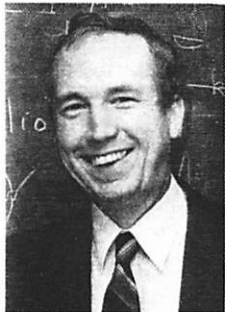


10 Yrs of Helios, 20
Yrs of US-Germany
Cooperation in Space

ed by H. Porsche
1984



Gurnett



Anderson

Plasma Waves in the Solar Wind: 10 Years of HELIOS Observations

D. A. Gurnett and R. R. Anderson
Department of Physics and Astronomy
The University of Iowa
Iowa City, IA 52242

Elektronen und Ionen sind im Plasma des interplanetaren Raums frei beweglich. Sie können in vielfältiger Weise Schwingungen ausführen und dabei Wellen anregen. Solche Schwingungen und Wellen übernehmen in dem sehr dünnen Plasma, in dem gegenseitige Stöße zwischen den Teilchen höchst selten sind, die Rolle von Energieüberträgern und sorgen für Temperaturengleich. Um solche Schwingungen und Wellen beobachten zu können, ist HELIOS mit einer 32m langen Meßantenne ausgestattet. Sie ist der Wellensensor für drei Empfänger, die den Frequenzbereich von ungefähr 10 Hz bis 3 MHz abdecken (Experimente 5a, 5b und 5c). Die Antenne spricht auf elektrische Feldschwingungen an. Magnetische Feldschwingungen werden vom Induktionsspulen-Magnetometer (E4) registriert.

Drei prinzipielle Typen von Plasmawellen wurden von der Meßantenne empfangen: (1) elektromagnetische Wellen, die sich durch den freien Raum hindurch ausbreiten, (2) Elektronen-Plasma-Schwingungen, (3) ionenakustische Schwingungen und Wellen.

Elektromagnetische Wellen (1) sind als Licht oder als Radiowellen – je nach ihrer Frequenz und Wellenlänge – allgemein bekannt. Im Plasma können sie sich nur dann fortpflanzen, wenn ihre Frequenz höher ist als eine Grenzfrequenz f_{pe} , die man Plasmafrequenz nennt. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Nur wenn ihre Frequenz knapp über der Plasmafrequenz liegt, wird die Wellengeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) höher als die Lichtge-

I. Introduction

Previously in this book the reader has been introduced to the idea of a plasma, and to a solar plasma called the solar wind.

Because both the electrons and ions are free to move in a plasma, a wide variety of waves can exist in the solar wind. These waves are called plasma waves. Since the early days of the discovery of the solar wind it has been thought plasma waves play an important role in controlling dynamical processes in the solar wind. Because collisions are extremely rare in the tenuous solar wind, plasma waves play a role similar to collisions in an ordinary gas by scattering particles and providing the dissipation necessary to achieve thermal equilibrium. To detect plasma waves the HELIOS spacecraft included a 32 meter tip-to-tip dipole antenna for the electric field of plasma waves, and a search coil magnetometer for detecting magnetic fields. The signals from the electric antenna were analyzed by three instruments which covered the frequency range from about 10 Hz to 3 MHz. Another instrument analyzed the signals from the search coil magnetometer. In this paper we review results obtained from the HELIOS electric field measurements.

Before discussing the results, it is useful to review the types of waves that can exist in a plasma. Three principal types of plasma waves were detected by the electric field instruments on HELIOS: (1) the free space electromagnetic mode, (2) the electron plasma oscillation mode, and (3) the ion acoustic mode.

The free space electromagnetic mode is the usual electromagnetic mode in free space, of which light and radio waves are common examples.

The electron plasma oscillation is an almost purely oscillatory mode in which the electrons vibrate around their equilibrium position while the ions remain at rest. The resulting charge oscillation produces an electric field but no magnetic field. For this reason these waves are sometimes called electrostatic waves.

The ion acoustic mode is very similar to a sound wave in an ordinary gas, except that the electric field transfers the wave momentum instead of collisions. In contrast to electron plasma oscillations, both the electrons and ions participate in the wave motion. Because of the large inertia of the ions, the propagation speed of the ion acoustic mode is quite slow, normally much less than the solar wind speed, which is typically about 400 km/sec. As in the case of electron plasma oscillations the ion-acoustic mode is electrostatic, with no magnetic field.

Because the electron density decreases with increasing heliocentric radial distance, the laws of physics require that both the electron and ion plasma frequencies decrease with increasing radial distance from the sun. The resulting radial variation is shown in figure page 101. As can be seen the electron plasma frequency, which is the characteristic frequency of electron plasma oscillations and the low frequency limit of the free space electromagnetic mode, increases from

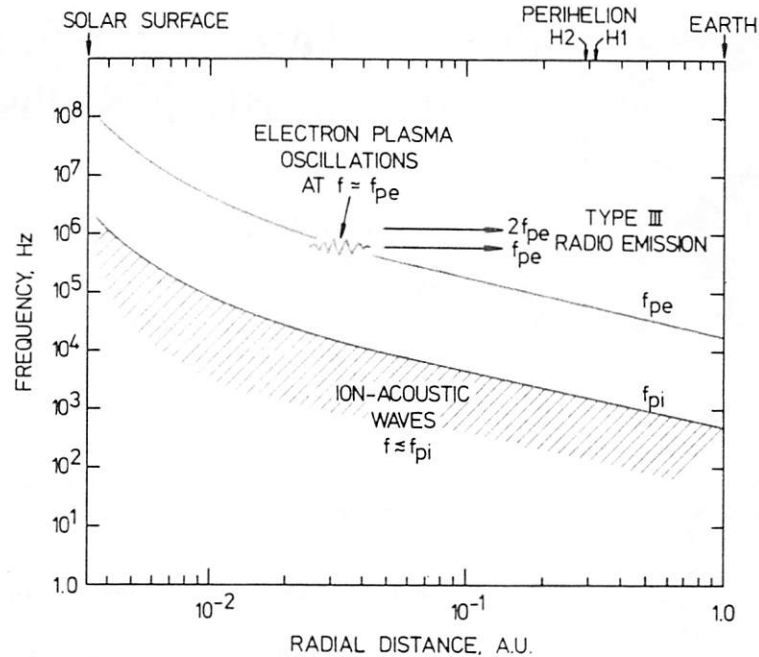
schwindigkeit. Die Plasmafrequenz hängt von der Zahlendichte der Elektronen im Plasma ab. In Erdbahnnähe liegt die Plasmafrequenz bei ungefähr 20kHz, also im Bereich der längsten Radiowellen.

Bei den Elektronen-Plasma-Schwingungen führen die Elektronen Oszillationen um die als ruhend angenommenen, viel schwereren Ionen des Plasmas aus. Die resultierenden Schwingungen der elektrischen Ladung erzeugen elektrische, aber keine magnetischen Felder (elektrostatische Wellen).

Ionenakustische Wellen haben ähnliche Eigenschaften wie Schallwellen in einem Gas, abgesehen davon, daß das elektrische Feld für den Wellenimpuls verantwortlich ist und nicht die gegenseitigen Teilchenstöße. Im Gegensatz zu den Elektronen-Plasma-Schwingungen nehmen an den ionenakustischen Wellen Elektronen und Ionen teil. Die Geschwindigkeit ist niedrig, normalerweise viel kleiner als die Sonnenwindgeschwindigkeit. Ionenakustische Wellen können sich ausbreiten, solange ihre Frequenz kleiner ist als die Ionen-Plasmafrequenz f_{pi} die ihrerseits im allgemeinen nur $\frac{1}{30}$ der Elektronen-Plasmafrequenz f_{pe} ausmacht.

Mit wachsendem Abstand von der Sonne nimmt die Plasmadichte ab. Dadurch werden sowohl die Elektronen-Plasmafrequenz f_{pe} als auch die Ionen-Plasmafrequenz f_{pi} beeinflusst. Die ungefähre Änderung mit dem Abstand gibt Abb. Seite 101. Gegen die Sonne hin wächst die Elektronen-Plasmafrequenz von etwa 20 kHz bis zu mehreren hundert MHz in der Nähe der Sonnenoberfläche an, entsprechend 500 Hz bis einige MHz für die Ionen-Plasmafrequenz.

Durch starke Elektronen-Plasmaschwingungen, die besonders dann entstehen, wenn ein größerer Schwarm schneller Elektronen von der Sonne aus durch den Raum und damit durch das Plasma fliegt, werden elektromagnetische Wellen angeregt (Wellenausbrüche vom Typ III; von Kellogg genauer beschrieben im nächsten Kapitel). Abb. Seite 102 oben zeigt Elektronen-Plasmaschwingungen, die im Zusammenhang mit einem Typ-III-Ausbruch beobachtet wurden. Wie



Darstellung der Änderung der Elektronen-Plasmafrequenz f_{pe} und der Ionen-Plasmafrequenz f_{pi} mit dem Abstand von der Sonne für typische Sonnenwindverhältnisse zwischen Sonnenoberfläche und Erdbahn.

A plot of the radial variation of the electron plasma frequency, f_{pe} , and the ion plasma frequency, f_{pi} , for a representative solar wind model from the surface of the sun to the orbit of the earth.

about 20 kHz at the earth's orbit to several hundred MHz at the solar surface. The ion plasma frequency, which is the upper frequency limit of the ion acoustic mode, varies from about 500 Hz at the earth's orbit to a few MHz at the solar surface.

II. Electron Plasma Oscillations and Type III Radio Bursts

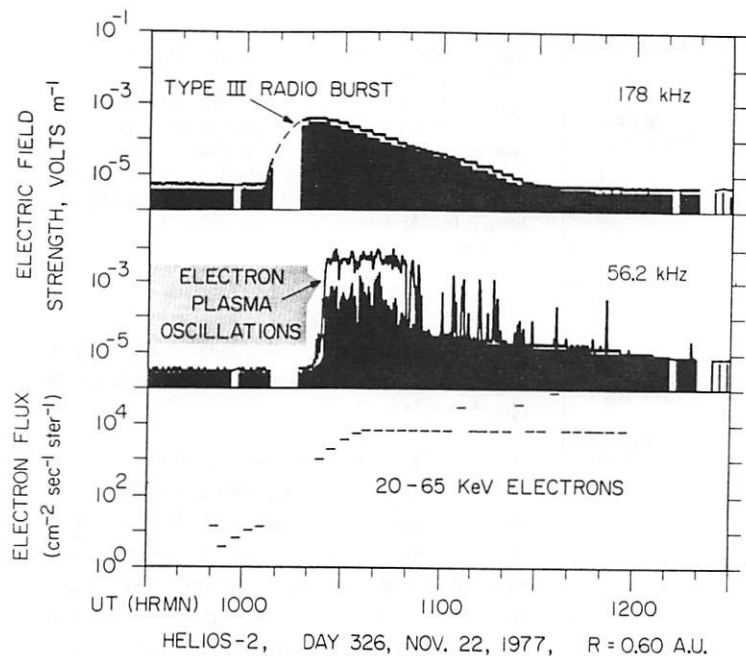
Type III solar radio bursts are produced by solar flares at the sun and are characterized by an emission frequency that decreases with increasing time according to a long standing theory, first proposed by Ginzburg and Zheleznyakov (1958), the generation of type III bursts is a two-step process in which (1) electron plasma oscillations are first produced by energetic electrons ejected from a solar flare, and (2) the energy in the plasma oscillation is converted to electromagnetic radiation via a nonlinear coupling process. One of the first notable accomplishments of the HELIOS plasma wave experiment was the confirmation of this basic mechanism.

An example from HELIOS 2 illustrating the simultaneous occurrence of a type III radio

burst, electron plasma oscillations, and energetic (20 – 65 keV) electrons from a solar flare is shown in figure on page 102 top. This event occurred on November 22, 1977, following a solar flare that started at 09:46 UT.

According to current ideas the electron plasma oscillations are excited by a beam-plasma instability as the high speed solar wind electrons stream outward from the sun. These plasma oscillations then produce radio waves at a fundamental frequency and the second harmonic via nonlinear coupling to the free space electromagnetic mode. This process is indicated schematically in figure page 101. For a further discussion of the generation of type III bursts, see the accompanying paper by Kellogg.

During the first 10 years of HELIOS observations a total of 238 electron plasma oscillation events were observed in association with type III radio bursts. Most of these events occurred around the time of maximum solar activity, from about 1977 to 1982. The frequency of the plasma oscillation shows a clear tendency to increase with decreasing radial distance from the sun, as would be expected from figure page 101. This trend is

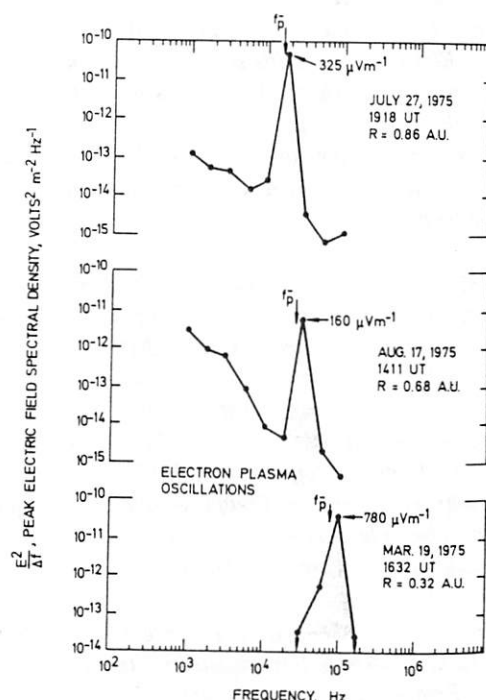


Beispiel für das gleichzeitige Auftreten eines solaren Radio-Ausbruchs vom Typ III, von Elektronen-Plasmaschwingungen und höherenergetischen Elektronen einer Sonneneruption. Man nimmt an, daß die Elektronen-Plasmaschwingungen durch Wechselwirkungen zwischen dem von der Sonne ausgestoßenen Elektronenstrahl und dem Sonnenwindplasma hervorgerufen werden. Die Radiowellen des Ausbruchs sind eine Folge der Plasmaschwingungen, verursacht durch komplizierte Wechselwirkungsprozesse.

An example illustrating the simultaneous detection of a type III solar radio burst, electron plasma oscillations, and energetic electrons arriving from a solar flare. The electron plasma oscillations are believed to be produced via a beam-plasma instability caused by the energetic electrons streaming out from the sun, and the type III radio emission is produced from the electron plasma oscillations via a nonlinear coupling process.

Spektrale Messungen des elektrischen Felds zeigen die Änderung der Elektronen-Plasmafrequenz mit dem radialen Abstand von der Sonne.

Electric field spectrum measurements showing the variation of the electron plasma frequency with radial distance from the sun.



sehr die Frequenz der Elektronen-Plasmaschwingungen bei Annäherung an die Sonne zunimmt, zeigt Abb. Seite 102 unten. Auch die Intensität der Elektronen-Plasmaschwingungen scheint bei Annäherung an die Sonne anzusteigen. Solche Plasmaschwingungen treten nicht notwendigerweise nur dann auf, wenn ein Typ-III-Strahlungsausbruch beobachtet wird. Weit häufiger sind eng lokalisierte Schwingungsgebiete; sie treten gelegentlich mehrmals am Tag auf und stehen nicht in Verbindung mit der Aussendung von elektromagnetischen Wellen.

illustrated in figure page 102 bottom which shows the spectrum of electron plasma oscillation events detected at 0.86, 0.68, and 0.32 A.U. The decrease in the electron plasma frequency with increasing radial distance accounts for the decreasing emission frequency of the type III burst as the solar flare electrons move outward from the sun. The intensity of the electron plasma oscillation also tends to increase with decreasing radial distance from the sun. The increase in the field strength with decreasing radial distance probably explains why type III radio bursts tend to be more intense at higher frequencies, which are generated closer to the sun.

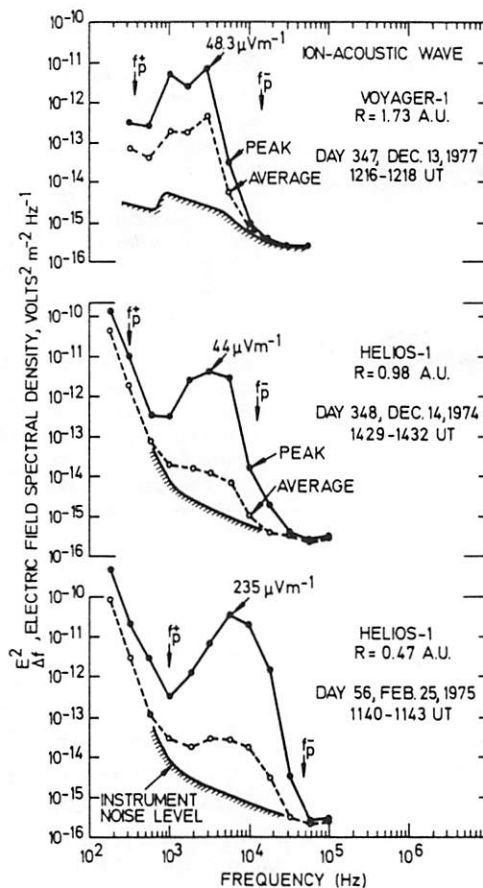
Electron plasma oscillations are also observed that are not associated with any detectable type III radio emission. These types of plasma oscillations occur quite frequently, sometimes several times per day. The absence of a detectable radio emission from these events indicates that the plasma oscillations are probably quite localized, and not occurring simultaneously over a large volume of the solar wind, as in the case of the type III related events.

In den ersten Monaten der Mission HELIOS 1 wurden erhöhte elektrische Feldintensitäten im Sonnenwind entdeckt. Die Frequenzen lagen zwischen der Ionen- und der Elektronen-Plasmafrequenz in Perioden, die zwischen einigen Stunden und mehreren Tagen lagen. In Abb. Seite 103 sind die Frequenzspektren für drei verschiedene Abstände von der Sonne aufgetragen (die oberste der drei Kurven ist von einer VOYAGER-Beobachtung entliehen, um die Abhängigkeit vom Sonnenabstand besser darstellen zu können). Der Trend ist klar erkennbar.

Über die zehn Jahre seit der Entdeckung dieser Art Rauschen konnte überzeugend nachgewiesen werden, daß es sich dabei um ionenakustische Wellen handelt. Diese müßten immer im Frequenzbereich unter der Ionen-Plasmafrequenz liegen, während sie von HELIOS bei Frequenzen registriert wurden, bei denen sie sich eigentlich nicht ausbreiten können. Die Lösung des Problems bietet der Doppler-Effekt. Er ist dafür verantwortlich, daß die Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger zu Frequenzverschiebungen führt. Im vorliegenden Fall ist der Sender das Plasma, das die fraglichen Wellen erzeugt. Berücksichtigt man die Sonnenwindgeschwindigkeit und die Bahngeschwindigkeit von HELIOS und rechnet die zu erwartende Frequenzverschiebung aus, so ergeben sich tatsächlich Frequenzen, die geringer sind als die Ionen-Plasmafrequenz. Trotz des langen, ausgedehnten Studiums dieses Phänomens sind noch nicht alle Einzelheiten des Entstehens ionenakustischer Wellen klar. Zwei Faktoren scheinen besonders wichtig zu sein, das Verhältnis der Temperatur der Elektronen zu der der Ionen T_e/T_i (die beiden können stark verschieden sein, weil so gut wie keine Stöße zwischen einzelnen Teilchen auftreten), und der Wärmefluß der Elektronen Q_e . Falls sich herausstellen sollte, daß tatsächlich der Wärmefluß der entscheidende Anregungsfaktor dieser Wellen ist, so muß folgen, daß ionenakustische Wellen eine wichtige Rolle spielen für den Wärmetransport des Sonnenwinds.

Abb. Seite 104 zeigt eine interplanetare Stoßwelle, wie sie von einem der Radiowellenempfänger registriert wurde. Wie bereits auf den Seiten 74 bis 78 und 86 geschildert, stellen Stoßwellen drastische Störungen der sonst einigermaßen geordneten Verhältnisse im interplanetaren Raum dar. In den ersten Monaten der Mission traten sehr wenige solcher Ereignisse auf. Später jedoch, besonders im Maximum des Sonnenfleckenzyklus, waren sie recht häufig.

Die Stoßwelle von Abb. Seite 104 wurde am 30. März 1976, 17:44:00.5 Uhr registriert. In den meisten Frequenzkanälen setzte plötzlich starke



III. Ion Acoustic Waves in the Solar Wind

In the first few months of operation of HELIOS 1, enhanced electric field intensities were discovered in the solar wind at frequencies between the ion and electron plasma frequencies. Typically, two or three periods of enhanced electric field intensities occur during each solar rotation, separated by periods of relatively low intensity. The periods of enhanced activity usually last from a few hours to several days. Subsequent investigations showed that the frequency spectrum of the electric field fluctuation depended on the radial distance from the sun, generally increasing in frequency, intensity and occurrence with decreasing distance from the sun. A representative set of electric field spectrums taken at 1.73, 0.98, and 0.47 AU, is shown in figure page 103. The spectrum at 1.73 AU is from VOYAGER 1. The

Typische Spektren der Feldstärke ionenakustischer Wellen in verschiedenen Abständen von der Sonne. Man beachte die Anstiegstendenz der Frequenz und der Intensität bei der Annäherung an die Sonne.

Typical spectra of the electric field strength of ion acoustic waves at various distances from the sun. Note the tendency for the frequency and intensity to increase closer to the sun.

trend toward increasing intensity and frequency with decreasing heliocentric radial distance is clearly evident.

Over 10 years since the discovery of this noise, a fairly convincing case has been made that these waves are ion acoustic waves. At first glance it does not appear that the spectrum is consistent with an ion acoustic wave interpretation, since the peak in the spectrum occurs well above the ion plasma frequency, whereas the ion acoustic mode can only propagate at frequencies below the ion plasma frequency. This difficulty was resolved by Gurnett and Anderson. Because the solar wind velocity is much greater than the ion acoustic speed, they concluded that the frequency should be almost entirely determined by the Doppler shift caused by the motion of the solar wind. The Doppler shift depends on wavelength and is given by $f = V/\lambda$, where λ is the wavelength of the waves.

The minimum wavelength varies from about 60 meters at the orbit of the earth to 20 meters at the HELIOS perihelion. The corresponding maximum frequencies, assuming a nominal solar wind velocity of 400 km/sec, are 6.6 and 20 kHz. These maximum frequencies are seen to be in excellent agreement with the upper cutoff frequency of the observed electric field spectrum.

Even after ten years of study the origin of the solar wind ion acoustic waves is not yet clearly established. Two factors, the electron to ion temperature ratio, T_e/T_i , and the electron heat flux, Q_e , seem to control the intensity of the ion acoustic waves.

These dependences support a theory, first by Forslund (1970), in which the ion acoustic waves are excited by the electron heat flux in the solar

enintensität ein. Bemerkenswert ist jedoch, bei Frequenzen um 30kHz bereits vor dem reffen der eigentlichen Stoßwelle erhöhte stärken registriert wurden. Diese erhöhte vität wird als Elektronen-Plasmaschwin- g gedeutet ähnlich der, die auch bei Typ-III- brüchen beobachtet wird. Anscheinend strö- einige Elektronen noch schneller als die welle in das umgebende Plasma des Son- winds hinein. Die Schwingungen, die da- h breitbandig in den meisten Frequenzkanä- einsetzen, sind ihrer Natur nach ionen- stische Wellen. Ihre Intensität ist jedoch mtlich höher als die der vorher besproche- Wellen dieses Typs. Gelegentlich treten auch he Wellen bereits vor der eigentlichen Stoß- e auf. Ihr Auftreten hängt von der Richtung Magnetfeldes ab: steht es ungefähr senkrecht Stoßwellenfront, so können auch Ionen in Bereich vor der Front eindringen und dort vingungen anregen. Steht das Magnetfeld eführ parallel, so ist dieser Fluß von Teil- i unterbunden; es treten keine ionenakusti- n Wellen vor der Stoßfront auf. Der genaue hanismus der Anregung ionenakustischer len vor der Stoßfront ist allerdings noch t in allen Einzelheiten bekannt. Man kann ch von HELIOS 1 weitere Meßdaten erhof- die dazu beitragen werden, einige der vie- offenen Fragen der Dynamik des interplane- n Raums zu lösen.

Beispiel von Plasmawellen hervorgerufen durch interplanetare Stoßwellen. Man nimmt an, daß Elektronen-Plasmaschwingungen von Elektronen stammen, die in Bereich vor der Stoßwellenfront strömen. Der plötzliche Anstieg, der in den meisten Frequenzkanälen augenblick des Eintreffens der Stoßfront registriert wird, ist auf ionenakustische Wellen zurückzuführen. Diese Wellen len für die stoßwellen- ge Aufheizung des Plasmas verantwortlich.

An example of plasma waves produced by an interplanetary shock. The electron plasma oscillations are believed to be produced by electrons streaming into the region ahead of the shock. The intense burst of noise at the shock crossing are believed to be ion acoustic waves. These waves are thought to heat the plasma at the shock.

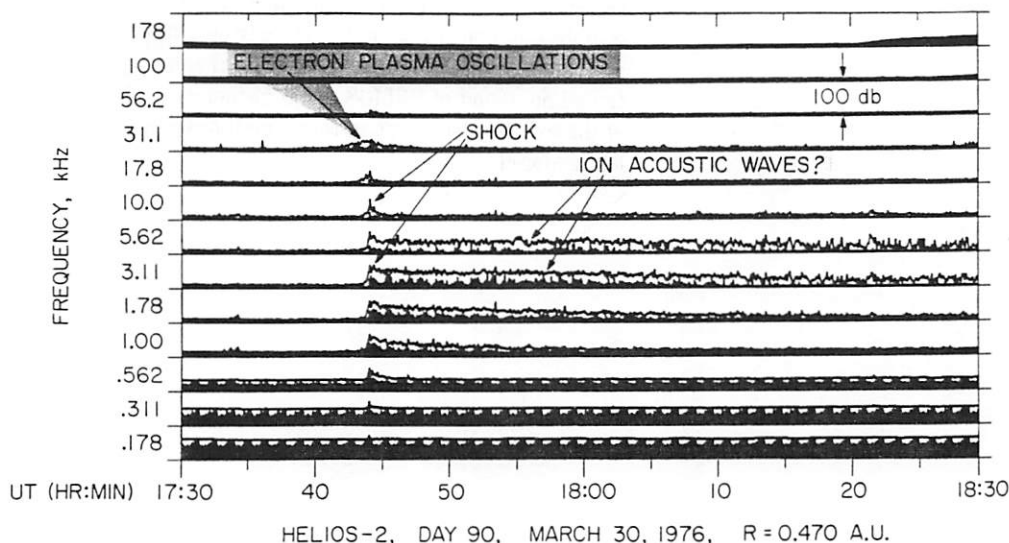
wind. If the electron heat flux is the origin of enhanced acoustic wave intensities, it is possible that these waves may play an important role in regulating the thermal conduction of heat away from the sun by the solar wind!

IV. Waves Associated with Interplanetary Shocks

Solar flares often produce shock waves that propagate through the solar wind out to the orbit of the earth. These shock waves are called interplanetary shocks and are almost always accompanied by enhanced plasma emissions. During the early part of the HELIOS mission interplanetary shocks were quite rare. However, later, around solar maximum, from about 1977 to 1982, many shocks were observed. The plasma wave signatures associated with these shocks are highly variable and depend on the detailed structure of the shock. A representative example is shown in figure page 104. This shock was detected by HELIOS 2 on March 30, 1976. The plasma wave signature in this case is quite straightforward and consists of a burst of electron plasma oscillations upstream of the shock and an abrupt broadband burst of electric field noise at the shock crossing, which was at 17:44:00.5 UT \pm 0.5 sec. The broadband burst of noise gradually decays downstream of the shock over a period of half an hour or more.

Electron plasma oscillations are frequently observed upstream of the earth's bow shock and are known to be caused by a beam of electrons streaming into the solar wind from the shock. The mechanism of exciting the plasma oscillations is essentially the same as the oscillations associated with type III radio bursts, except that the electrons originate from the shock instead of the solar flare. In the region close to the sun, electron plasma oscillations of this type are believed to cause type II and type IV solar radio bursts via a nonlinear coupling process very similar to the generation of type III radio bursts. Interestingly enough, shock-associated electron plasma oscillations are quite rare in the HELIOS data. The March 30, 1976 event is one of the few shocks with upstream electron plasma oscillations. The reasons for the relatively low occurrence of upstream electron plasma oscillations ahead of interplanetary shocks is not completely understood, but is probably related to the lower Mach number of interplanetary shocks.

The intense broadband burst of electric field noise at the shock is observed on essentially every interplanetary shock detected by HELIOS. The shape of the spectrum of this noise is very similar to the spectrum of the ion acoustic noise described previously, but is usually more intense, sometimes reaching peak broadband field



strengths of several mV/m. Because of the similarity to the ion acoustic wave spectrum, it is generally believed that this noise is caused by ion acoustic waves generated in the shock. Studies of similar turbulence in the earth's bow shock indicate that this noise probably plays an important role in heating the plasma at the shock. Because particle collisions in the tenuous solar wind are extremely rare, some type of turbulent process must be present to provide dissipation and to heat the plasma at the shock.

V. Conclusions

This summary of results from the HELIOS plasma wave experiment demonstrates that this investigation has produced many important new results over the 10 year period since HELIOS 1 was launched. This investigation confirmed a basic theory for the generation of type III radio bursts that was first proposed over 20 years ago, and it revealed the existence of enhanced levels of ion acoustic wave turbulence in the solar wind. The long duration of the observations and the extended radial distance coverage provided a vast quantity of data on the temporal and radial variation of these and other plasma wave phenomena over almost an entire solar cycle. The results obtained show that the plasma processes occurring in the solar wind are very complicated and many important questions still remain to be answered. Hopefully, with the continued operation of HELIOS 1 and further study of the existing data some of these questions can be answered.