

**«Аномальное» расплывание импульса и  
«сверхнаправленность» излучения  
дипольных антенн в плазме**

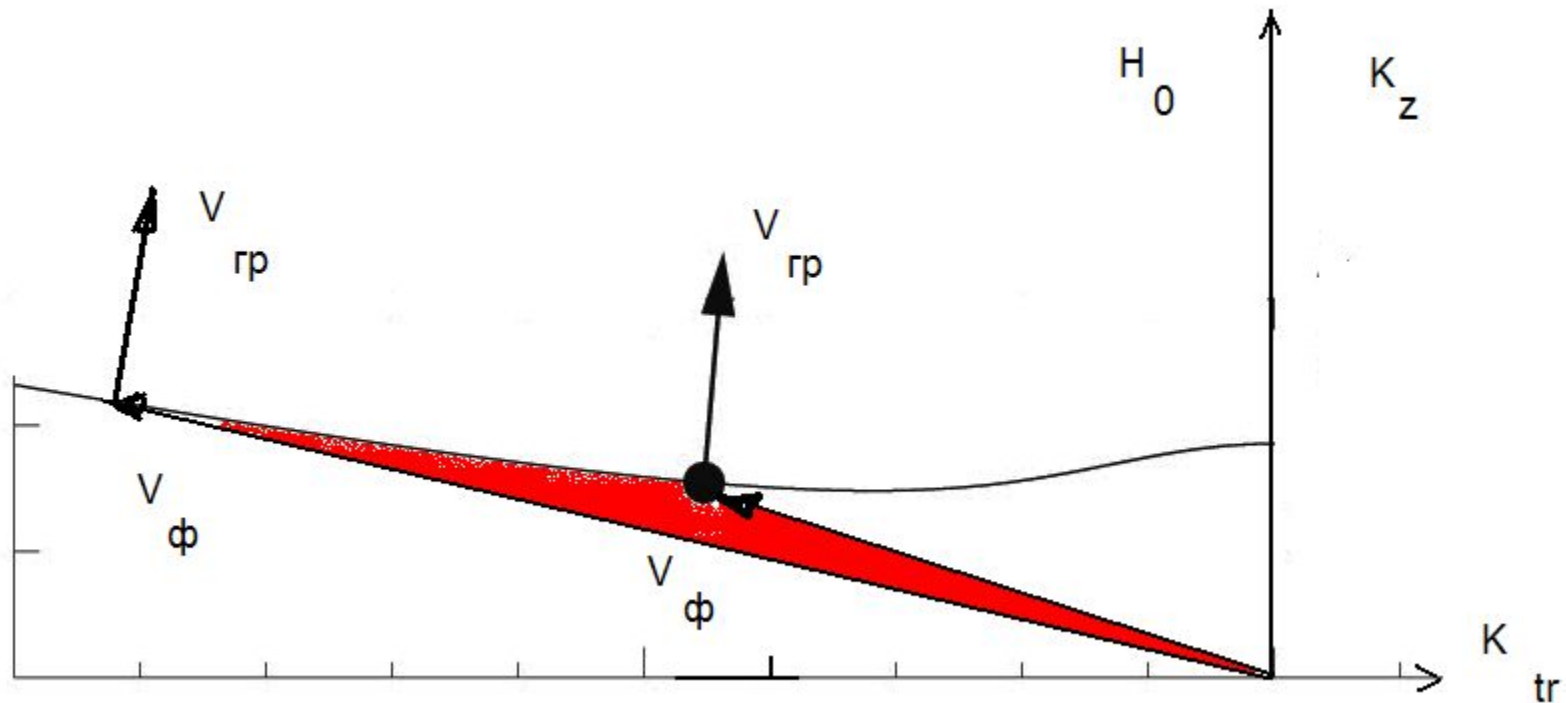
**Юрий Чугунов**

***Институт прикладной физики РАН***

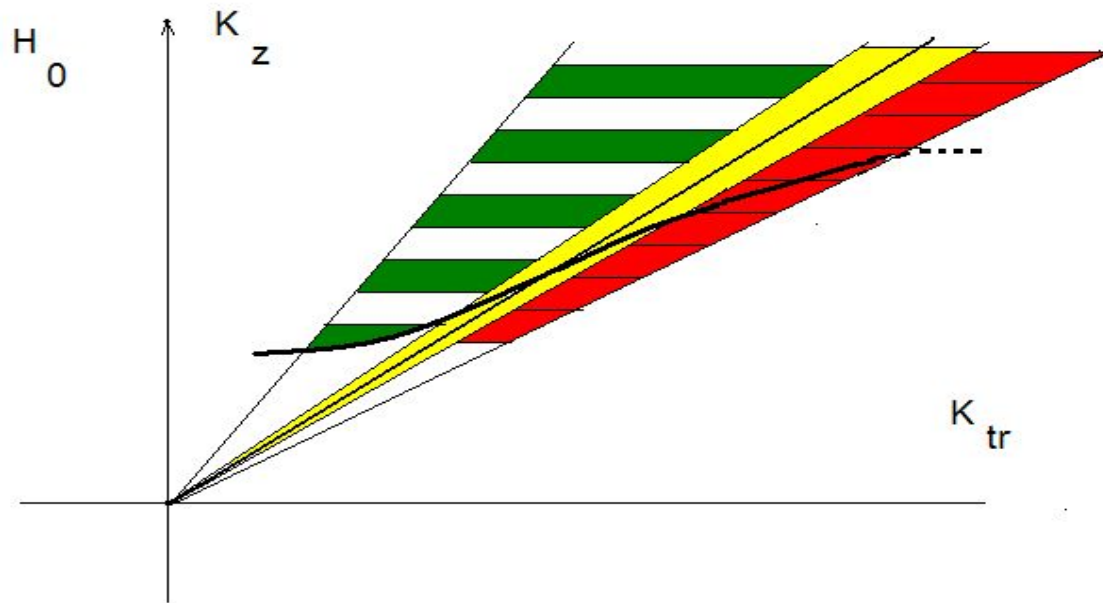
## Введение

Излучение и прием электромагнитных волн антеннами в плазме является одной из актуальных электродинамических задач, имеющих достаточно широкое применение при анализе электромагнитных возмущений в космической и лабораторной плазме. Наибольший интерес при анализе поля излучения дипольных антенн представляют те области частот и пространственных масштабов, которым отвечают наиболее сильное влияние временной и пространственной дисперсии на поля излучения. Прежде всего, это резонансные частотные интервалы в магнитоактивной плазме и в движущейся изотропной плазме, в которых дисперсия проявляется особенно ярко. В настоящей докладе анализируются особенности электромагнитного поля антенн в этих частотных интервалах, когда влияние плазмы является существенным и приводит к качественным отличиям структуры излучаемого поля от соответствующих структур в вакууме или в ситуации, близких к нему. Акцент делается на анализе поля излучения при импульсном излучении гармонического сигнала, когда эффекты временной и пространственной дисперсии оказывают существенное влияние на задержку и расплывание квазигармонического импульса.

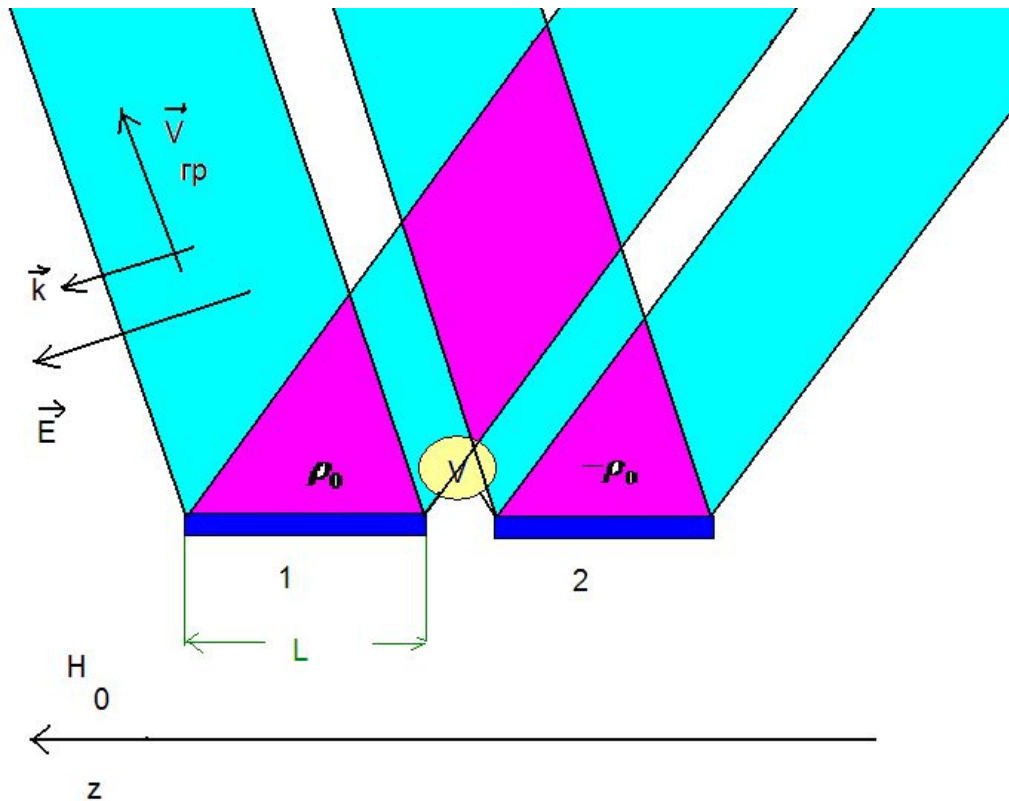
# Картинки и геометрия

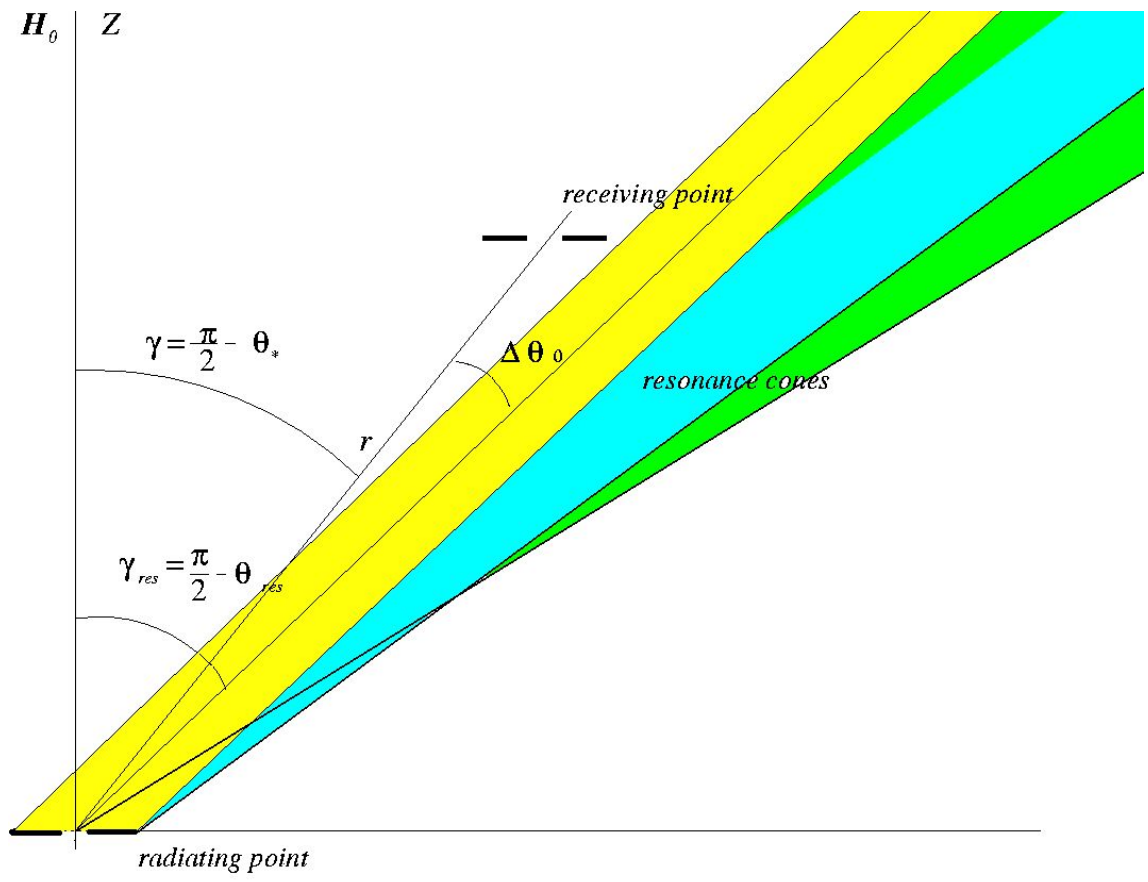


# Картинки и геометрия

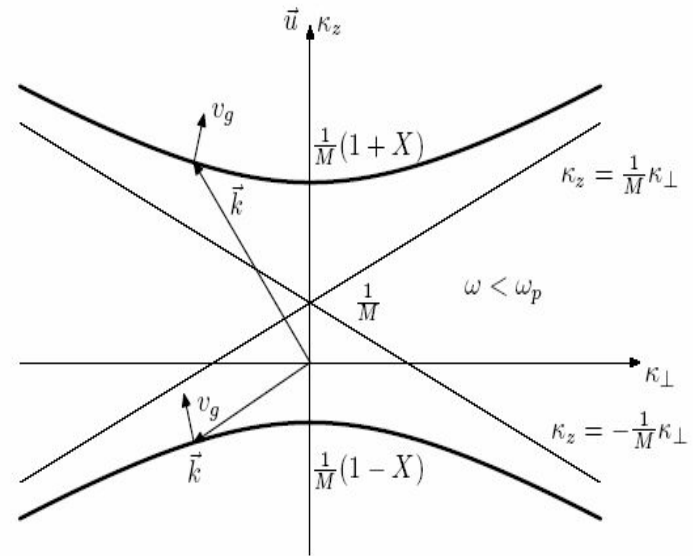
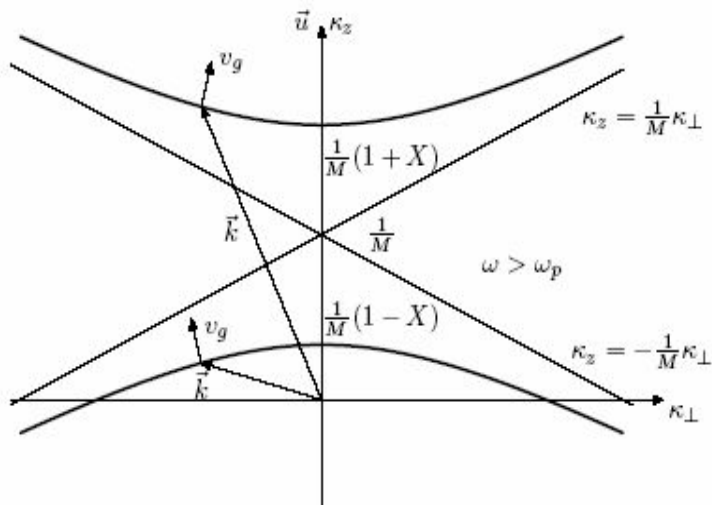


# Картинки и геометрия

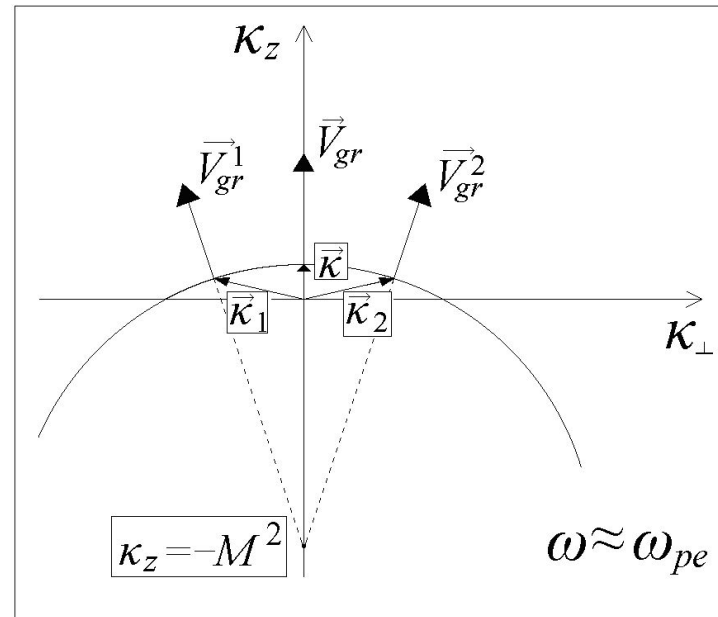
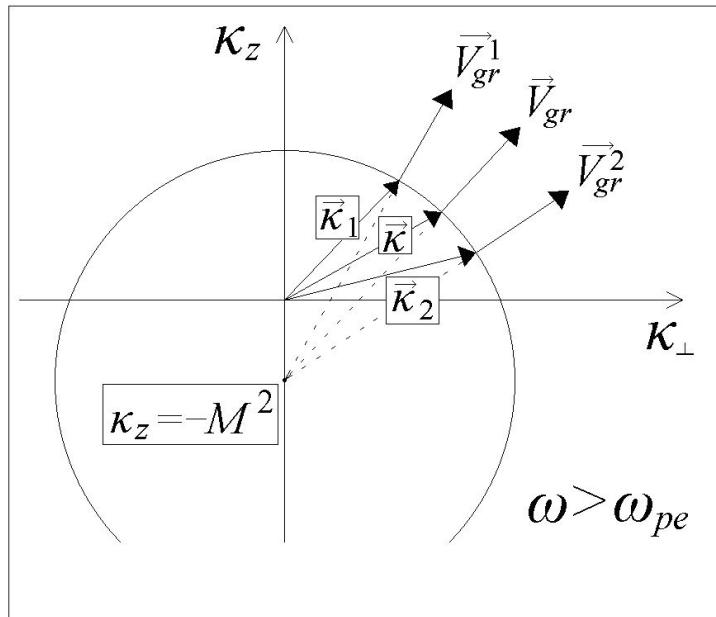




# Картинки и геометрия

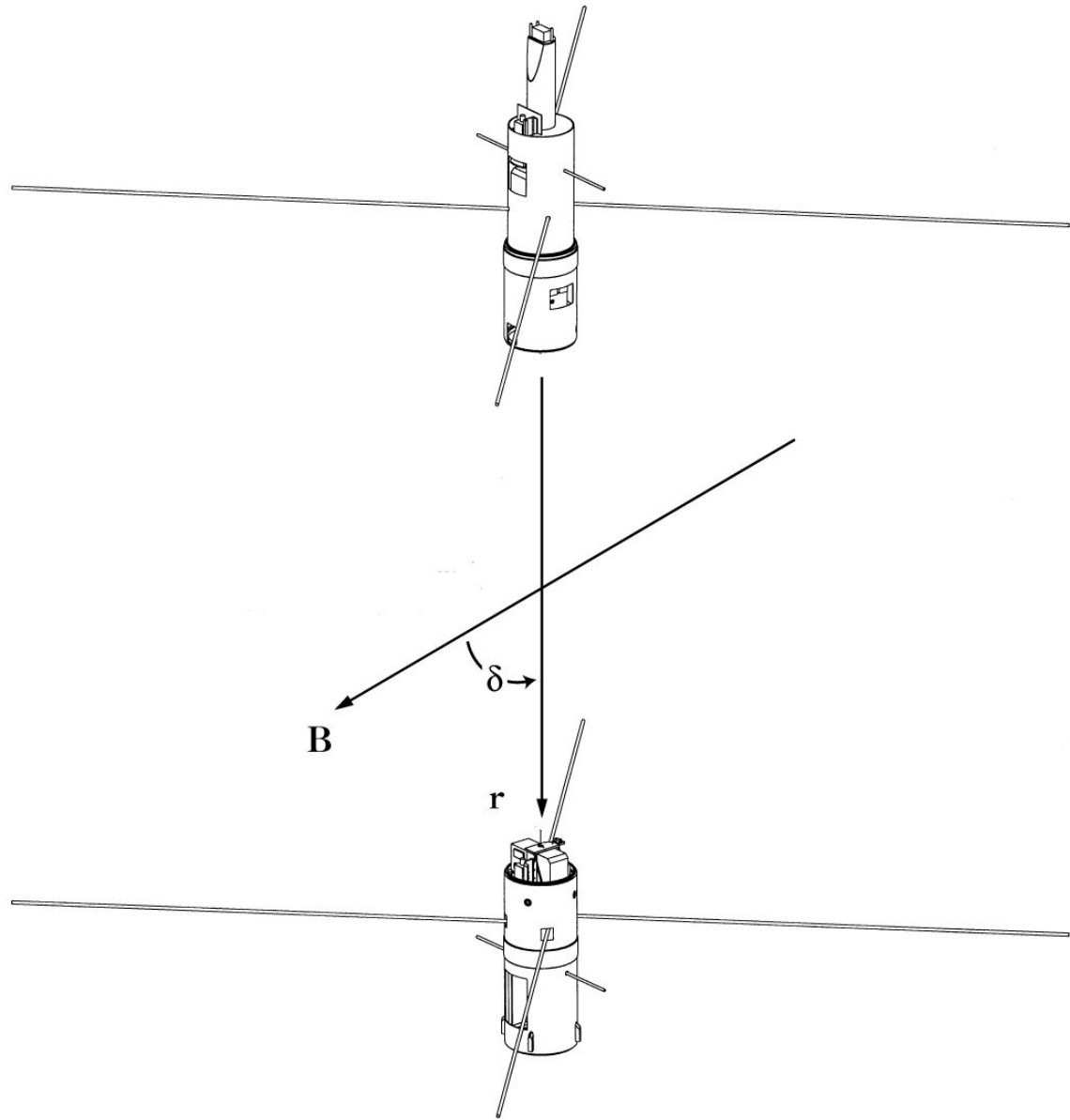


# Картинки и геометрия

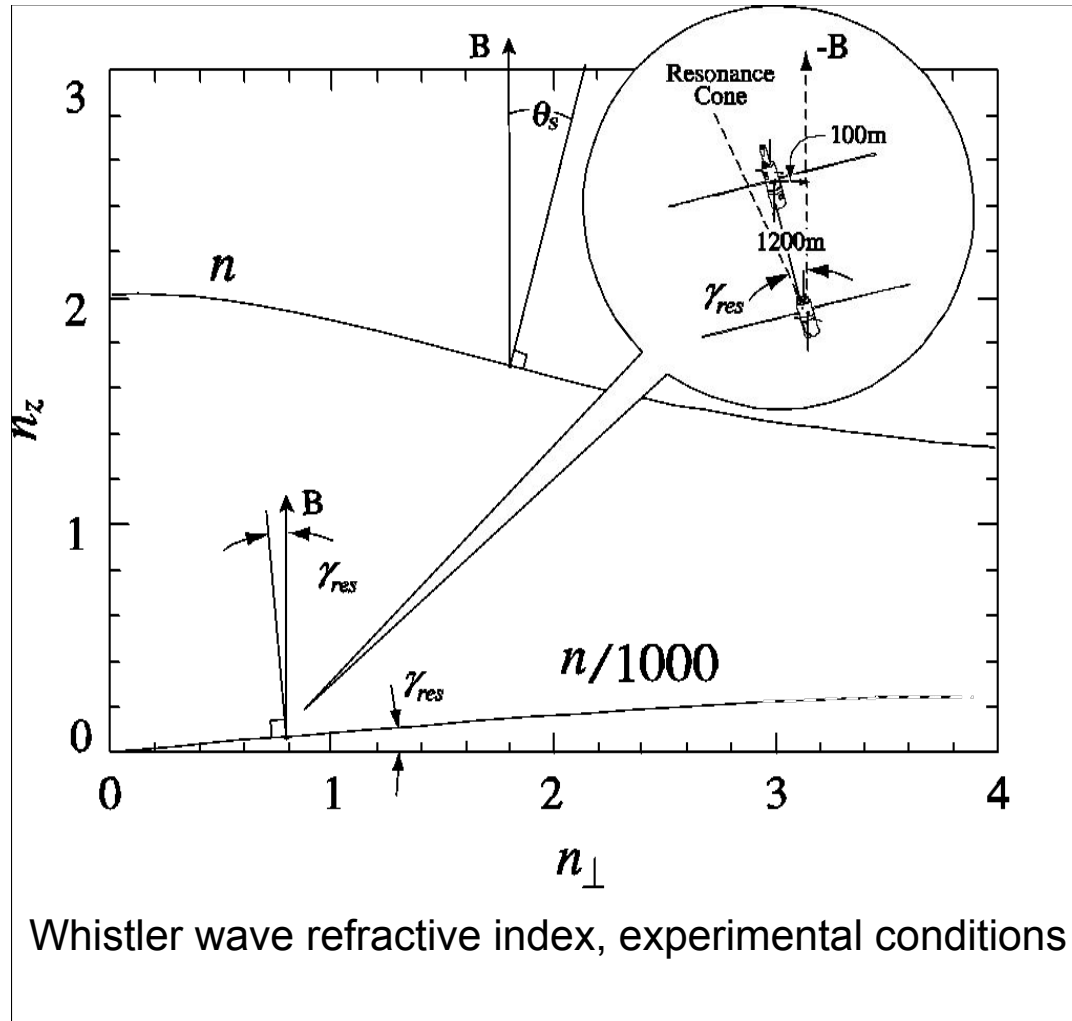




OEDIPUS-C  
Double  
Payload  
7 Nov. 1995



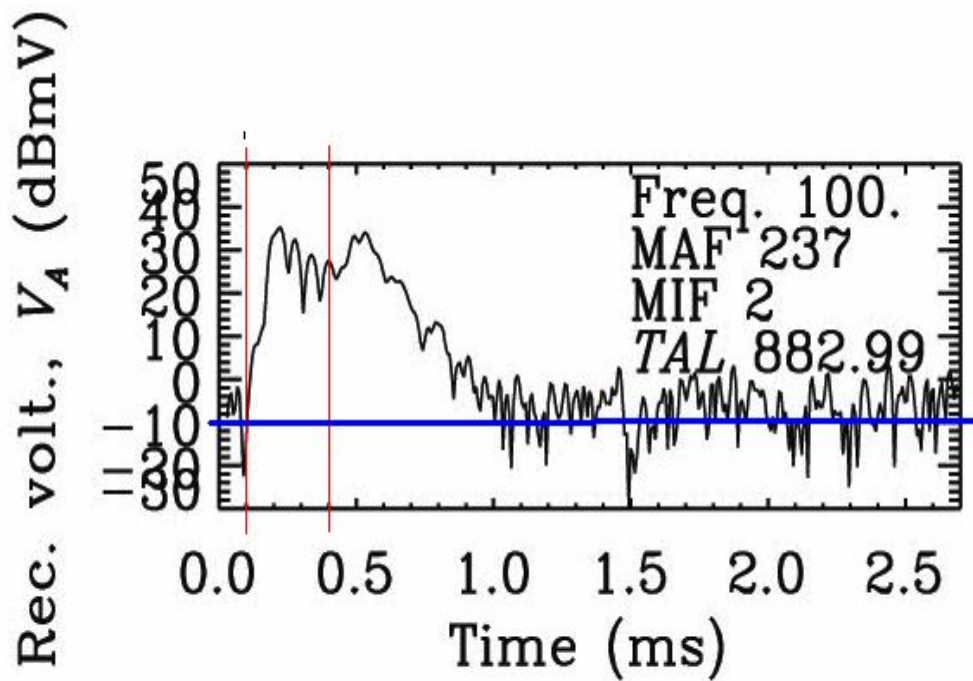
# OEDIPUS-C two point experiment in the polar ionosphere



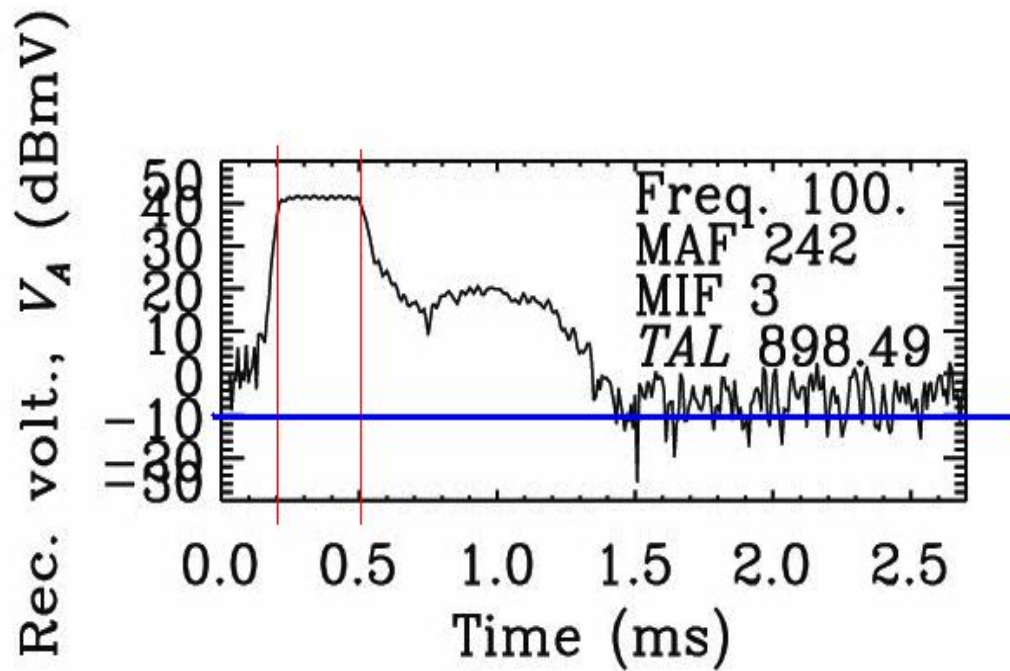
## *Experiment parameters*

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
<i>Wave frequency, <math>f</math></i>	<i>0.025 MHz</i>
<i>Plasma frequency, <math>f_{pe}</math></i>	<i>0.300 MHz</i>
<i>Gyrofrequency, <math>f_{ce}</math></i>	<i>1.200 MHz</i>
<i>Temperature, <math>T_e</math></i>	<i>5000 K</i>
<i>Debye length,</i>	<i>14.4 cm</i>
<i>Driving point current, <math>I_0</math></i>	<i>5 mA</i>
<i>Monopole length, <math>L</math></i>	<i>9.5 and 6.5 m</i>
<i>Separation distance, <math>r</math></i>	<i>1190 m</i>
<i>Separation angle,</i>	<i>5.0°</i>
<i>Payload altitude</i>	<i>650 km</i>

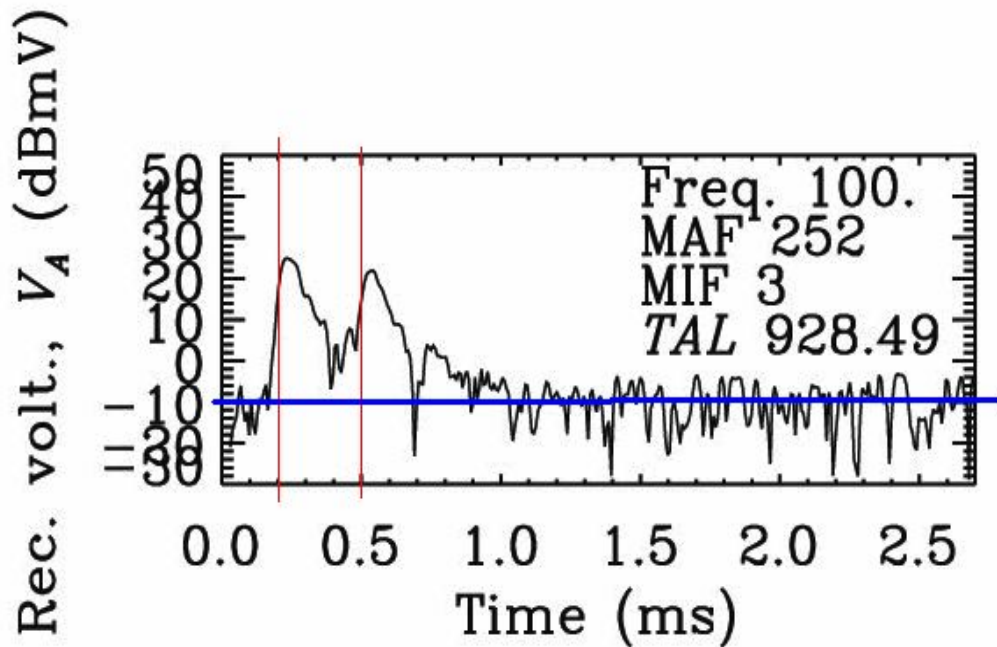
# Импульс на приемной антенне (TAL= 882s)



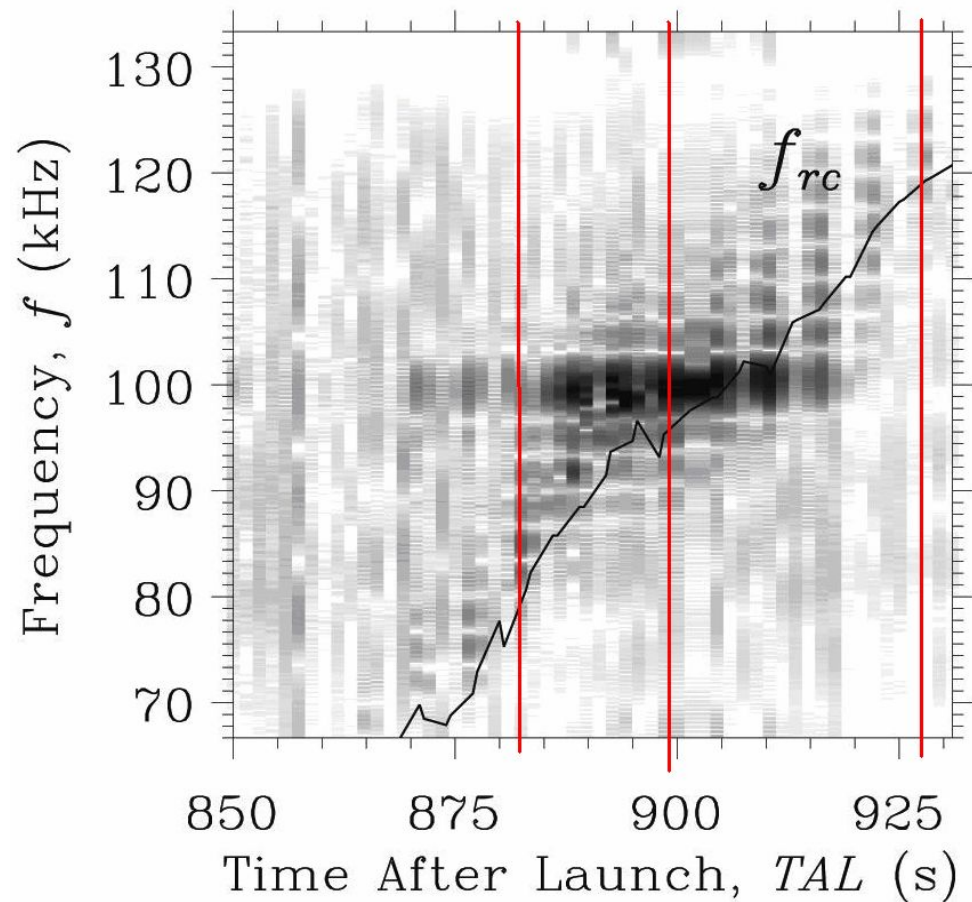
# Импульс на приемной антенне (TAL= 898s)



# Импульс на приемной антенне (TAL= 928s)



# Спектрограмма принимаемого сигнала



$$\rho_{ext} = \rho(\mathbf{r})\Pi(t, T) \exp(-i\omega_0 t)$$

$$\varphi(\mathbf{r}, t) = -(1/4\pi^3) \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{k} \int_{-\infty+i\sigma}^{\infty+i\sigma} \frac{\rho_{ext}(\omega, \mathbf{k})}{k_\alpha \varepsilon_{\alpha\beta}(\omega, \mathbf{k}) k_\beta} d\omega \exp(-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r})$$

$$\rho_{ext}(\omega, \mathbf{k}) = \rho(\mathbf{k})(1/i(\omega - \omega_0))[\exp(i(\omega - \omega_0)T) - 1]$$

$$k_\alpha \varepsilon_{\alpha\beta} k_\beta / k^2$$



$$\delta k_{\tau\omega}^* = k_{\xi} (\partial\mu / \partial\omega)_{\omega-\omega_0} (1 + \mu_0^2)^{-1} (\omega - \omega_0) = k_{\xi} q (\omega - \omega_0) = k_{\xi} q \Omega$$

$$k_{\tau}^*(k_{\xi}) = -(1/3)R^2 k_{\xi}^3 + (1/4)k_{\xi}^{-1} \lambda^{-2} + k_{\xi} q \Omega + isk_{\xi}$$

$$\varphi(\tau, \xi, t) = \frac{\pi\varphi_0 \exp(-i\omega_0 t)}{i\tau^{1/2}} \int_0^{\infty} dx x^{-1/2} \rho(0, 0, x) \exp(i\Psi(x)) \Pi(t - q\tau x)$$

$$\Psi(k_{\xi}, \Omega) = k_{\xi} \xi + (1/4)k_{\xi}^{-1} \lambda^{-2} \tau + k_{\xi} q \tau \Omega + is\tau k_{\xi} = \Psi(k_{\xi}) + k_{\xi} q \tau \Omega$$

# Структура поля волнового пучка

$$E_{\xi}(\tau, \xi, t) = \pi E_0 \tau^{-1/2} e^{-i\omega_0 t} \int_0^{t/q\tau} dx x^{1/2} \rho(0, 0, x) \exp(i\Psi(x)) = E_0 \tau^{-1/2} e^{-i\omega_0 t} I_1(t/q\tau), \quad 0 \leq t \leq T$$

$$E_{\xi}(\tau, \xi, t) = \pi E_0 \tau^{-1/2} e^{-i\omega_0 t} \int_{(t-T)/q\tau}^{t/q\tau} dx x^{1/2} \rho(0, 0, x) \exp(i\Psi(x)) = E_0 \tau^{-1/2} e^{-i\omega_0 t} I_2(t/q\tau), \quad t \geq T$$

$$\Psi(x) = x\xi + (\tau / \lambda^2) / x + i s \tau x$$

- - Энергия излучения переносится вдоль резонансной поверхности;
- Групповая и фазовая скорость волн ортогональны друг другу;
- Волновое поле слабо спадает с ростом расстояния от источника;
- Волновой пакет является суперпозицией плоских волн, бегущих, преимущественно, в одном направлении (вдоль координаты , ортогональной к резонансной поверхности).  $E_{\xi} \sim \tau^{-1/2}$

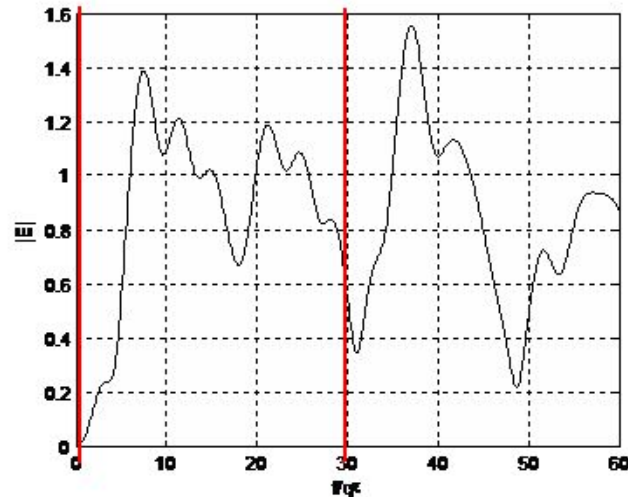
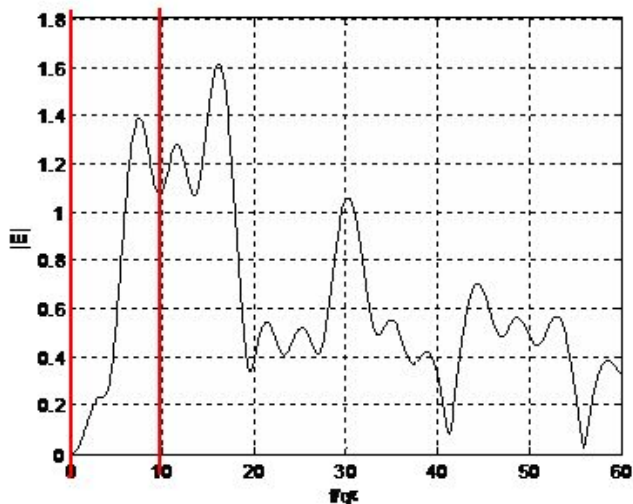
# Выводы из формул

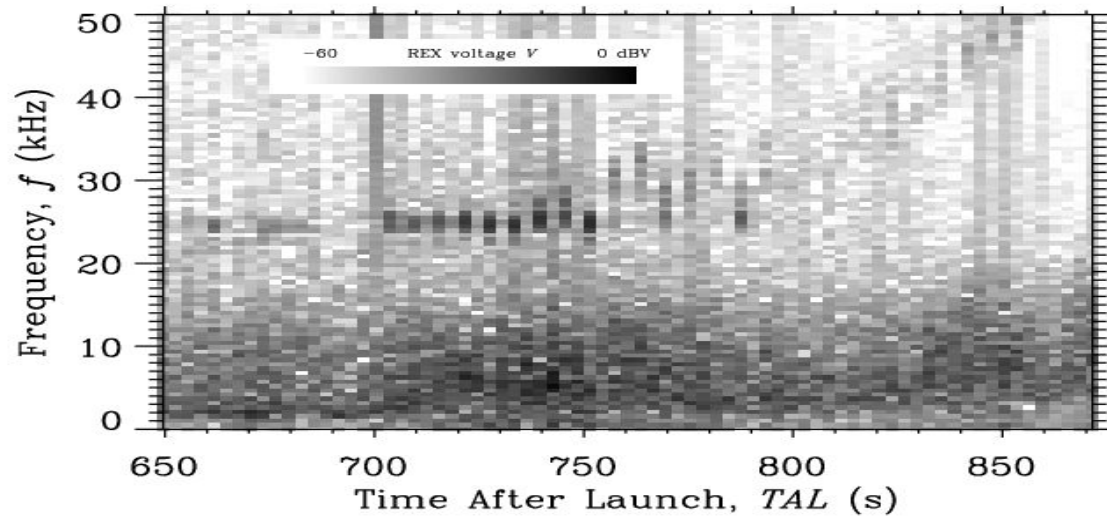
- Из приведенных формул следует, что формирование импульса излучения зависит от величины безразмерного времени  $t/q\tau$ . Например, установление гармонического (стационарного) сигнала, если  $T \rightarrow \infty$ , происходит на временах  $t/q\tau \gg 1$  после включения передатчика. Процесс формирования поля излучения вблизи резонансного конуса при его возбуждении прямоугольным импульсом достаточно сложен. Он зависит, конечно, от распределения заряда на антенне и ее геометрии. Это обусловлено тем, что в фиксированную точку вблизи резонансной поверхности приходит множество пространственных гармоник с различными значениями волнового числа  $k_\xi$  и групповой скоростью  $U_{gr} = (k_\xi q)^{-1}$ . Интерференция этих гармоник приводит к картине поля, описываемой приведенными формулами. Импульс резонансного поля не является прямоугольным, несмотря на то, что здесь учитывается только линейный член разложения дисперсионного соотношения по частоте, т.е. дисперсионное расплывание не учитывается. Структура поля в фиксированной точке пространства  $(\tau, \xi)$ , в момент времени  $t$  определяется суперпозицией пространственных гармоник с волновыми числами, лежащими в интервале от нуля (в квазистатическом приближении при  $k_\xi \rightarrow 0$ ) до  $k_\xi \rightarrow \infty$  и в интервале от  $k_\xi = t/q\tau$  до  $k_\xi = (t - T)/q\tau$ . Так как максимум  $k_\xi$  в пространственном спектре источника приходится на гармоники с характерным волновым числом  $k_\xi = (t - T)/q\tau$ , характерное время формирования импульса резонансного поля в точке равно времени группового запаздывания этих гармоник  $t_* \approx q\tau / L$ . Разумеется, формулы для электрического поля справедливы лишь при достаточно больших временах, соответствующих приходу в точку наблюдения коротких (электростатических) волн, которые и определяют структуру поля.

Численные графики амплитуды огибающей импульса в условиях ракетного эксперимента OEDIPUS-C.

Левый рисунок соответствует  $TAL = 855s$ , длительность импульса  $T = 0.3ms$  равна 10 единиц безразмерного времени;

Правый рисунок соответствует  $TAL = 930s$ , длительность импульса  $T = 0.3ms$  равна 30 единиц безразмерного времени.





Spectrogram of the 25 kHz signal received near the resonance cone, the strong signal with clearly modulated amplitude between 700-750 s is of interest here

- In case of a quasi-continuous wave incident on the antenna in a narrow solid angle around its group velocity direction it is necessary to transform from the wave vector space to the coordinate space with the aid of the relation

$$W_k(\omega, \mathbf{k}) \Delta\omega \Delta\Omega_* = \Pi_{gr} \Delta\Omega_* (\Delta\Omega_{gr} \cos \mathbf{k} \wedge \mathbf{v}_{gr})^{-1}$$

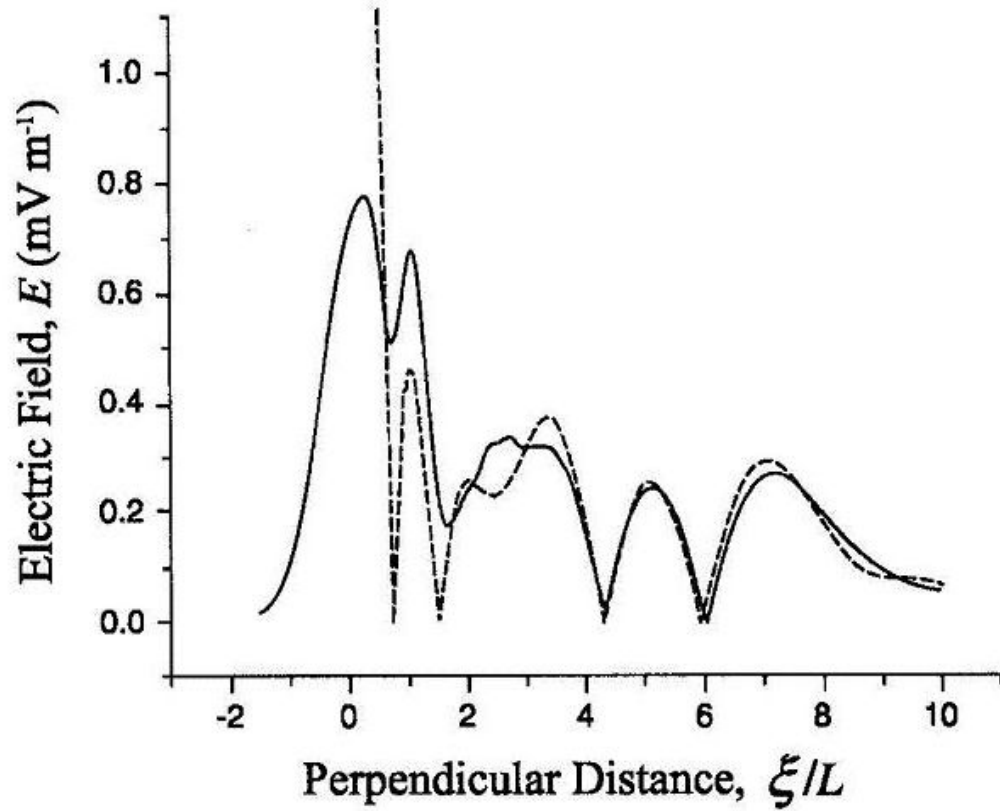
The angle between phase and group velocity is obtained from wave number surfaces defined by the dispersion equations

$$k_{\perp}^2 = k_z^2 \omega_p^2 / \omega^2 + D^2 k_z^4 - \omega_p^2 / c^2$$

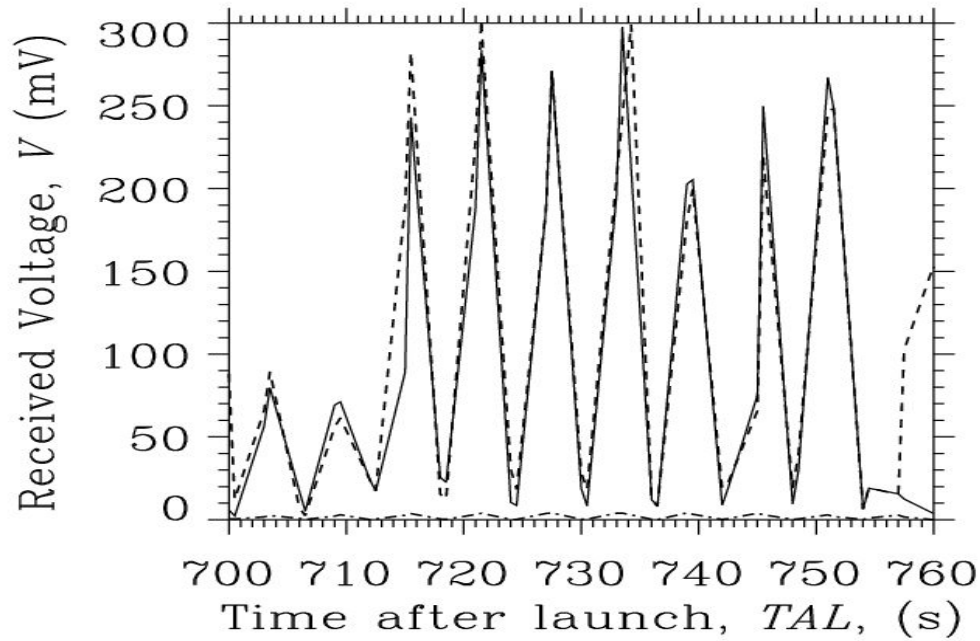
for lower oblique resonance waves, and by

$$(\omega - k_z u)^2 - k_z^2 v_T^2 - k_{\perp}^2 v_T^2 - \omega_p^2 = 0$$

for Langmuir waves in a streaming plasma



Electric field excited around the resonance cone by the transmitter, at the receiving point

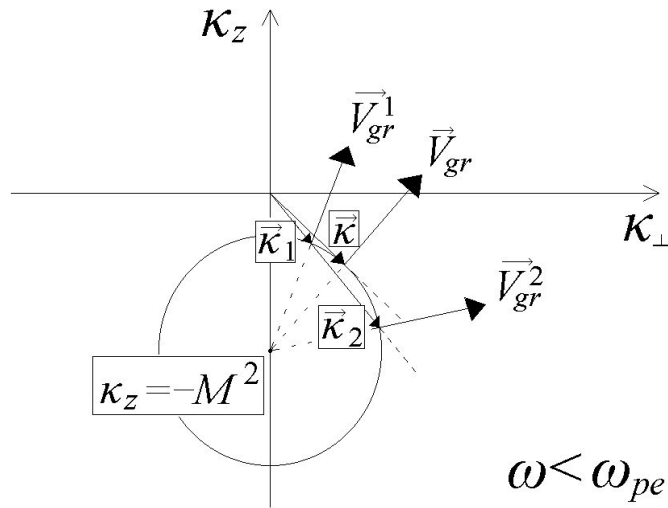
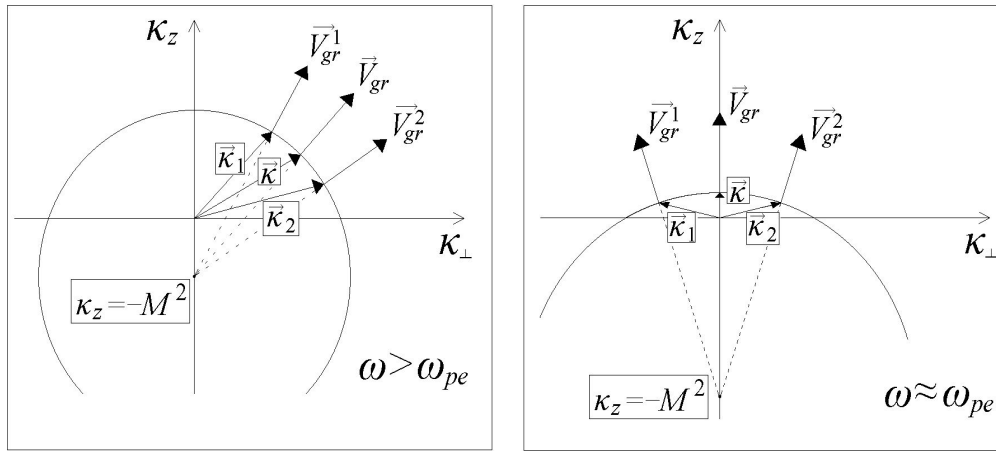


Observed (solid line) and theoretical (broken and dot-dash lines) open circuit voltage  $V$  on the receiving antenna versus time at 25 kHz, 'dot-dash' (close to the bottom) from conventional theory, 'broken' from the novel approach

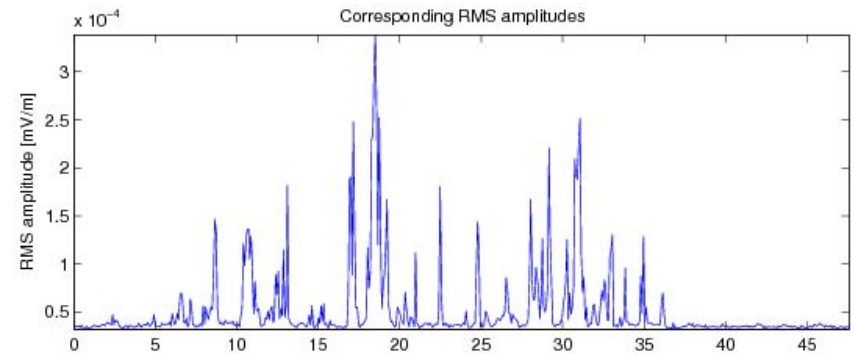
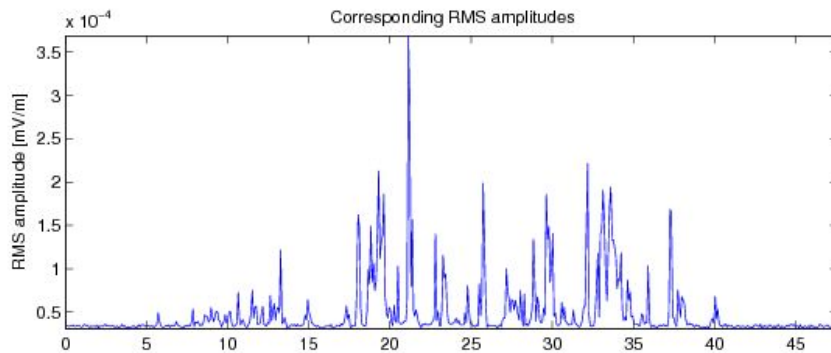
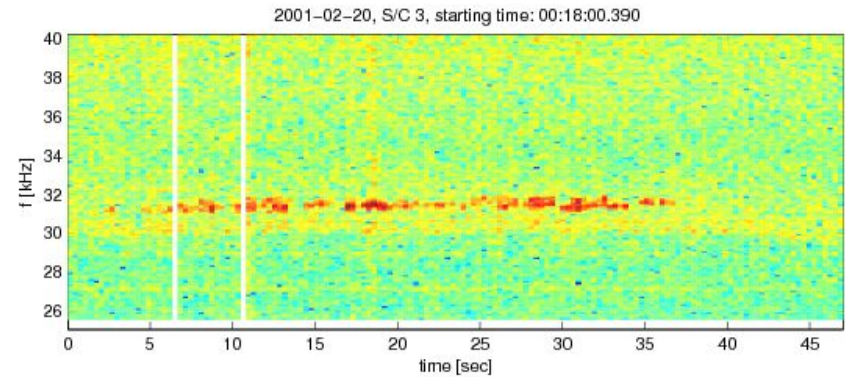
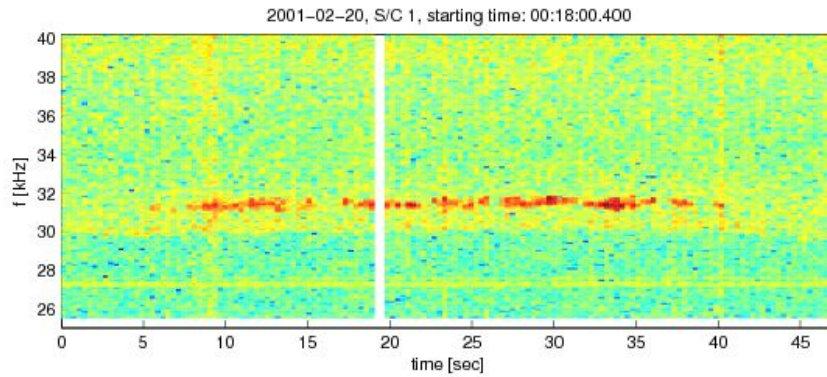


This result confirms what was inferred from the OC experiment, namely that **the effective length of an antenna can exceed substantially its geometrical length**, in this particular case observed at 25 kHz,  $L_{eff} \sim 30 L$ .

The open circuit voltage reflects the multiplication of radiation patterns of both the transmitting and the receiving antennas. In our case of V-dipoles each pattern shows five resonance cones emanating from the four antenna tips and the gap. This means that due to spinning of payloads the recorded voltage changes rapidly between maxima and minima on time scales of about 1 s, which results in remarkably good agreement of experiment and theory both in amplitude and spin phase, taking into account that we are looking at one minute of space measurement.



Wave number surfaces of Langmuir waves in a streaming solar wind



Spectrogram showing a narrow band emission at 31 kHz with an amplitude well above the quasi-thermal noise with cutoff at 30 kHz (upper panel), and its waveform (lower panel), on the two CLUSTER spacecraft, SC1 is at a distance of 608 km downstream and to the north of SC3

## REFERENCES

- [1] H.G. James, "Dipole measurement of waves in the ionosphere," *Lecture Notes in Physics*, vol. 687, pp. 191-210, 2006.
- [2] Y.V. Chugunov, E.A. Mareev, V. Fiala and H.G. James, "The transmission of waves near the lower oblique resonance using dipoles in the ionosphere," *Radio Sci.*, 38(2), 1022, doi:10.1029/2001RS002531, 2003.
- [3] Yu.V. Chugunov and V. Fiala, "Effective length of a receiving antenna in a streaming plasma," *IEEE Trans. Antennas Propag.* 54, no 10, pp. 2750-2756, 2006.
- [4] Yu.V. Chugunov, "Receiving antenna in a magnetoplasma in the resonance frequency band," *Radiophys. Quantum Electronics*, 44, pp.151-160, 2003.