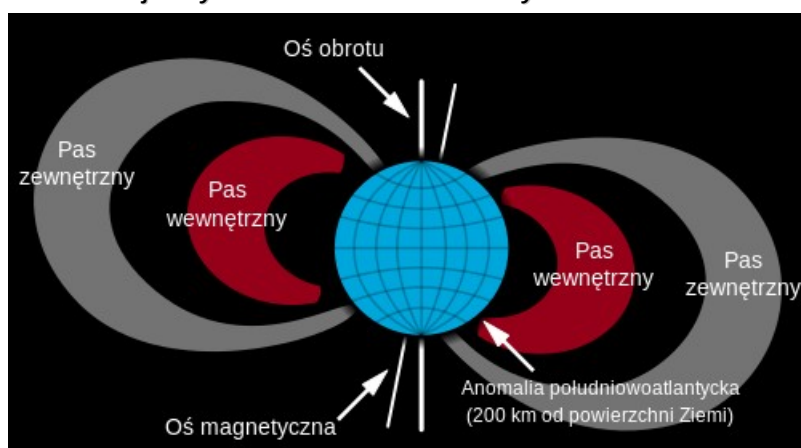
Pole magnetyczne Ziemi ma charakter dipolowy i stanowi pułapkę dla cząstek elektrycznie naładowanych. W otoczeniu północnego i południowego bieguna magnetycznego gęstość linii pola jest wyraźnie większa niż w okolicach równika. Cząstki naładowane, głównie protony i elektrony, a także inne jony (w mniejszej ilości) poruszają się w takiej pułapce po liniach śrubowych o malejącym promieniu. W pewnych warunkach cząstki te odbijają się od zgęszczenia linii pola magnetycznego w otoczeniu ziemskich biegunów magnetycznych. Obszary takie nazywamy zwierciadłami magnetycznymi. Efekt ten jest też wykorzystywany do pułapkowania plazmy w warunkach laboratoryjnych. To, czy cząstka zostanie wychwycona do pułapki magnetycznej nie zależy od jej masy, ładunku elektrycznego, czy całkowitej energii cząstki. Dzięki temu pułapka taka może zatrzymywać różne cząstki naładowane, niezależnie od ich energii czy znaku.

ładunku. Częstka wędruje między zwierciadłami magnetycznymi, dopóty, dopóki zmiana konfiguracji pola magnetycznego (np. na skutek burzy magnetycznej) lub zderzenia z inną częstką nie wytrąci jej z bieżącej trajektorii.

Orbity protonów i elektronów są orbitami południkowymi (w stosunku do położenia biegunów magnetycznych), które są zwężającymi się liniami śrubowymi, biegnącymi od równika geomagnetycznego na północ i południe. Częstki oscylują zatem pomiędzy znajdującymi się nad obszarami okołobiegunowymi zwierciadłami magnetycznymi.

Wyróżniamy dwa naturalne pasy radiacyjne, zewnętrzny i wewnętrzny nazywane od odkrywców **pasami van Allena-Wiernowa**.

Wewnętrzny pas radiacyjny tworzą głównie protony o wysokiej koncentracji i energii rzędu 30...800 MeV. Rozciąga się on od wysokości 500 km nad powierzchnią Ziemi na półkuli zachodniej i od ok. 1500 km na półkuli wschodniej. Ta asymetria wywołana jest przesunięciem środka dipola magnetycznego Ziemi i od jej środka geometrycznego o ok. 500 km. Poza tym wykazują symetrie względem płaszczyzny równika magnetycznego. Maksimum natężenia protonów jest na wysokościach 2600...2900 km licząc od środka Ziemi. Umowna górna granica, zajmuje się na wysokości ok. 10 000 km. Najbardziej energetyczne protony poruszają się w odległości od środka Ziemi równej 1,15...2,5 promienia naszej planety. Protony o mniejszych energiach poruszają się w odległościach 8...12 promienia Ziemi, czyli sięgają granic magnetosfery ziemskiej. Burze magnetyczne oraz maksima jedenastoletniego cyklu aktywności słonecznej powodują, że część tych protonów zostaje wymieciona do atmosfery.



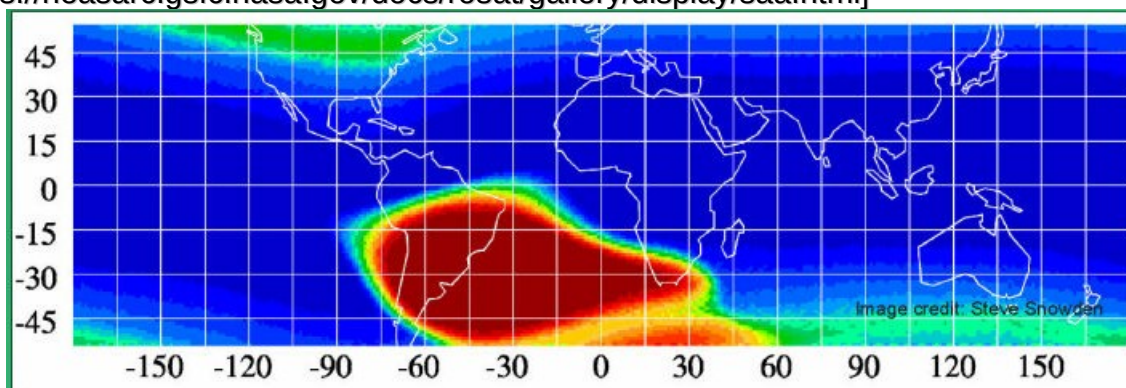
Rys. 3.xx. Pasy van Allena-Wiernowa. Schemat.

Zewnętrzny pas van Allena tworzą głównie elektrony o energiach rzędu 30...100 eV, zewnętrzna zaś granicę tego pasma obsadzają wysokoenergetyczne elektrony o energiach większych od 500 keV. Elektrony o energii z zakresu 500 keV...4MeV gromadzą się na promieniach 1,03...3,5 promienia Ziemi, zaś maksimum koncentracji i elektronów to odległości rzędu 3,5...5 promienia Ziemi. Burze magnetyczne przesuwają granicę tego pasa stronę Ziemi. Pasma to stanowi największe zagrożenie dla astronautów i aparatury elektronicznej statków kosmicznych, poprzez generowanie promieniowania rentgenowskiego na skutek hamowania elektronów uderzających w powłokę statku.

W wewnętrznej części pasów van Allena-Wiernowa płynie tzw. prąd pierścieniowy - ruch naładowanych elektrycznie cząstek, który może być interpretowany jako prąd płynący dookoła Ziemi, głównie w płaszczyźnie równika magnetycznego, a rozmywający się w miarę zbliżania do biegunów

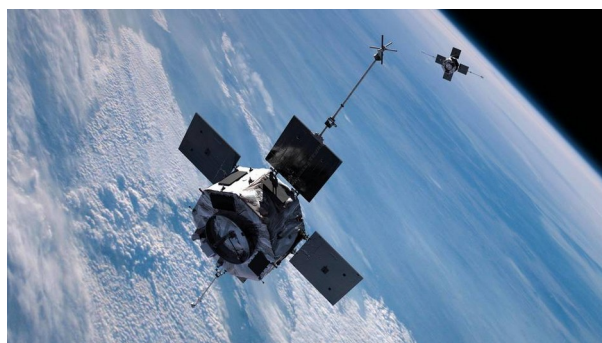
Wewnętrzny pas znajduje sięga najbliższej powierzchni Ziemi w pobliżu wybrzeża Brazylii, jest to tzw. Anomalia Południowego Atlantyku (SAA). Na wysokości 500 km anomalia rozciąga się na obszarze od równika do 50°S i od 90°W do 40°E. Ze wzrostem wysokości obszar ten się zwiększa. SAA przesuwa się na zachód, z prędkością ok. 0,3° w ciągu roku. Współgra to z wynikami badań, które wskazują, że wewnętrzne jądro Ziemi obraca się szybciej niż reszta planety, o około 0,3–0,5° rocznie.

[<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/display/saa.html>]



Rys. 3.xxx. Anomalia Południowego Pacyfiku. Źródło NASA

Pasy radiacyjne wykrył J.A. van Allen na podstawie pomiarów uzyskanych za pomocą licznika Geigera-Müllera zainstalowanego na pokładzie satelity Explorer-1. Od 2012 roku dwa satelity NASA badają pasy radiacyjne w ramach misji van Allen Probes. Satelity te nurkują w pasy radiacyjne średnio 5 razy dziennie, pokonując trasę na bardzo eliptycznej orbicie. Celem misji jest zrozumienie procesu, który dodaje lub zabiera elektrony z tego obszaru [1].



Rys. 3.xxx. Satelita Explorer 1 .
Źródło[<https://www.nasa.gov/mission>

Rys. Sondy Van Allen Probes na orbicie.
Wizja artystyczna.

_pages/explorer/explorer-overview.html]	[https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/mission/index.html]
---	---