

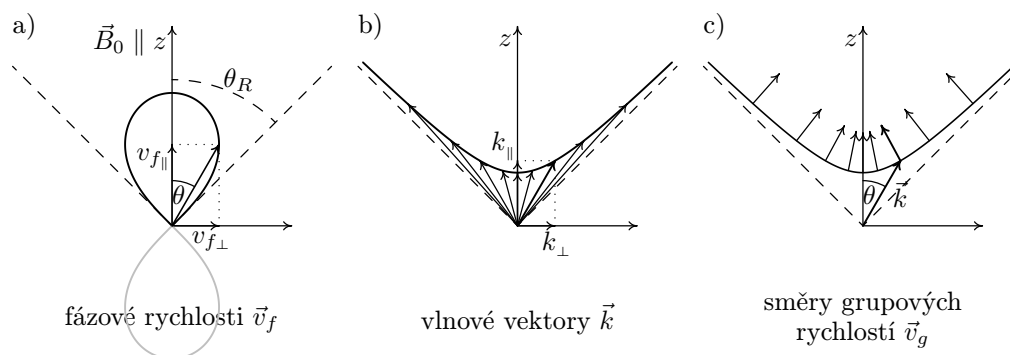
## 9 Hvizdový mód

V úvodu textu jsme se o hvizdech zmínili, v této kapitole si je vysvětlíme a některé typy si ukážeme na naměřených datech. Hvizdový mód se týká elektromagnetických vln s velmi nízkými frekvencemi. V CMA-diagramu na obrázku 83 jde ve velké většině případů o oblast se stojící osmičkou charakterizující R-mód (vpravo od zelené a nahoře od bledě modré hranice).

### 9.1 Fázová a grupová rychlost vln hvizdového módu

Zvolme si vlnu o jedné konkrétní úhlové frekvenci  $\omega$ , která spadá do hvizdového módu. Křivka na obrázku 85a ukazuje, jakými fázovými rychlostmi se tato vlna bude šířit v různých směrech. Jde o osmičku, ovšem v tomto případě je křivka přesná, už to není jen schematický obrázek. Na osách najdeme složky fázové rychlosti naší vlny ( $v_{f\parallel}$  do směru rovnoběžného s  $\vec{B}_0$  a  $v_{f\perp}$  do směru kolmého), když ji vyšleme pod úhlem  $\theta$  vůči magnetickému poli  $\vec{B}_0$ .

Z osmičky si pomocí vztahu (32)  $|\vec{k}| = \frac{\omega}{|\vec{v}_f|}$  vytvoříme graf, který popisuje závislost velikosti vlnového vektoru  $|\vec{k}|$  na směru šíření vlny. Úhlová frekvence ve vztahu (32) je konstanta, kterou jsme si zvolili na počátku. Vztah mezi  $|\vec{v}_f|$  a  $|\vec{k}|$  je nepřímo úměrný (tam, kde je vektor  $\vec{v}_f$  dlouhý, je  $\vec{k}$  krátký, a naopak).

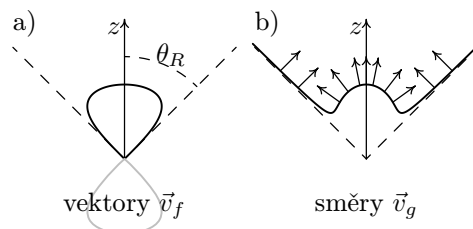


obr. 85: Grafy potřebné k určení směru grupové rychlosti hvizdového módu

Přesný graf velikostí  $\vec{k}$  připadající různým směrům vidíme na obrázku 85b. Ve směru rovnoběžném s  $\vec{B}_0$  odpovídá naší vlně krátký vektor  $\vec{k}$ , protože v osmičce, při  $\theta = 0$ , je velikost  $\vec{v}_f$  velká. Odkláníme-li se od  $\vec{B}_0$ , vektor fázové rychlosti  $\vec{v}_f$  se zkracuje, a tudíž vektor  $\vec{k}$  ve vedlejším grafu postupně prodlužuje. V těsné blízkosti rezonančního úhlu je  $\vec{v}_f$  téměř nulová, délka vlnového vektoru  $\vec{k}$  se zde blíží k nekonečným hodnotám. Pod úhly většími než je rezonanční úhel se námi vybraná vlna šířit nemůže. Na osách grafu najdeme příslušné složky vlnového vektoru  $k_{\parallel}$  a  $k_{\perp}$ .

Nyní si připomeňme závěr kapitoly 4.12: máme-li graf popisující délku vlnového vektoru  $\vec{k}$  v závislosti na směru šíření (pro fixní  $\omega$ ), pak příslušný vektor grupové rychlosti směřuje kolmo ke křivce grafu, obr. 37b. Grupové rychlosti odpovídající různým úhlům  $\theta$  tak vytvoří na křivce „chlupy“. Jejich délky řešit nebudeme. Směry grupových rychlostí vytvoříme na křivce 85b, výsledek je na 85c.

Na obrázku 85 vidíme, že pro malé úhly  $\theta$  vektor grupové rychlosti  $\vec{v}_g$  směřuje téměř podél magnetického pole  $\vec{B}_0$ . Informace o vlně jde s  $\vec{B}_0$ . Pro úhly z blízkosti rezonančního úhlu, se vektor grupové rychlosti  $\vec{v}_g$  od magnetického pole znatelně odklání, informace o vlně se šíří šikmo vůči  $\vec{B}_0$ .



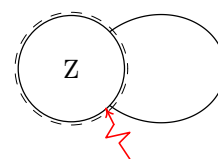
obr. 86: Nízké  $f$  hvizdového módu

Zaměřili jsme se na jednu frekvenci z pásma odpovídající hvizdovému módu. Kdybychom zvolili frekvenci nižší, její osmička by byla shora a zespodu spláclá (obr. 86a). Graf velikostí vlnových vektorů by potom měl uprostřed „bouli“, jakou vidíme na obrázku 86b. I pro takový tvar grafu ovšem platí text z předchozího odstavce.

## 9.2 Hvizdy

V jižní Africe udeří blesk. Obrovské napětí mezi záporně nabitým mrakem a neutrálním povrchem Země prorazí vrstvu vzduchu – velké množství elektronů se během krátkého času přesune z mraku do Země, mezi mrakem a Zemí tak na okamžik teče velký elektrický proud. Tento proud a prudký pokles napětí mezi mrakem a Zemí způsobí vznik elektromagnetických vln. Při změně elektrického pole vzniká pole magnetické a měnící se elektrické pole spolu s měnícím se magnetickým vytváří elektromagnetickou vlnu. V okamžiku úderu blesku je tedy do všech směrů vyslána řada elektromagnetických vln s různými frekvencemi.

Zaměříme se na vlny šířící se přímo pryč od Země. Ty prochází vrstvami atmosféry, ionosférou do plazmatického prostředí, kde je jejich chování ovlivňováno volnými nabitými částicemi a také magnetickým polem Země. Budeme uvažovat pouze vlny hvizdového módu (R-módu) s frekvencemi v řádu kHz<sup>15</sup>. Do plazmatického prostředí se dostanou jen pravotočivé části vln, ostatní se od plazmatu odrazí zpět k zemskému povrchu, kde jsou postupně absorbovány.

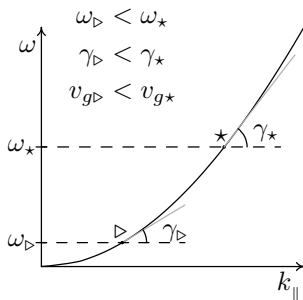


obr. 87: Bouřka a magnetická indukční čára

Pravotočivé vlny stoupající od Země postupují podél magnetické indukční čáry zakreslené na obrázku 87 (čárkovaně je zakreslena iono-

<sup>15</sup>Proč nebereme v úvahu také vyšší frekvence (třeba viditelné světlo) se dozvíme dále.

sféra, blesk je přibližně  $10\,000\times$  zvětšený). Vektory fázových i grupových rychlostí jsou téměř rovnoběžné s  $\vec{B}_0$  (malé úhly  $\theta$  na obrázcích 85c a 85b). I když se čára začne více stáčet, vlny jí budou stále následovat – ve směru magnetického pole si můžeme představit jakési „trubičky“ s odlišnou hustotou oproti okolnímu prostředí. Vlny jsou drženy v těchto trubičkách, které je přivedou zpět k Zemi do střední Evropy.

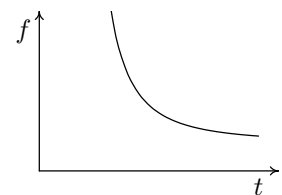


obr. 88: Závislost  $\omega$  na  $k_{||}$  pro nízké frekvence

V Evropě mohou být elektromagnetické vlny zachyceny dlouhou anténou a reproduktorem převedeny na zvuk. Vlny na anténě vytváří střídavé elektrické napětí, které kmitá se stejnou frekvencí, jakou má vlna. Na střídavé napětí reaguje reproduktor tím, že rozhýbe membránu (opět se stejnou frekvencí). Membrána naráží do molekul vzduchu, které se v prostoru zhušťují a zředňují a vytváří podélné vlnění (část 2.6, obr. 11). Změny v hustotě vzduchu rozkmitají bubínky našeho ucha a my je slyšíme – lidské ucho dokáže vnímat frekvence od 20 Hz do 20 kHz.

Na cestě plazmatem podél magnetického pole Země se různé elektromagnetické vlny šíří různými rychlostmi. Na obrázku 88 vidíme, jak závisí úhlová frekvence vlny  $\omega$  na vlnovém čísle  $k_{||}$  pro frekvence v řádu kHz. Z tohoto grafu vyčteme grupovou rychlost podél magnetického pole –  $\vec{v}_g$  je téměř rovnoběžná s  $\vec{B}_0$ , její ostatní složky jsou malinké a nemusíme je uvažovat. Velikost grupové rychlosti je pro vlnu s úhlovou frekvencí  $\omega$  definovaná jako sklon křivky grafu ve výšce  $\omega$  (vztah (34)  $v_{g||} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k_{||}}$ ). Vidíme, že čím větší úhlová frekvence (čím jsme v grafu výš), tím křivka více stoupá a tudíž roste grupová rychlost vlny. Jinými slovy, vyšší frekvence mají větší rychlost a z Afriky do Evropy dorazí dříve než frekvence nízké.

Signál, který je složený z řady vln a který vznikl úderem blesku v jediném okamžiku, se během cesty podél čáry magnetické indukce v čase roztáhne – vznikne **hvizd** (angl. whistler). Doba mezi příchodem rychlých a pomalých vln z jediného blesku je přibližně 1 s. Graf hvizdu vidíme na obrázku 89. Na vodorovné ose je čas a na svislé frekvence. Nejdříve uslyšíme vysoké tóny, s postupem času stále nižší a nižší až zvuk zanikne.



obr. 89: Hvizd

### Vyšší frekvence

Blesk je zdrojem také elektromagnetických vln s daleko vyššími frekvencemi, nejen v řádu kHz. Mimo jiné vln z oblasti viditelného světla – blesk vidíme. I kdybychom ale takové vlny „chytili“ podobně jako hvizdové, nic bychom z reproduktoru nesly-

šeli, jejich frekvence by byla pro naše uši příliš vysoká. Viditelnému světlu přísluší frekvence v řádu  $10^{11}$  kHz, naše ucho zvládne maximálně 20 kHz.

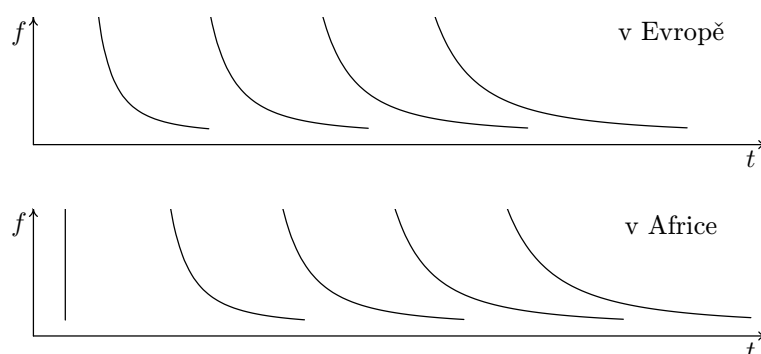
### Více hvizdů

Občas se hvizdy nevyskytují samostatně, ale ve skupinách řazeny za sebe, jak ukazují grafy na obrázku 88 (všechny hvizdy na obrázku vytvořil jeden blesk). První křivka na grafu v *Evropě* odpovídá hvizdu, jaký jsme si popsali výše, zbylé si vysvětlíme nyní.

Blíží-li se elektromagnetické vlny podél magnetické indukční čáry k severní polokouli Země, část energie vln se odrazí od vrchní vrstvy ionosféry (na obrázku 87 čárkovaně) a vrací se podél siločáry zpět nad jižní Afriku. Tam se také odrazí. Když se vlny napodruhé dostanou nad Evropu, pronikají do ionosféry a se zpožděním dvou cest za prvním hvizdem jsou zde zaznamenány jako druhý hvizd.

Druhý hvizd trvá déle než první. Místo jedné cesty po siločáře měly rychlejší vlny tři cesty na to, aby si vytvořili větší náskok před vlnami pomalými. Hvizd je tedy více natažený, slyšíme ho déle.

Vícenásobnými odrazy od ionosféry vznikají také další hvizdy (třetí, čtvrtý... ). Jejich intenzita postupně klesá, až ji naše přístroje nedokážou zaznamenat. Každý hvizd je vždy delší než hvizd předcházející.



obr. 90: Hvizdy z jednoho jihoafrického blesku naměřené ve střední Evropě a v jižní Africe

Díky odrazům od vnější vrstvy ionosféry se hvizdy objevují také v blízkosti bouřky (i několik set kilometrů od místa úderu blesku). Graf hvizdů naměřených na stejné polokouli, kde je bouřka, vidíme na obrázku 90 v *Africe*.

Nejdříve uslyšíme ránu, všechny frekvence v jediném čase (na obrázku svislá čára). Ránu vytvoří vlny, které se k nám dostanou vzduchem podél zemského povrchu. Takové vlny se v čase neroztáhnou, protože se všechny šíří izotropním prostředím pod ionosférou stejnou grupovou rychlostí.

Po ráně uslyšíme hvizd, který vznikl dvěma cestami podél magnetického pole, nad Evropu a zpět. Další hvizd je delší než předcházející. Vlny, které ho tvoří, prošly magnetickou indukční čarou čtyřikrát – ty rychlé více utekly vlnám pomalým.

### Výskyt hvizdů

Z předchozího je jasné, že na Zemi můžeme hvizdy naměřit v blízkosti bouřky nebo v místě s ním spojeném magnetickou indukční čarou. Výskyt hvizdů je proměnlivý, tak jako je proměnlivý výskyt bouřek. Noční doba je pro hvizdy vhodnější, neboť ionosféra v noci vlny méně absorbuje.

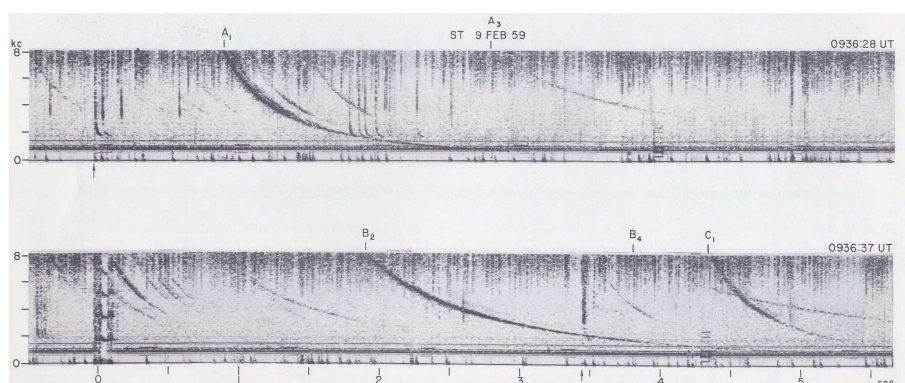
Hvizdy nejlépe naměříme na středních zeměpisných šířkách. V oblasti rovníku nejsou vůbec, protože zde chybí vstupující nebo vystupující magnetické indukční čáry (obr. 84). Na vysokých šířkách se hvizdy mohou objevit jen velmi slabé – magnetické indukční čáry spojující příslušná místa jsou příliš dlouhé.

## 9.3 Hvizdy naměřené na Zemi

V této kapitole si ukážeme různé typy hvizdů naměřené na Zemi koncem 50. let 20. století. Novější data hvizdů pochází převážně z družic. Ve všech grafech hvizdů (nejen v této kapitole) je na vodorovné ose čas (tentokrát v sekundách) a na svislou osu nanášíme frekvenci vlny v kHz; stará anglická zkratka kc značí kilocycles, kc = kHz.

### Více hvizdů z jednoho blesku

Data z horního grafu na obrázku 91 byly naměřeny ve Stanfordu v Kalifornii v roce 1959, spodní graf je z téže doby z místa v Tichém oceánu, které je se Stanfordinem spojeno čarou magnetické indukce. Hvizdy označené písmeny *A* a *B* vznikly z jediného blesku bouřky v Tichém oceánu na jižní polokouli.

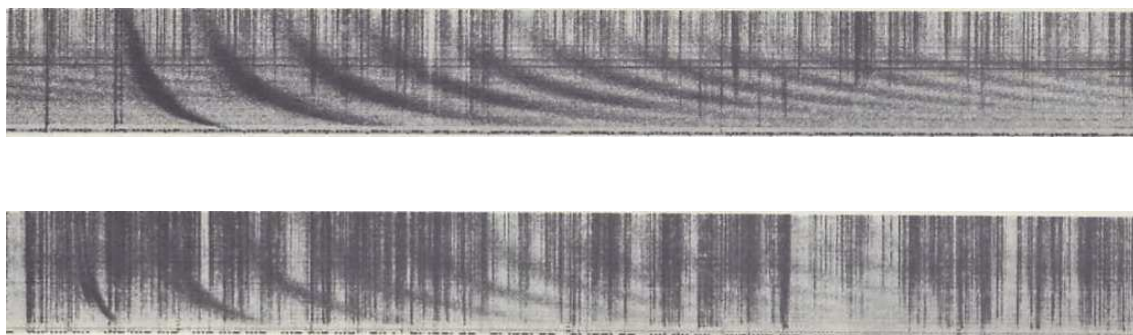


obr. 91: Hvizdy  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $B_2$  a  $B_4$  vznikly z jediného blesku; převzato z [2]

Křivka označená  $A_1$  odpovídá prvnímu hvizdu, který z blesku do Kalifornie přišel. Slabý a také delší hvizd  $A_3$  prošel čáru magnetické indukce celkem třikrát (z jižní polokoule nad Kalifornií, zpět nad Tichý oceán a ještě do Kalifornie).

Na spodní části křivka  $B_2$  přísluší „dvojcestnému“ hvizdu (nad Stanford a zpět na jižní polokouli) a slabounký  $B_4$  odpovídá čtyřem cestám podél čáry magnetické indukce. Hvizdy jsou dlouhé v řádu sekund, například  $B_2$  hvízdal přibližně 2 s.

Hvizd označený  $C_1$  naměřený v Tichém oceánu je obyčejný jednocestný hvizd z bouřky v Americe na severní polokouli. Onehdy se tedy blýskalo na obou místech.

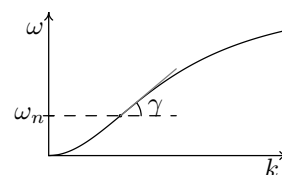


obr. 92: Více hvizdů z jednoho blesku; převzato z [2]

Na horním obrázku 92 vidíme hvizdy z jediného blesku naměřené v blízkosti bouřky na Novém Zélandu v roce 1958 (sudé počty cest podél čáry magnetické indukce). Liché hvizdy z téhož blesku byly naměřeny v Seattlu, spodní část obrázku 92. Tmavé svislé čáry odpovídají řadě blesků, jejichž signály se neroztáhly, protože se nešířily anizotropním plazmatickým prostředím kolem Země, ale pouze izotropním vzduchem pod ionosférou. Délka záznamů odpovídá přibližně třiceti sekundám.

### „Nosové“ hvizdy

V kapitole 9.2 o vzniku hvizdu jsme si řekli, že když se šíří vlny o nízkých frekvencích podél čáry magnetické indukce na opačnou polokouli Země, tak čím vyšší frekvence vlny, tím rychleji cestu proběhnou. Toto ovšem platí jen do jisté míry. Překročíme-li s frekvencí vlny jistou mez, grupová rychlost už s rostoucí frekvencí neporoste, naopak začne klesat. Sklon křivky v grafu 93 odpovídá složce grupové rychlosti ve směru  $\vec{B}_0$ . Vidíme, že nejdříve sklon roste (až k hodnotě  $\omega_n$ ) a potom začne klesat<sup>16</sup>. Frekvence  $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ , se v angličtině nazývá **nose frequency**. Této

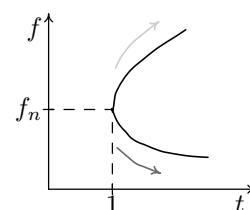


obr. 93: Disp. relace

<sup>16</sup>Graf 88 z kapitoly 9.2 je výřezem grafu 93. Grafy mají na osách různá měřítka.

frekvenci (resp. úhlové frekvenci) odpovídá největší sklon v celém grafu (největší  $\gamma$ ), a tak vlna s  $f_n$  projde cestu nejrychleji.

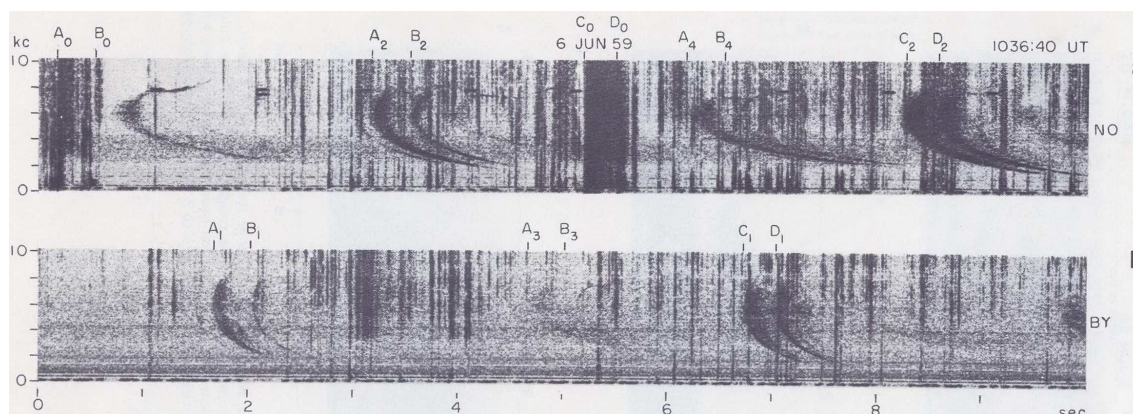
Na obrázku 94 vidíme jeden „nosový“ hvizd. Na vodorovné ose je ubíhající čas a na svislé jsou frekvence naměřených elektromagnetických vln. V čase 1 s jsme zaznamenaly nejrychlejší nosovou frekvenci  $f_n$ , v průběhu času k nám postupně docházejí jak nižší a nižší frekvence (spodní část hvizdu označená tmavou šipkou), tak i vyšší a vyšší (horní část hvizdu s světlou šikou). Tvar grafu připomíná profil nosu, nejrychlejší frekvence  $f_n$  je pak na jeho špičce.



obr. 94: Nosový hvizd

Nosová frekvence závisí na prostředí, kterým se vlny šířily – na magnetickém poli Země a hustotě plazmatu kolem ní. Měření nosové frekvence je jednou z metod, jak ze Země určit hustotu plazmatu (počet nabitých částic v daném objemu), když známe magnetické pole.

Na obrázku 95 jsou nosové hvizdy naměřené v roce 1959 v Norwichi ve Vermontu a na stanici v Antarktidě. Horní obrázek je z Norwiche, kde byla bouřka a udeřily zde čtyři blesky *A*, *B*, *C* a *D*. Svislé čáry označené indexy 0, odpovídají naměření všech frekvencí naráz (vlny prošly pouze izotropním vzduchem všechny stejně rychle).

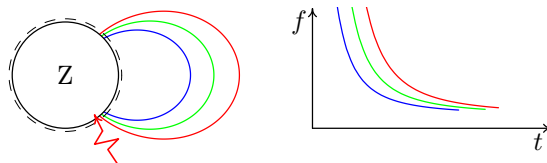


obr. 95: Naměřené hvizdy tvaru nosu, každé písmeno patří jednomu blesku; převzato z [2]

Na spodním obrázku najdeme  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  a  $D_1$ , které popisují jednocestné hvizdy z Vermontu na jižní polokouli podél čáry magnetické indukce. Hvizdy s indexy 2 na horním obrázku odpovídají dvoucestným hvizdům ze severní polokoule na jižní a zpět. Další hvizdy jsou značeny analogicky indexy 3 a 4. Všechny hvizdy na obrázku 95 mají tvar nosu. Nosovou frekvenci odečteme z grafu, je přibližně rovna 6 kHz (6 kc).

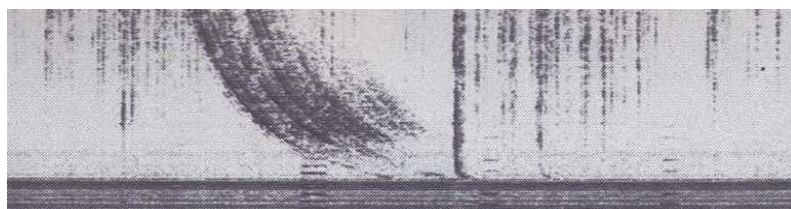
## Jeden hvizd různými cestami

Elektromagnetické vlny z jednoho blesku se na opačnou polokouli mohou dostat různými cestami. Všechny vlny se nemusí indukční čáry „chytit“ přímo nad úderem blesku, některé se mohou vzduchem dostat kousek od místa bouřky a teprve tam projít ionosférou a šířit se dál podél  $\vec{B}_0$ .



obr. 96: Různé trasy a příslušné hvizdy

Na obrázku 96 jsou namalované tři různé trasy plazmatickým prostředím. Nejkratší a tudíž nejrychlejší je modrá trasa, o něco delší je zelená a nejdelší červená. Hned vedle vidíme záznam hvizdů, jaký bychom naměřili na severní polokouli.



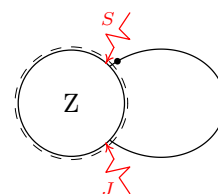
obr. 97: Jednocestné hvizdy z blesku, které přišly podél různých čar magn. indukce; převzato z [2]

Hvizdy z obrázku 97 byly naměřeny na Aljašce v roce 1958. První, trošku silnější křivka odpovídá vlnám, které prošly z jižní polokoule skrz plazma nejkratší cestou. Další, postupně slabší křivky, odpovídají cestám podél delších a delších čar magnetické indukce. Všechny jsou „jednocestné“.

## 9.4 Hvizdy z družic

Ukážeme si hvizdy naměřené v roce 1972 sovětskou družicí Interkosmos 5 a jeden graf z české družice Magion 5 z roku 1999. Stará data z Interkosmu byla do grafů, které uvidíme, zpracována až v devadesátých letech (v době dostatečně výkonných počítačů a potřebných programů). Také si popíšeme jeden typ hvizdu, který na Zemi nelze naměřit.

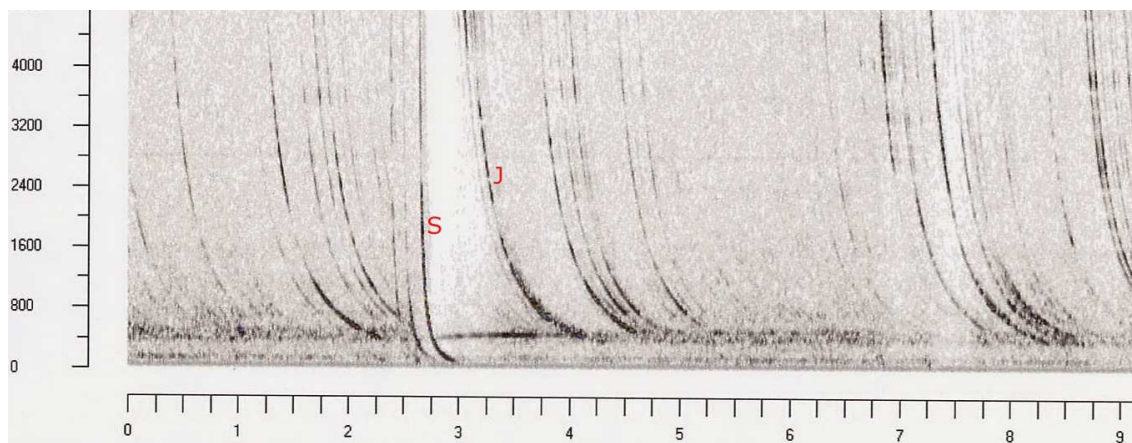
Družice Interkosmos 5 měřila přibližně ve výšce 1000 km nad severní polokoulí na zeměpisných šířkách kolem  $45^\circ$  (družice je tečka na obrázku 98). Naměřená data jsou zpracována do grafů, jako v předchozí části – na vodorovné ose je čas v sekundách, na svislé frekvence v hertzech a čím tmavší šedá, tím intenzivnější vlny.



obr. 98: Interkosmos 5



Na záznamu 99 vidíme jeden silný, velice krátký hvizd (označený *S*), ve kterém se roztáhly jen frekvence nižší než 400 Hz. Tento hvizd vznikl z blesku na severní polokouli v blízkosti družice, obr. 98. Vlny prošly anizotropní ionosférou a hned narazily na družici, která je zaznamenala – na roztažení měly málo času. Delší hvizdy z obrázku (*J* i další) dorazily ke družici z blesků na jižní polokouli. Za ionosférou



obr. 99: Více a méně natažený hvizd z družice Interkosmos 5

prošly téměř celou čáru magnetické indukce, a tak se roztáhly daleko víc. Kdyby družice měřila na magnetické indukční čáře nad rovníkem, cesty z obou polokoulí by byly stejně dlouhé a pak i hvizdy ze severu a jihu by byly stejně natažené.

### Iontové hvizdy

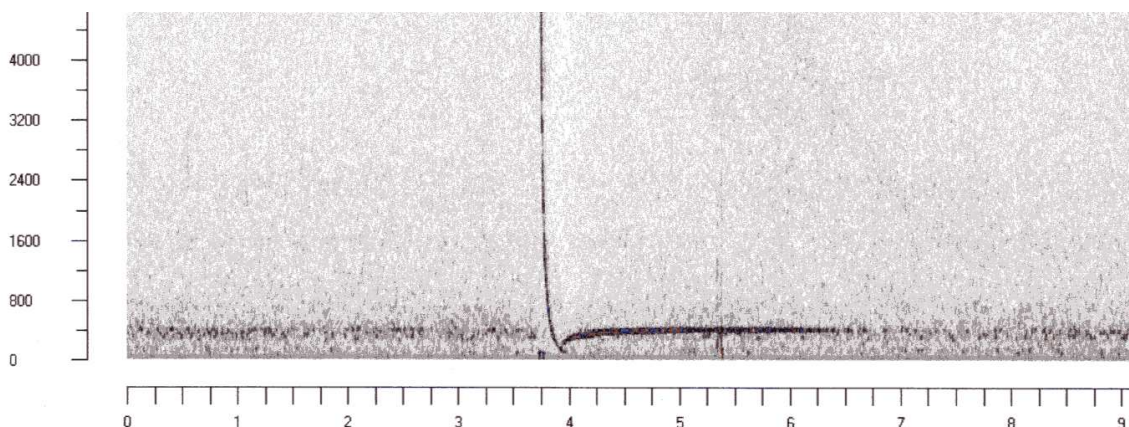
Pro vysvětlení dalšího záznamu získaného družicí Interkosmos 5 je nutné uvažovat pohyb kladně nabitých iontů. V odstavci o levotočivé vlně kapitoly 7.4 a také u složitějšího CMA-diagramu v kapitole 7.7 jsme se s tímto případem už setkali. Řekli jsme si, že v oblasti nízkých frekvencí se plazmatickým prostředím vedle pravotočivých vln mohou šířit i vlny levotočivé. Rezonance L-vlny s prostředím (pohlčení vlny) nastává v momentě, kdy úhlová frekvence vlny je shodná s cyklotronovou frekvencí kladných iontů – ionty se díky vlně rozpohybují po levotočivých šroubovicích a energii vlně „seberou”.

Po úderu blesku se do anizotropní ionosféry dostanou i L-vlny s  $\omega < \omega_{ci}$  (vyšší frekvence mají do ionosféry „vstup zakázán”). Jak se vlna vzdaluje od Země, vstupuje do stále slabšího magnetického pole  $\vec{B}_0$  (čáry magnetické indukce se rozbíhají). Okolní hodnota cyklotronové frekvence iontů tedy klesá<sup>17</sup> a přibližuje se k úhlové

<sup>17</sup>Cyklotronová frekvence elektronů klesá samozřejmě také, ale jejich pohyb L-vlnu příliš neovlivní.

frekvenci šířící se vlny. Kroužící ionty zde více vlnu využívají a zabraňují jí v průchodu. Fázová i grupová rychlost vlny postupně klesá. Nuly dosáhne v místě, kde  $\omega_{ci} = \omega$ .

L-vlny s nízkými frekvencemi (vzdálenými od  $\omega_{ci}$ ) procházejí prostředím snadněji a dostanou se do větších vzdáleností od Země – okolní magnetické pole musí hodně klesnout, aby se  $\omega_{ci}$  dorovнала s malou  $\omega$ . Vyšší frekvence (blízké  $\omega_{ci}$ ) procházejí hůře a jsou brzy (nízko) absorbovány. Družice tak naměří pouze vlny s  $\omega$  menší, než je hodnota lokální cyklotronové frekvence ( $\omega_{ci}$  v místě družice). Z těch vln, které družice zaznamená, dorazí dříve nízké frekvence, vysoké dojdou později.



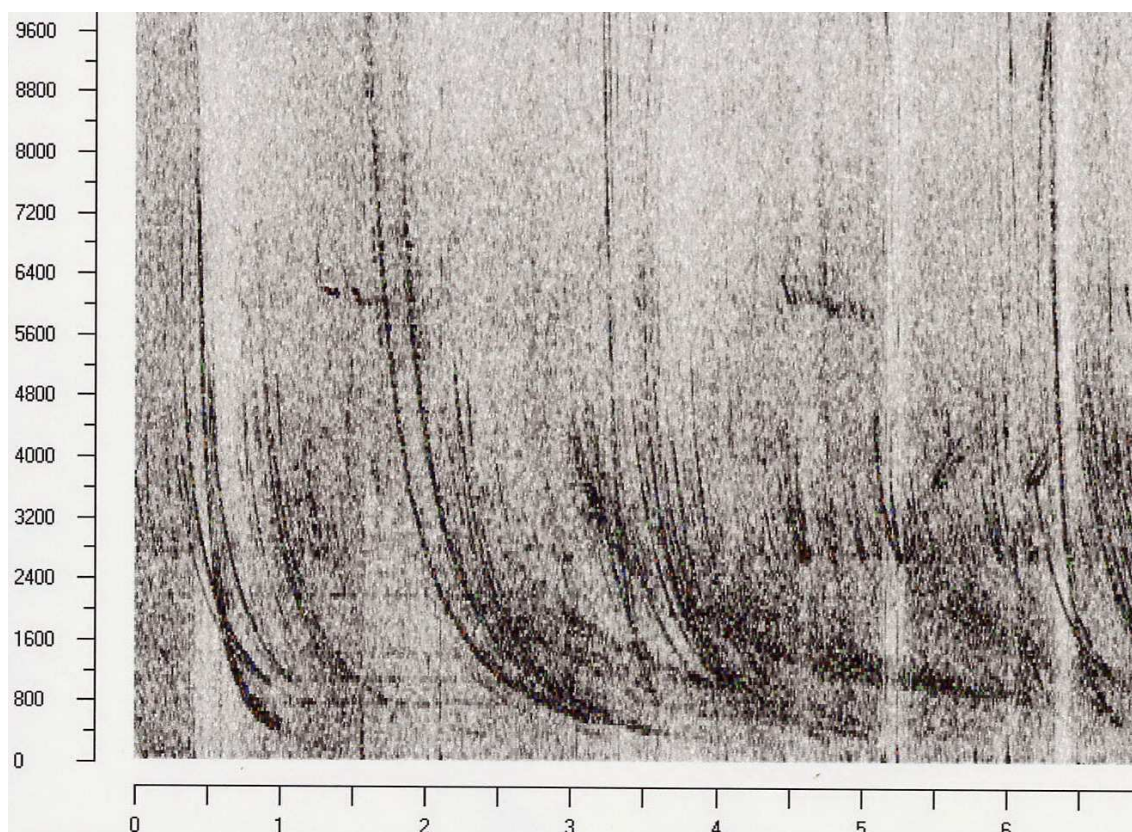
obr. 100: Elektronový (svislý) a iontový (vodorovný) hvizd z blesku pod družicí Interkosmos 5

Na obrázku 100 vidíme krásný iontový hvizd, silná téměř vodorovná čára. Těsně před koncem čtvrté sekundy byly naměřeny nejrychlejší levotočivé vlny s  $f \approx 100$  Hz. Pomalé vlny s frekvencemi 350 až 400 Hz dorazily po šesté sekundě záznamu. Iontový hvizd je natažen více než přes 2 s. Z grafu snadno vyčteme lokální cyklotronovou frekvenci iontů,  $\omega_{ci} \doteq 400$  Hz (vyšší levotočivé frekvence družice nenaměřila).

Vedle iontového byl naměřen i „normální“ (tzv. elektronový) hvizd týkající se pravotočivých vln (jde o tentýž typ hvizdu jako *S* na obrázku 99).

Iontové hvizdy lze měřit jen družicemi. Oproti elektronovým se na Zemi už nedostanou, všechny frekvence jsou postupně absorbovány.

Najít pěkné grafy různých typů hvizdů je obtížné. Obrázky často „kazí“ šumy nebo jiné vlny, ze kterých se některé ještě nikomu nepodařilo objasnit. Na závěr kapitoly si pro představu ukážeme obvyklejší záznam z měření (obr. 101). Tato data naměřila v listopadu roku 1999 družice Magion 5 ve výšce 3500 km na středních zeměpisných šířkách. Vidíme zde velké množství různě dlouhých hvizdů i nějaké ty šumy.



obr. 101: Běžný záznam, který naměřila družice Magion 5

## 9.5 Hvizdový mód z družice Freja

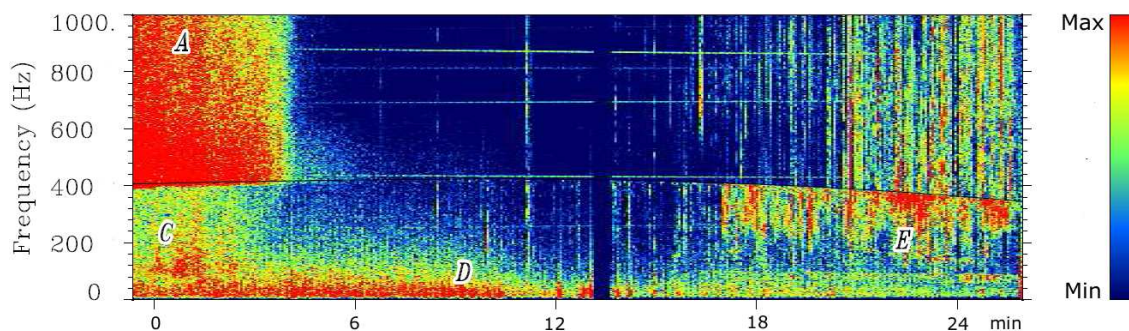
Švédská družice Freja byla vypuštěna 6. 10. 1992. Obíhala kolem Země po eliptické dráze s perigeem 600 km (místo na elipse nejbliž Zemi) a apogeem 1750 km (nejvzdálenější místo trajektorie). Jeden oběh trval necelé dvě hodiny.

Následující data byla naměřena v červnu roku 1993. Družice letěla ve výšce 1700 km nad Tichým oceánem podvečer místního času. Po deseti minutách se dostala do apogea své trajektorie, kde se stočila, a dál pokračovala jihovýchodně až k zeměpisné šířce, kde tou dobou už byla jedna hodina po půlnoci. Družice tedy měřila za sluníčka a na stejných zeměpisných šířkách i za tmy. Průlet trval 27 minut.

Na vodorovných osách grafů opět najdeme čas, tentokrát ale v minutách, na svislé ose pak frekvenci v Hz. Barevně jsou odlišeny různé hodnoty zobrazované veličiny (v předchozích kapitolách šlo pouze o odstín šedi).

Černá křivka uprostřed obrázků představuje lokální cyklotronovou frekvenci vodíkových iontů  $f_{H^+}$ . Přibližně v polovině záznamu je „hluché“ místo – družice chvilku neměřila.

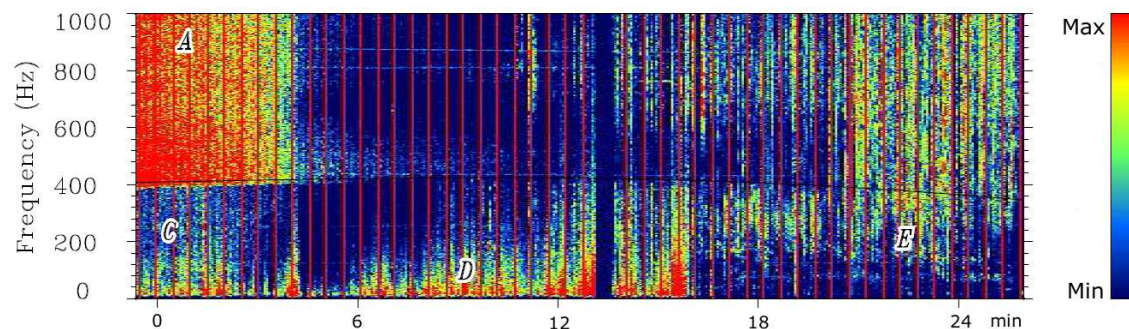
Graf 102 zobrazuje magnetickou složku elektromagnetických vln. Vpravo vidíme škálu intenzity: modrá barva odpovídá velmi slabým nebo žádným vlnám, červená barva naopak vlnám intenzivním. V grafu jsou písmeny *A*, *C*, *D* a *E* označeny čtyři typy vlnových jevů.



obr. 102: Magnetická indukce  $|\vec{B}|$ ; převzato z [3]

Vidíme, že velmi intenzivní vlny *A* byly naměřeny jen v podvečer (na začátku záznamu). Když družice letěla nad stejnými šířkami v noci (kolem 20. minuty), už je nezaznamenala. Vlny *A* mají ostré ořezání velmi blízko pod lokální cyklotronovou frekvencí vodíkových iontů. Z přesné spodní hranice vln typu *A* lze zjistit procentuální zastoupení vodíku v místech letu družice. Čím je tato hranice blíže k lokální  $f_{H^+}$  (černé křivce), tím je ve vzduchu méně vodíku.

Vlny *C* jsou pozorovány na nižších frekvencích a byly také naměřeny jen ve dne. Vlny typu *D* s velmi nízkými frekvencemi družice zaznamenávala v průběhu celého průletu. Na noční vlny *E* se dále podíváme trochu podrobněji.

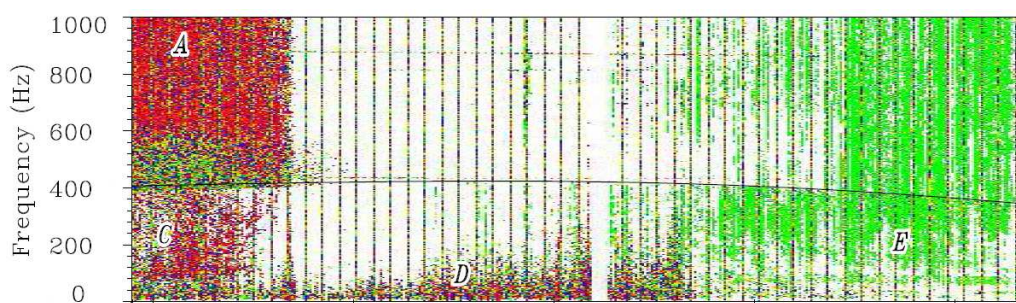


obr. 103: Elektrická intenzita  $|\vec{E}|$ ; převzato z [3]

Na grafu 103 je vynesena elektrická složka elektromagnetických vln. Červeně jsou opět značeny velmi intenzivní vlny. Až na svíslé červené čáry jsou grafy 102 a 103

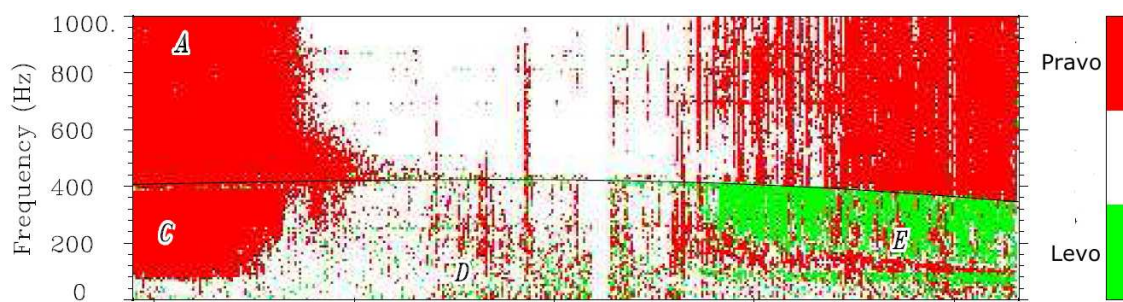
velmi podobné. Pravidelné čáry nepopisují žádné „přírodní“ elektromagnetické vlny, vznikají uměle v důsledku měření.

Družice měřila elektrickou intenzitu a magnetickou indukci, další grafy jsou z těchto údajů vypočteny. Graf 104 ukazuje, zda jdou elektromagnetické vlny směrem k Zemi (červeně) nebo od Země (zeleně). Tam, kde jsou vlny příliš slabé nebo žádné, je bílé místo. Vlny typu  $E$  se šíří od Země.



obr. 104: Směr šíření vln; červená k Zemi, zelená od Země; převzato z [3]

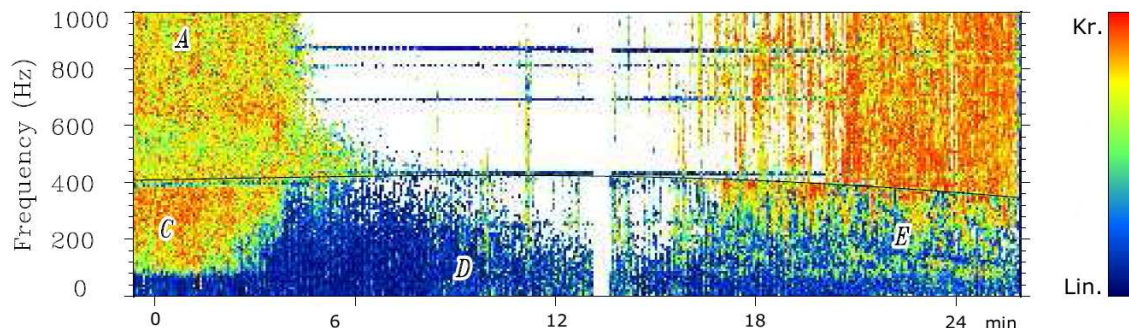
Na dalším obrázku vidíme, jestli jsou vlny spíše pravotočivé (červeně), levotočivé (zeleně) nebo lineárně polarizované (bíle). Z grafů 104 a 105 vyčteme, že družice naměřila levotočivé vlny jdoucí od Země pouze s frekvencí menší nebo rovnou cyklotronové frekvenci vodíkových iontů. Vyšší frekvence byly absorbovány už pod družicí, když okolní  $f_{H^+}$  (resp.  $\omega_{ci}$ ) vyrovnala frekvenci vlny  $f$  (úhlovou frekvenci  $\omega$ ). Nízké frekvence jsou absorbovány až nad družicí ve větších výškách se slabším  $B_0$  a nízkou cyklotronovou frekvencí – odstavec o iontových hvizdech v 9.4. Červeně zakreslené pravotočivé vlny pohyb kladných iontů neovlivňuje.



obr. 105: Smysl polarizace; převzato z [3]

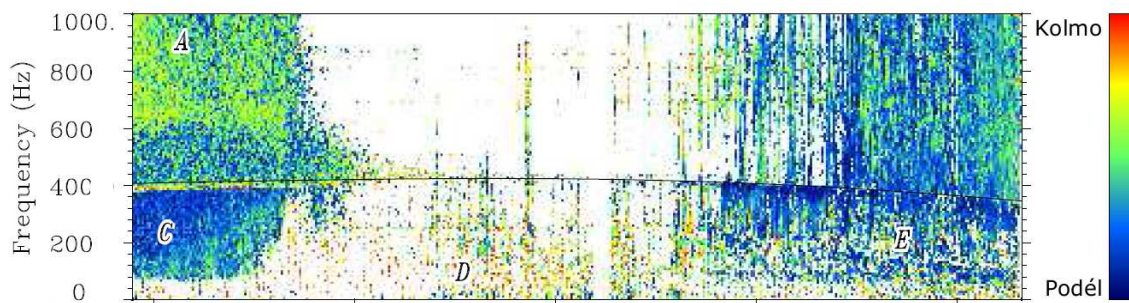
Obrázek 106 popisuje míru eliptické polarizace elektromagnetických vln, maximální elipticitu mají kruhově polarizované vlny (červeně), minimální pak lineárně polarizované (modře). Bílá místa odpovídají nepolarizovaným vlnám. Vlny  $E$

nad černou křivkou  $f_{H^+}$  mají vysokou elipticitu, protože jde pouze o vlny pravotočivé (levotočivé byly pod družicí absorbovány). Pod křivkou  $f_{H^+}$  se nachází směs pravotočivých a levotočivých vln, a tak výsledná elipticita není vysoká.



obr. 106: Elipticita, míra eliptické polarizace, převzato z [3]

Na dalším obrázku z Freji je velikost úhlu, který svírá vektor fázové rychlosti vlny se směrem magnetického pole Země  $\vec{B}_0$ , úhel  $\theta$ . Modrá barva odpovídá nulovému úhlu, fázová rychlost směřuje po nebo proti směru  $\vec{B}_0$ . Červená barva patří pravému úhlu, kdy vlna jde kolmo k  $\vec{B}_0$ . Vidíme, že všechny vlny se čar magnetické indukce vesměs drží.

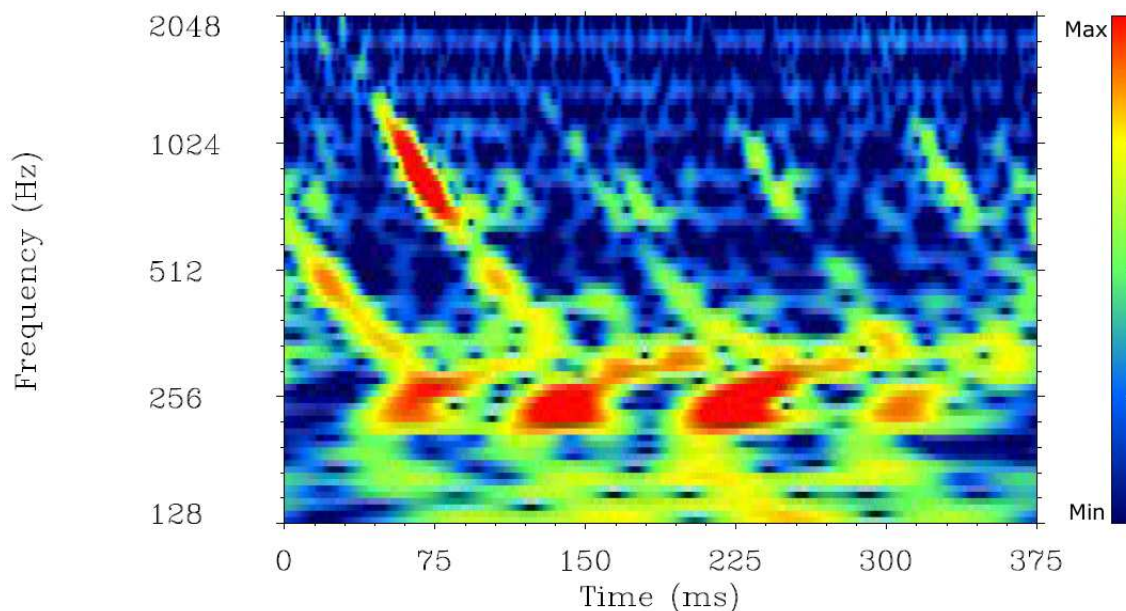


obr. 107: Úhel  $\theta$ , odklon  $\vec{v}_f$  od  $\vec{B}_0$ ; převzato z [3]

Z naměřeného elektrického a magnetického pole lze vytvořit řadu dalších grafů popisujících elektromagnetické vlny z okolí družice. Třeba směry fázových či grupových rychlostí nebo míru polarizace (jestli je chování elektrické intenzity a magnetické indukce vlny spíše „učesané“ nebo chaotické).

## Kde jsou ty hvizdy?

Ukázali jsme si celkem šest grafů hvizdového módu z družice Freja, ale neviděli jsme ani jeden hvizd – v čase natažený signál. Přesto v záznamu hvizdy jsou a je jich velké množství.



obr. 108: Iontové a elektronové hvizdy; převzato z [3]

Z grafu 102 zobrazující magnetickou indukci si z oblasti vln typu  $E$  vyřízneme úzký proužek odpovídající pouze 0,4 s. Svislou osu frekvencí si rozšíříme až k 2000 Hz a převedeme z obyčejné (lineární) na logaritmickou<sup>18</sup>. Takto upravený graf 50× zvětšíme a získáme obrázek 108, na vodorovné ose je čas v milisekundách.

Klesající zahnuté křivky jsou obyčejné (elektronové) hvizdy, širší stoupající jsou hvizdy iontové. Iontové hvizdy jsou seshora omezené lokální cyklotronovou frekvencí vodíkových iontů, v tomto případě  $f_{H^+} = 400$  Hz.

## 9.6 Aurorální sykot

V této kapitole si více rozebereme tvar osmičky charakterizující hvizdový R-mód. Na datech naměřených družicí Polar si pak ukážeme důsledky, které odtud plynou.

Na obrázku 109 jsou tři různé osmičky charakterizující velikosti fázových rychlostí v různých směrech. Všechny tři patří hvizdovému módu, každá ale jiné frekvenci.

<sup>18</sup>Krok o jeden dílek už neznamená zvětšení o daný počet Hz, ale zdvojnásobení předchozí hodnoty.

První osmička popisuje chování vlny s nízkou frekvencí, druhá charakterizuje vlnu s vyšší  $f$  a třetí vlnu o vysoké frekvenci. S růstem frekvence vlny klesá její rezonanční úhel.

Šedé šipky ukazují směry grupových rychlostí jednotlivých vln, když se šíří téměř pod svým rezonančním úhlem. Kdybychom chtěli směry grupových rychlostí i pro menší úhly  $\theta$ , vytvořili bychom si grafy vlnových vektorů a jim bychom přimalovali kolmice (chlupy) jako v kapitole 9.1. Jelikož aurorální sykot, kterým se budeme dále zabývat, je tvořen pouze vlnami šířícími se v blízkosti svého rezonančního kužele, jiné než šedé šipky nepotřebujeme.

Vlnám s nízkou frekvencí (obr. 109a) připadá do široka otevřený rezonanční kužel. Vektor grupové rychlosti vln šířících se poblíž povrchu rezonančního kužele se od  $\vec{B}_0$  příliš neodklání. Zvyšujeme-li frekvenci vlny, její rezonanční úhel se zmenšuje a směr šíření informace o vlně poblíž  $\theta_R$  se od magnetického pole více odchyluje, obr. 109b a 109c.

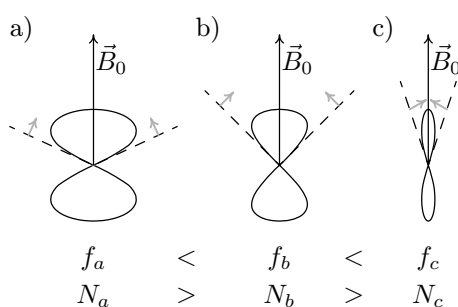
Zbývá ještě dodat, že s klesající koncentrací<sup>19</sup> plazmatu  $N$  klesá rezonanční úhel. Neboli, šíří-li se vlna z prostředí hustšího do řidšího, její rezonanční kužel – patřící jediné frekvenci – se v průběhu cesty mění, zužuje se.

## Vznik aurorálního sykotu

Když se dostane velké množství rychlých elektronů do zemské atmosféry, vidíme ji jako polární záři. Rychle padající elektrony jsou okolními molekulami bržděny a ty se přebytečné energie zbavují vyzářením elektromagnetické vlny. Má-li tato vlna vhodnou frekvenci, vidíme ji.

K polárním zářím dochází v tzv. aurorální oblasti, v oblasti vyšších zeměpisných šířek. V jiných šířkách magnetické pole Země nedovolí elektronům se dostat ze Slunce až do atmosféry.

Nabitě elektrony nemůžou na Zemi jenom padat, planeta se jich musí také zbavovat. Existují tedy elektrony, které na vyšších zeměpisných šířkách letí od Země pryč. Ve výškách kolem 6 000 km nad Zemí mají oproti částicím z okolí velkou rychlost ve směru radiálně (pryč) od Země. To ovšem nevyhovuje rovnovážnému stavu. Aby se prostředí ustálilo, elektrony se přebytečné energie zbaví, „lépe pak zapadnou



obr. 109: Různé osmičky hvizdového módu, směry  $\vec{v}_g$  vln šířících se v blízkosti  $\theta_R$

<sup>19</sup>Častěji se používá mírně zavádějící termín **hustota plazmatu**. Nejde o hmotnost dělenou objemem, ale o počet volných elektronů v daném objemu.



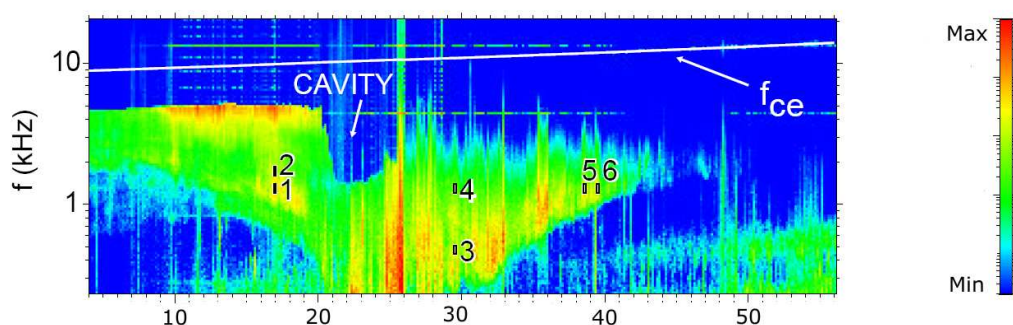
do kolektivu”. To v žádném případě neznamená, že všechny částice pak mají stejnou rychlost. Vzpomeňme si na plyn v krabici a obrázek 40 v kapitole 5.1.

Vyzářené vlny se šíří od Země stejně jako elektrony, které je vyzářily. Tyto vlny nazýváme aurorálním sykotem. Vidět je určitě nemůžeme, oproti viditelným vlnám mají příliš nízké frekvence. Kdybychom je však reproduktorem převedli na zvuk, tak je uslyšíme (jako u hvizdy na str. 70).

### Aurorální sykot naměřený družicí Polar

Na obrázku 110 jsou data, která naměřila družice Polar<sup>20</sup> 6. března 1997. Družice prolétávala ve výšce kolem 25 000 km (čtyř zemských poloměrů) nad východní částí Kanady. Počátek záznamu na obrázku 110 odpovídá přibližně 58° severní šířky a konec asi 44° severní šířky. Družice letěla téměř podél poledníku přímo na jih a průlet trval asi 50 minut. V Kanadě v době měření byly dvě hodiny po půlnoci. Družice měřila elektrickou intenzitu a magnetickou indukci.

Na vodorovné ose v grafu běží čas. S časem postupně klesá zeměpisná šířka a také výška letu (družice mírně klesala). Na logaritmickou svislou osu je nanášena frekvence do 10 kHz (nerovnoměrně rozložené čárky mezi 1 kHz a 10 kHz odpovídají 2, 3, 4... kHz). Barevně je odlišena intenzita měřených vln.



obr. 110: Intenzita elektromagnetických vln; převzato z [4]

Na začátku měření (na severu) družice zaznamenala vlny o vyšších frekvencích, přibližně od 2 kHz do 4 kHz. S postupujícím časem se přidávaly frekvence nižší a nižší. Kolem 25. minuty (zeměpisné šířky 52°) Polar naměřila všechny elektromagnetické vlny s frekvencí menší než 4 kHz. S dalším poklesem zeměpisné šířky družice postupně o nižší frekvence přicházela, až kolem 43. minuty zachytila pouze vlny kolem 2 kHz. Výsledný graf má tvar jakéhosi trychtýře.

<sup>20</sup>Polar byla vypuštěna 27. února 1996. V maximální výšce přibližně 50 000 km (osm poloměrů Země) nad aurorální oblastí zkoumala okolní prostředí. Kromě elektromagnetických vln měřila různé parametry plazmatu a fotografovala aurorální oblasti Země.

## Vysvětlení trychtýřovitého tvaru

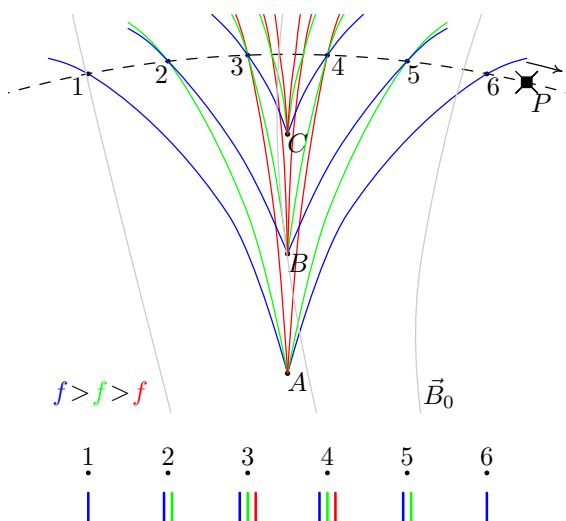
Z trychtýřovitého tvaru grafu 110 lze usoudit, že kolem zeměpisné šířky  $52^\circ$  (tam, kde družice naměřila nejvíc frekvencí), je „čárový zdroj“ aurorálního sykotu – elektromagnetických vln hvizdového módu. Tento závěr nám pomůže objasnit několik obrázků.

Družice Polar na obrázku 111 letí po čárkované dráze, postupně prolétá první až šestou polohou. Země se nachází pod obrázkem, hustota plazmatu  $N$  s výškou klesá. Tenké šedé čáry charakterizují magnetické pole Země.

Předpokládejme, že bod  $A$  je zdrojem elektromagnetických vln různých frekvencí. Vysoké frekvence hvizdového módu označíme modře, střední zeleně a nízké červeně.

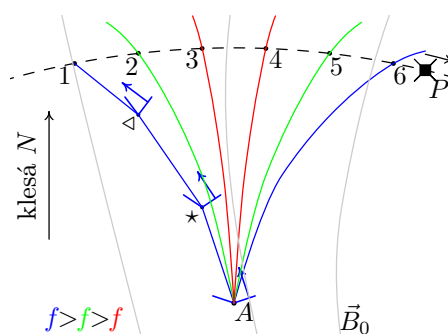
Modré široké „věčko“ s vrcholem v bodě  $A$  a šipkou představuje rezonanční kužel vlny vysoké frekvence a směr vektoru její grupové rychlosti.

Informace o modré vlně se šíří ve směru šipky a po chvíli se dostane do místa  $\star$ . Zde je nižší hustota plazmatu, rezonanční kužel vlny se zúží a grupová rychlost se více odkloní od  $\vec{B}_0$ . Vlna se dostane do místa  $\triangleleft$ . Hustota oproti  $\star$  opět poklesla, kužel se ještě sevře a  $\vec{v}_g$  se více odchýlí od  $\vec{B}_0$ . Vlna se dostane do 1.



obr. 112: Tři zdroje, každý tři frekvence

informace o zelené vlně šíří po zelených křivkách na obrázku 111. Družice Polar naměří střední frekvence v místech 2 a 5. Nízká červená frekvence má v bodě  $A$  ještě



obr. 111: Šíření vln ze zdroje  $A$ ; Země je pod obrázkem

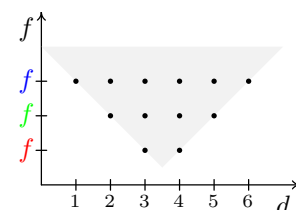
Ve skutečnosti se okolní prostředí mění plynule a tudíž i kužel se plynule uzavírá – informace o vlně se tak šíří po hladkých modrých křivkách (z  $A$  do 6) a ne po lomených čarách (z  $A$  do 1). Elektromagnetickou vlnu s vysokou frekvencí vyzářenou zdrojem  $A$  naměříme pouze v místech ležících na modrých čarách, nikde jinde se o těchto vlnách neví. Vysoké frekvence z  $A$  družice Polar zaznamená jen v polohách 1 a 6.

Střední zelené frekvence v bodě  $A$  odpovídá větší rezonanční úhel a tudíž rozvětvenější kužel. Zelená grupová rychlost tak směřuje více podél  $\vec{B}_0$ . Díky postupnému uzavírání rezonančního kužele se

širší rezonanční kužel, a tudíž červené křivky jsou nejméně rozevřené. Družice tyto vlny naměří v polohách 3 a 4.

Uvažujme další dva bodové zdroje elektromagnetických vln nad původním  $A$ . Trasy tří frekvencí ze všech tří zdrojů pak vidíme na obrázku 112. Družice letící po čárkované křivce naměří v krajních polohách 1 a 6 pouze vysoké frekvence, v polohách 2 a 5 vysoké a střední frekvence a v místech 3 a 4 všechny tři.

Naměřené hodnoty zjednodušeného příkladu se třemi zdroji a třemi frekvencemi vytvoří v záznamu dvanáct teček, obr. 113. Na vodorovné ose je poloha družice (resp. ubíhající čas) a na svislé ose frekvence. Když uvážíme spojitě spektrum vln a čárový zdroj (úsečka obsahující body  $A$ ,  $B$  a  $C$ ), namísto teček se v grafu objeví trychtýř.



obr. 113: Družice naměří

Ve skutečnosti takový pěkný symetrický tvar z obrázku 113 družice nenaměří, podívejte se znovu na záznam<sup>21</sup> 110. První polovina trychtýře tvořená vlnami šířícími se doleva (ve skutečnosti severně) je hezká dost. Ovšem vlny, které se šíří na jih od zdroje a vytváří pravou polovinu trychtýře na obrázku 110, se dostávají do silnějšího magnetického pole Země (čáry magnetické indukce se stáčí k Zemi). V takovém prostředí mohou být některé vlny snadno absorbovány, družice pak v druhé polovině měření část vln vůbec nezaznamená. Proto není pravá polovina trychtýře z obrázku 110 stejně velká jako levá.

## Horní okraj trychtýře

„Neošizená” pravá strana trychtýře z obrázku 110 má velmi ostrý horní okraj – žádné vlny s frekvencí vyšší než je hraniční  $f_m = 4$  kHz družice Polar nezaznamenala. Není to tím, že by zdroje vyzařovaly pouze vlny s takto omezenou frekvencí. Kdybychom družici vyslali blíž k Zemi (níž), naměřila by i vyšší frekvence, trychtýř by sahal výš. Některé vlny vyzářené zdroji pod družicí se tedy k družici nedostanou.

Už víme, že když vlna stoupá k družici, prochází plazmaticky řidším a řidším prostředím a její rezonanční kužel se přitom zužuje. Má-li vlna už na počátku kužel velmi úzký, tak se na cestě k družici úplně uzavře. Rezonanční úhel klesne na nulu a z kužele se stane úsečka. Elektromagnetická vlna může pokračovat dál pouze v případě, že její fázová rychlost směřuje přesně rovnoběžně s magnetickým polem. Kdykoli se  $\vec{v}_f$  odchyluje od  $\vec{B}_0$ , prostředí vlnu absorbuje a družice ji nezaznamená.

Z výpočtů plyne, že rezonanční úhel pravotočivé vlny je roven nule, má-li vlna úhlovou frekvenci rovnu plazmové frekvenci prostředí, ve kterém se nachází,  $\omega = \omega_p$ .

<sup>21</sup>Pozor, barvy v záznamu 110 z družice Polar charakterizují intenzitu vln, frekvence se nanáší na svislou osu.

V místě vyzáření mají vlny úhlovou frekvenci  $\omega$  menší než je lokální plazmová frekvence  $\omega_p$ . Jak se vlna šíří pryč od Země, lokální plazmová frekvence se zmenšuje a přibližuje k frekvenci vlny. V momentě rovnosti je vlna okolním prostředím absorbována (množství vln s  $\vec{v}_f \parallel \vec{B}_0$ , které projde dál, je neměřitelné).

Hodnota  $f_m$  tedy odpovídá plazmové frekvenci prostředí, ve kterém se družice nachází. Vyšším frekvencím se zavřou kužele už pod družicí, nižším až nad ní. Z naměřené hodnoty  $f_m$ , kde  $f_m = \frac{\omega_p}{2\pi}$ , a podle vzorce (41)  $\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e}}$ , určíme hustotu plazmatu  $N$  v místě družice. Pro  $f_m = 4$  kHz, vychází  $N = 0,2$  elektronu na  $\text{cm}^3$ .