

科学衛星JIKIKEN (EXOS-B) による
プラズマ波動の総合*

大 家 寛**・森 岡 昭**

Summary of Terrestrial and Planetary Radio and Plasma Waves
Observed by the Initial Phase of JIKIKEN (EXOS-B)
Observations

By
Hiroshi OYA and Akira MORIOKA

Abstract: JIKIKEN (EXOS-B) was successfully launched on Sept. 16, 1978 into an orbit with initial apogee of 30,056km and perigee of 229km, with an inclination -31.1° ; the orbit is suitable for the investigation of the wave-particle interaction process near the plasmopause. The analog data transmission system is used; we can obtain fine structure of the dynamic spectrum in a frequency range from 10 kHz to 3 MHz. The important wave phenomena of the radio and plasma waves of the terrestrial and planetary origin are as follows.

- i) Auroral(Earth) kilometric radio waves;
- ii) Upper hybrid mode emissions;
- iii) $(n + \frac{1}{2})f_c$ emissions;
- iv) Narrowband emissions in VLF range;
- v) Planetary radio waves;

and

- vi) Solar type III out-bursts.

Preliminary studies to verify the wave particle interaction processes between the UHR mode waves and the energetic particles have also been carried out.

概 要

磁気圏波動粒子相互作用の解明を主要目的としたJIKIKEN衛星は1978年9月16日磁気圏深部まで達する楕円軌道に投入された。プラズマ波動の観測は、長いダイポールアンテナ (tip to tip 102 m) を用い広い周波数範囲をカバーしており、かつアナログテレメータ伝送により高分解能のデータが取得

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北大学理学部

される。衛星および各サブシステムの動作は極めて順調であり、E L F から H F 周波数にわたる広い周波数範囲において、磁気圏プラズマ波動、電磁波動現象の観測が行われている。本論では、初期の 6 カ月間の波動観測の結果をもとに、磁気圏内プラズマ波動、惑星および太陽電波の特性の概要をまとめて報告する。

1. 序

1978 年 9 月 16 日、JIKIKEN 衛星は、遠地点 30,056 Km, 近地点 229 Km の楕円軌道に投入された。M-3H-3 号の飛翔は全く完璧であり、予定通りの軌道で観測が行われることになった。

JIKIKEN 衛星観測の主要目標は、波動粒子相互作用の解明であるが、特に、初期の観測においては、波動及び粒子のそれぞれの独立した観測から観測を開始し、その結果をつき合せてゆく段階へもってゆくことになっている。ここでは、当初の 6 カ月間に得られた波動観測の結果をまとめて報告することにした。

まず、注目される諸波動現象は、

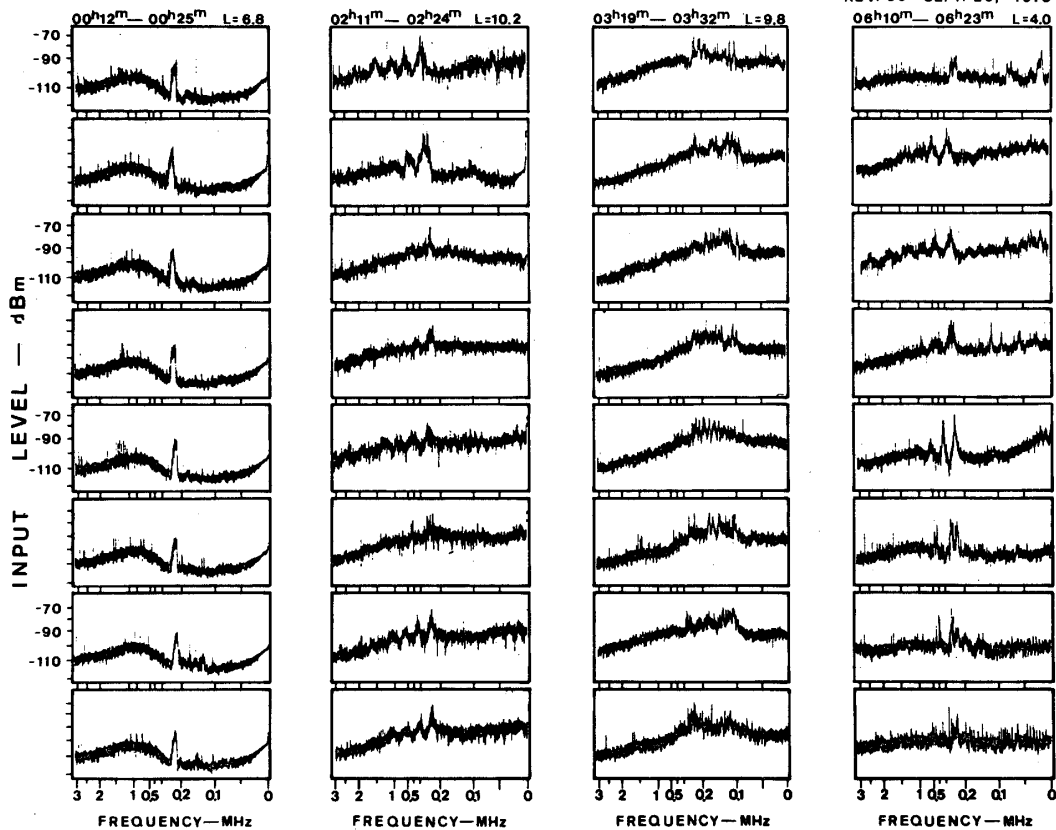
- i) オーロラキロメートル波
- ii) 高域ハイブリッドモード放射
- iii) $(n + 1/2) f_c$ 放射
- iv) ホイッスラー, コーラス, ヒス等の VLF 現象
- v) VLF 領域の狭帯域エミッション
- vi) 惑星電波
- vii) 太陽 III 型電波バースト

等であるが、本論では、iv) 以外の現象について報告する。

2. オーロラキロメトリック波動

観測された中でも最も顕著な現象は、オーロラキロメトリック放射である。第 1 図に、その一例を示す。これは、1978 年 9 月 29 日に観測されたものからの一例であるが、まず、一番左は、夜間プラズマシート内 ($L = 6.8$) で観測されたもので、この一連の現象の初期の状態、非常に静かな状態である。特徴的なのは、250 KHz 附近に鋭いピークが示されていることである。こうした現象は、オーロラの Break up と直接かかわりはないが、T K R に関する論文でも既に報告しているように、明らかに地球 4000~6000 Km の範囲でわずか 500 Km 程度の厚みのところから発生してくる放射である。この例では、250 KHz であるから、高度 6300 Km の点の高域ハイブリッド周波数と一致している。

第 1 図左の 2 行目は、かなりオーロラ現象が増大する Phase に入った時の様相を示す。まず、8 秒間毎に 8 個の連続した周波数掃引例を示したものであるが、激しく息づいている姿が明瞭に示されている。特にこの例の場合、低い周波数側に放射周波数帯域がぐっと伸びるとともに、高い周波数側には、複数個のピークを伴って発生してくるところに大きな特徴がある。この複数個のピークは、決して受信機内に生じた高調波ではなく、オーロラキロメトリック波動の発生している場所の電子サイクロトロン波の高調波関係の現象が混在して



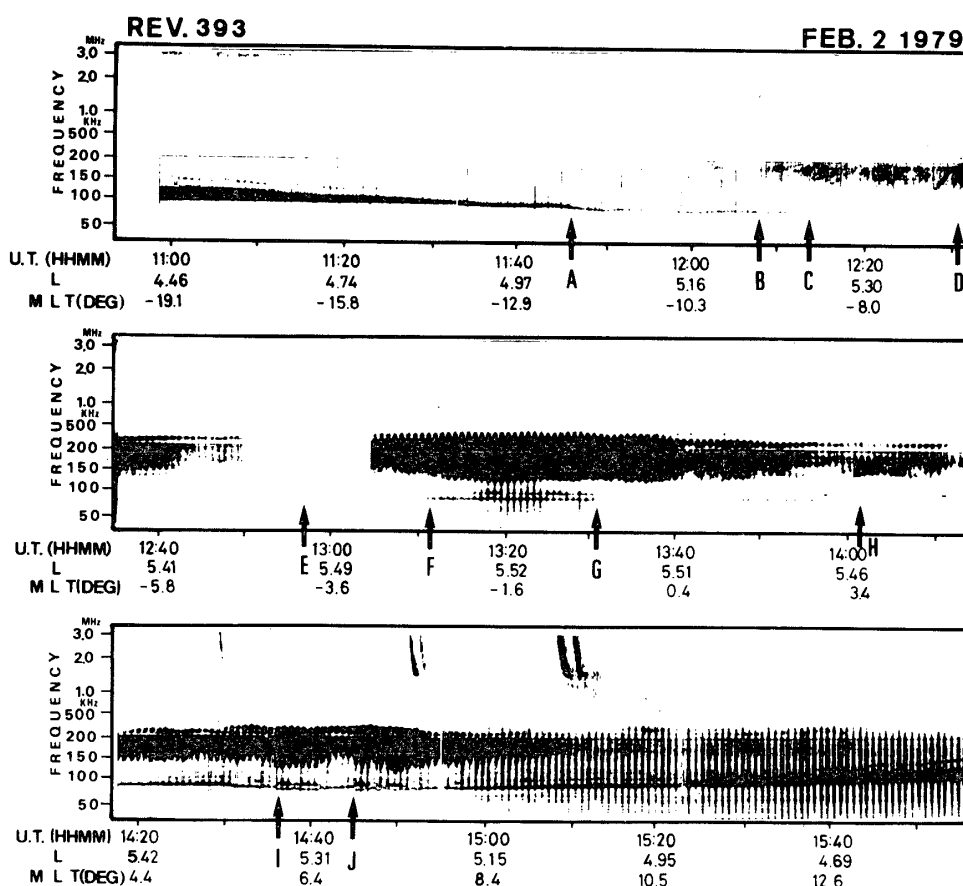
第1図 1978年9月29日、第35周回において観測されたオーロラキロメトリック放射のスペクトル。8秒間毎の8個の連続したスペクトルをオーロラキロメトリック放射の4つの phase について示す。左から順に初相、成長相、最盛相および終相におけるスペクトルの特性が示される。

いる。

なお、エミッションは50 KHz から800KHz にわたる広い範囲に広がっているが、これは、電波の発生領域が、13,000 Km から2,800 Km にまでも拡大していることを示している。第1図左から3番目のカラムには、この一連の現象の最盛期の状態である。全体にわたるスペクトルの広がりがあるが、特に100KHz から300KHz の付近で初期の場合の100～1000 倍の強度まで上昇している。一種の爆発現象である。このピークのゆらぎそのものが、オーロラ粒子の加速減の微妙な動きを表わしていて、今後、詳細な解析を進めることによってこの加速減のメカニズムや物理的な構造を明らかにすることが可能になる。

第1図の右端の行は、再びこの激しく活動したオーロラ活動が静まってゆく様相を示している。

以上のような状況を Dynamic Spectrum にしたものが第2図である。これは、1979年2月2日、Rev. 393 について明らかにしたものであるが、オーロラキロメトリック放射が長時間にわたって持続する様相が示されている。ここには、オーロラキロメトリック放射と同時に、in-situ に存在するUHR 波動も存在している。この2月2日の例では、Pi 2 で示され



第2図 1979年2月2日, 第393周回において観測された波動現象のダイナミックスペクトル. 衛星がプラズマ圏を出た12 hUTよりオーロラキロメトリック放射が周波数120 KHz から500 KHzの帯域で観測されている. 矢印(A~J)はPi2で示される極域磁気嵐のstart時を示す. 観測期間を通じて80 KHzから150 KHzの帯域で連続的に出現するバンドは高域ハイブリッド波動. UT 14^h 30^m, 14^h 50^mおよび15^h 08^m付近にみられるエミッションは太陽タイプIII型バースト.

る磁気嵐のstart時を同時に記入しているが, オーロラキロメトリック放射のスペクトルの動きは, このPi2の発生点と何らかの関連をもっている.

3. 高域ハイブリッドモード放射

高域ハイブリッドモード, すなわちUHR (Upper Hybrid Resonance)波動は, $\sqrt{f_p^2 + f_c^2}$ (f_p : プラズマ周波数, f_c : 電子サイクロトロン周波数) で発生するのであり, 波動励起の理論からはチェレンコフ型の放射が起りやすいところとして理解されていたが, その後の研究では, 静電的プラズマ波動と, 電磁波を結ぶ重要なチャンネルであることが見い出され [1] プラズマ圏, 磁気圏を問わず低エネルギー粒子が, プラズマ波動を生む, 重要なチャンネルとなっている. すなわち, Cerenkov の条件を満たす点として, 流入

するビームの速度を \vec{V} として,

$$\frac{W}{\vec{k}} = \vec{V}$$

となる。ただし、 W 、 \vec{k} はそれぞれ角周波数、波数ベクトルである。このチャンネルは非常に広い波数に対して分布しているため、($10^{-4} < kR < 0.1$ ただし R はサイクロトロン半径) 広範囲のエネルギー範囲の粒子現象のことが coupling してくる。この coupling する領域は、

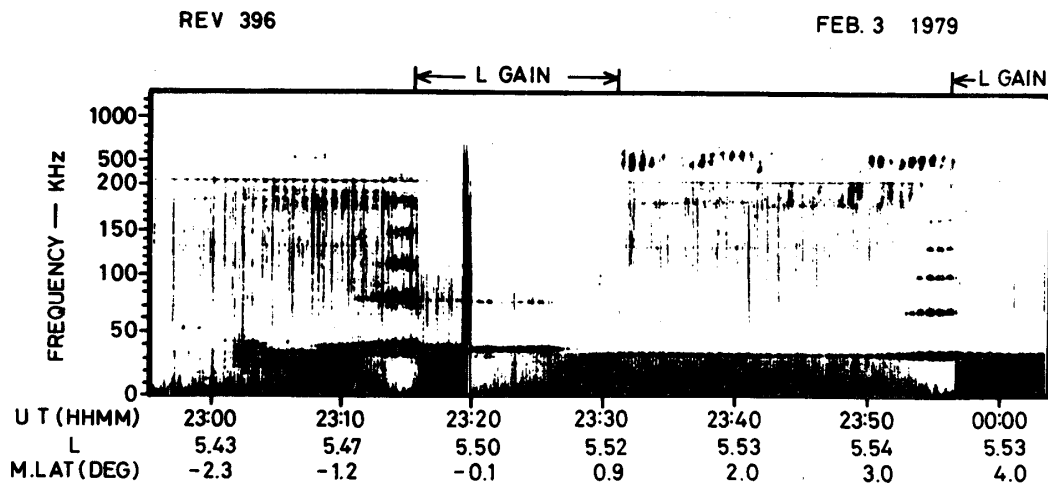
$$f_p < f < f_{UHR} \quad (f_p > f_c \text{ の場合})$$

$$\text{あるいは、} f_c < f < f_{UHR} \quad (f_c > f_p \text{ の場合})$$

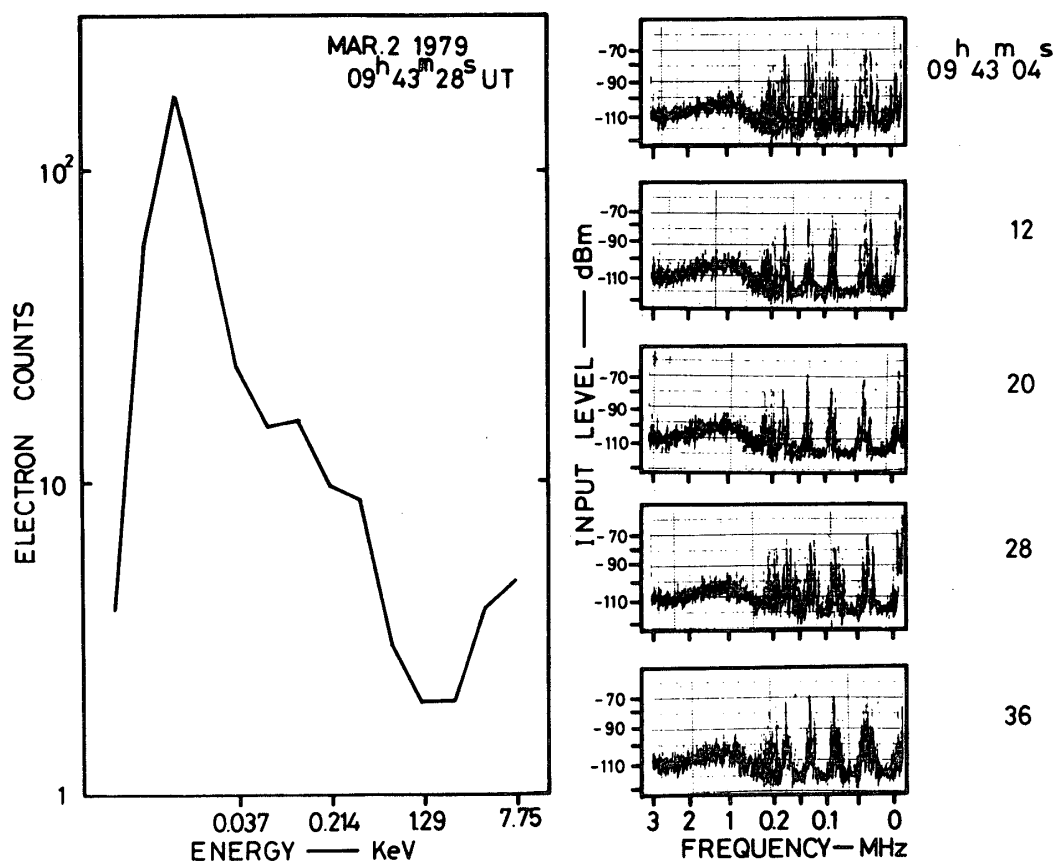
において発生する。

第2図に、既にUHR放射が広い範囲にわたって分布していることが示されている。例えば、第2図では、11時から12時半まで長時間にわたり続いている。さらに、このUHR放射現象を、1979年2月3日の場合について、第3図にUHR放射の一部を拡大して示したものである。UHRエミッションは、30~40KHzに広がっている。

顕著なのは、エミッションが強くなり、受信機内で飽和現象を引き起している点で、非常に強いUHR波が発生している。



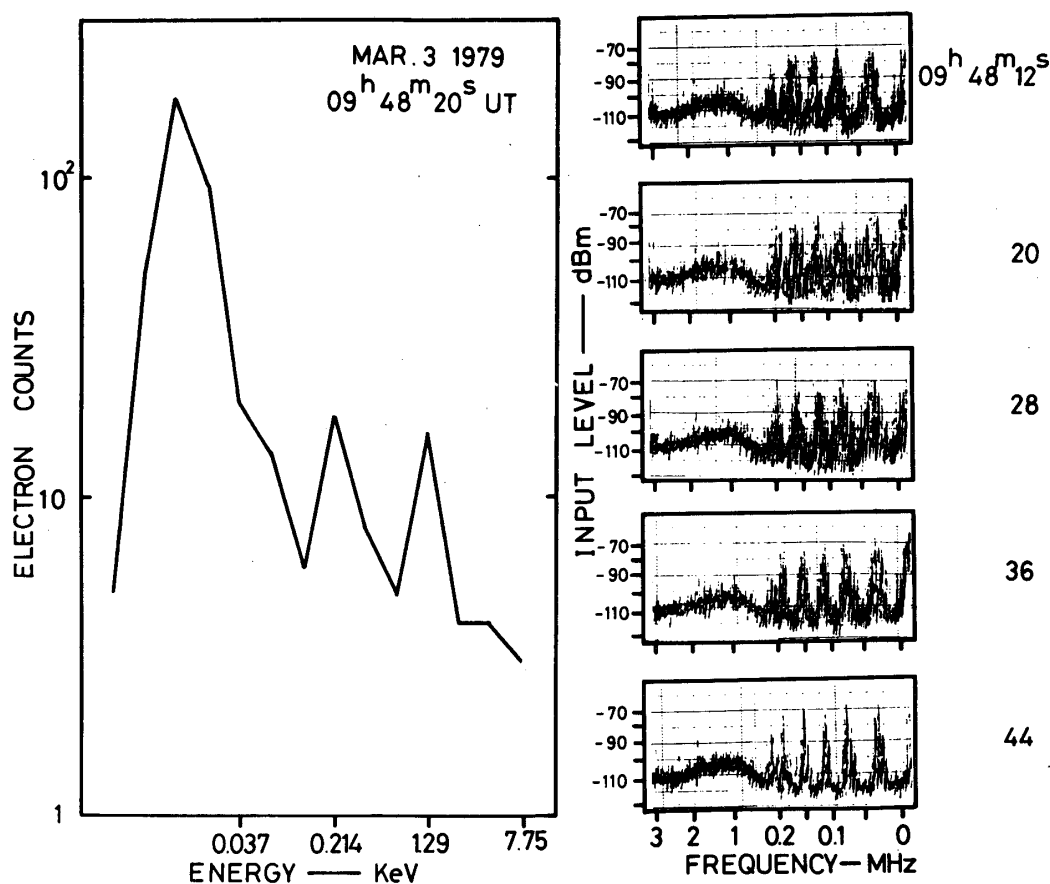
第3図 磁気圏で観測されるUHR放射の例(1979年2月3日)。周波数30~40KHzにみられるUHR放射は強度が大きくなると受信機の飽和現象をひきおこす(UT 23^h 11^m ~ 16^m および 23^h 53^m ~ 57^m)



第4図 (a) UHR放射にともなう低エネルギー電子フラックスの増大例(1979年3月2日 09^h 43^m)。周波数40 KHzを中心とする強いUHR放射は受信機を飽和させるまでに至っており(右欄)同時の電子のエネルギー分布は100 eV~1 keVの間で増大している(左欄)

UHR波動に関する波動粒子相互作用の実証は、1979年3月2日、Rev. 481の観測で行われた。第4図(a)~(c)に、その状況を示す。第4図(a)は、1979年3月2日9^h 43^m 04^s UTから8 sec 毎の掃引時間について観測された粒子エネルギー分布を示す。粒子エネルギーの分布は、100eV~1 keVの間で増大していて、UHRエミッションが強く放射され、プリアンプ内で飽和するまでに至っている。

第4図(b)は、同じく1979年3月2日9^h 48^m 12^s~48^m 44^sまで、8 sec 毎の掃引時間について観測したものである。そのエミッションは、極めて激しくなっているが、この時100eV~1 keVにわたる粒子エネルギーの増加は極めて著しい。こうした第4図(a)及び(b)にわたる激しいUHRエミッションが、上記のように100eV~1 keVにわたる粒子エネルギーと波動の相互作用に基づく不安定現象であることを確認させるものは、第4図(c)に示される結果である。ここでは、UT 0.8^h 08^m 23^sから始まる8秒毎のエミッションのサンプルを示すが、これに対応する時間に対して、100 eV~1 keVにわたる粒子エネルギーの増大



第4図 (b) (a) 図より5分後のUHR波動と電子エネルギーフラックス。UHR波動の強度、低エネルギー電子のフラックスともに著しく増大している。

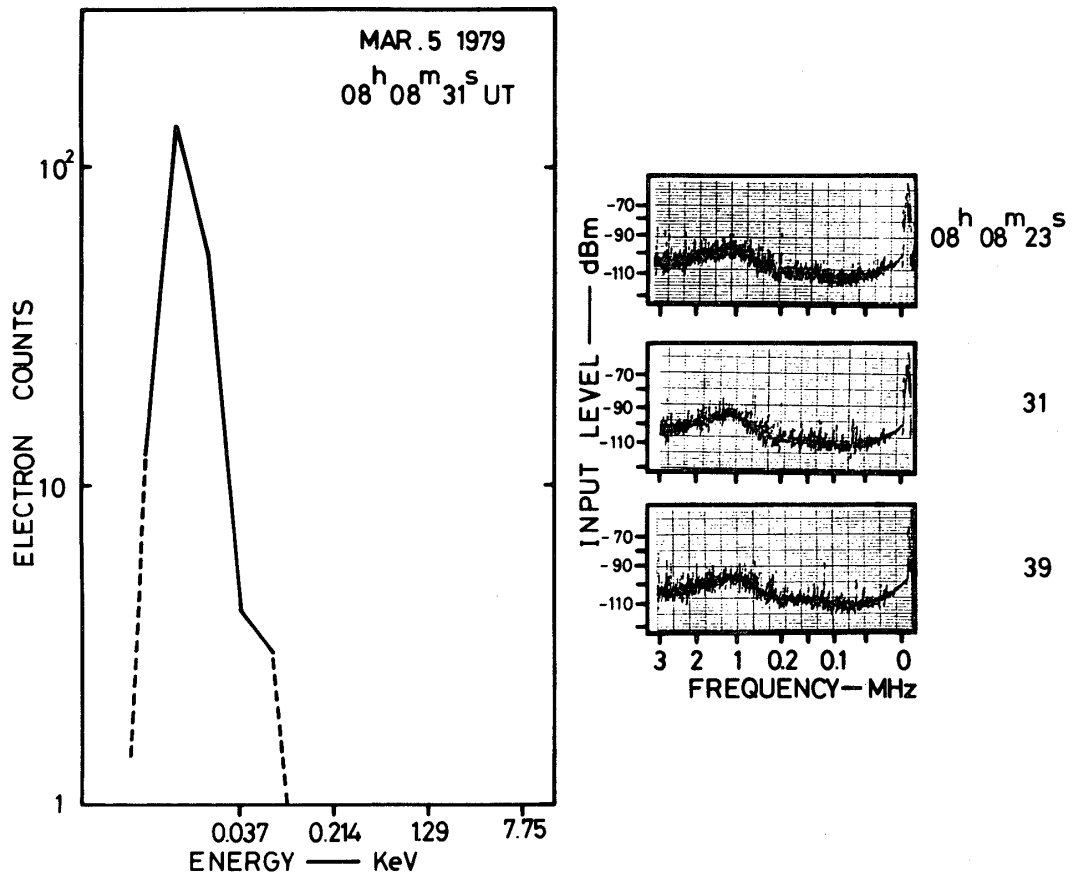
は全く見られない。なお、このデータは夜間のプラズマシート中で観測されたもので、このプラズマシート中の波動粒子相互作用の様相を明確に示すものである。

4. $(n + 1/2) f_c$ 放射

第5図は、1978年11月3日に観測された、 $(n + 1/2) f_c$ 放射の例である。観測された領域は、夜間のプラズマポーズを越えたプラズマシート内で観測したもので、既に、このエミッションについてその理論が提出されてきた[2, 3および4]。これらの現象を生むベースは、磁力線に直交する方向に粒子のエネルギー分布が増大することである。したがって、UHR エミッションを生むビーム型不安定とは、対称的な現象となっている。

5. ELF, VLF領域の狭帯域エミッション

プラズマシート内の10 KHz以下に現われるVLFエミッションの特質の一つは、かなり狭帯域な Puretone の性格をもっている。この主な原因は、Lower hybrid resonance (LHR) 波動と磁力線方向に増大する ion sound wave である。特にLHR波動は、UHRの場



第4図(c) UHR波動のみられない時の波動スペクトルと電子エネルギースペクトル。100 eV～1 keVにわたる電子のフラックスの増大は全くみられない。

合と同様広い範囲にわたる、電子ビームと相互作用することによって発生する。第6図及び第7図は、1978年11月6日に観測されたELF及び、VLF放射とその放射を放射している時の粒子エネルギー分布の状態を示す。この場合1 keV～10 keVにわたる範囲の電子ビームとイオンビームが存在し、これによってELF領域の、Puretone エミッションが放射されていることを示している。

LHR波動のエミッションも、チェレンコフ型のビーム波動相互作用で、

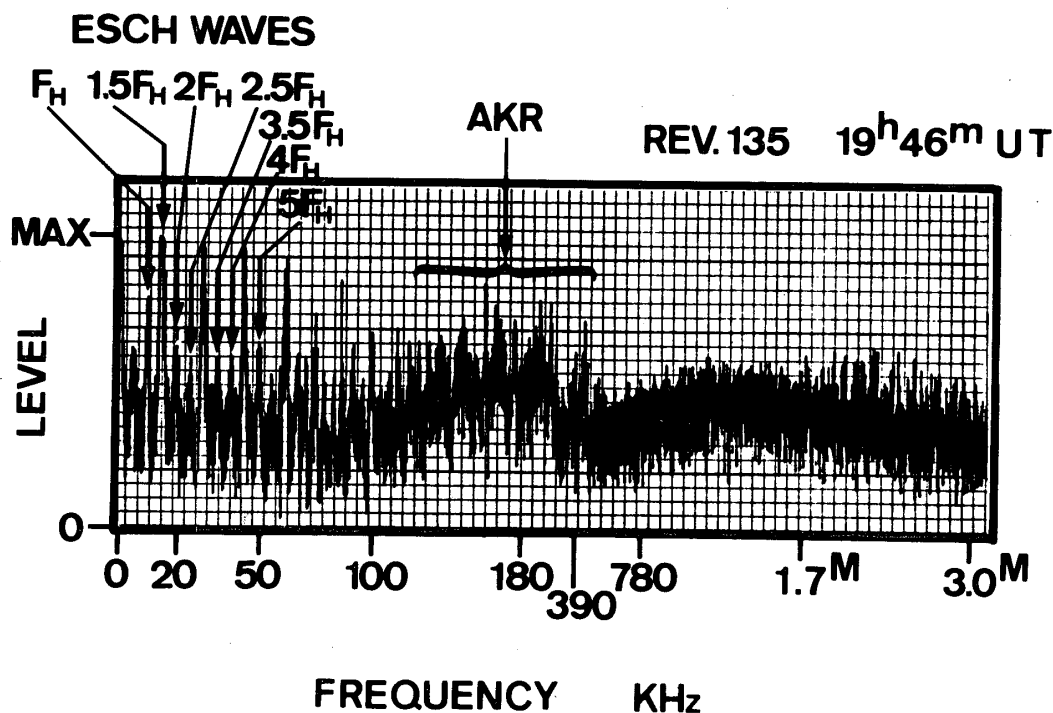
$$V = \omega / k$$

という条件を満たしている。特に、オーロラに伴う粒子の発生との関連を調べるのが、今後の重要な課題となっている。

6. 惑星電波と太陽電波

300 KHz 以上の周波数帯域で顕著に表われるのが、惑星電波と太陽Ⅲ型電波バーストである。現在、惑星電波として同定されたものは3月10日、木星の例がある。これは、周波数が

JIKIKEN NPW-A

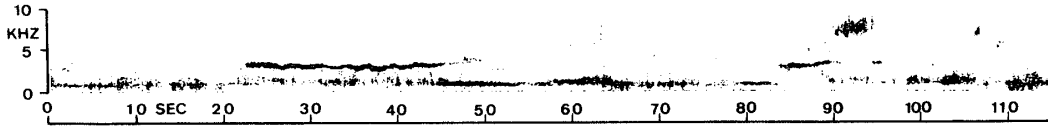


第5図 $(n + 1/2) f_c$ 放射の例 1978年11月3日、夜間プラズマシートにおける観測

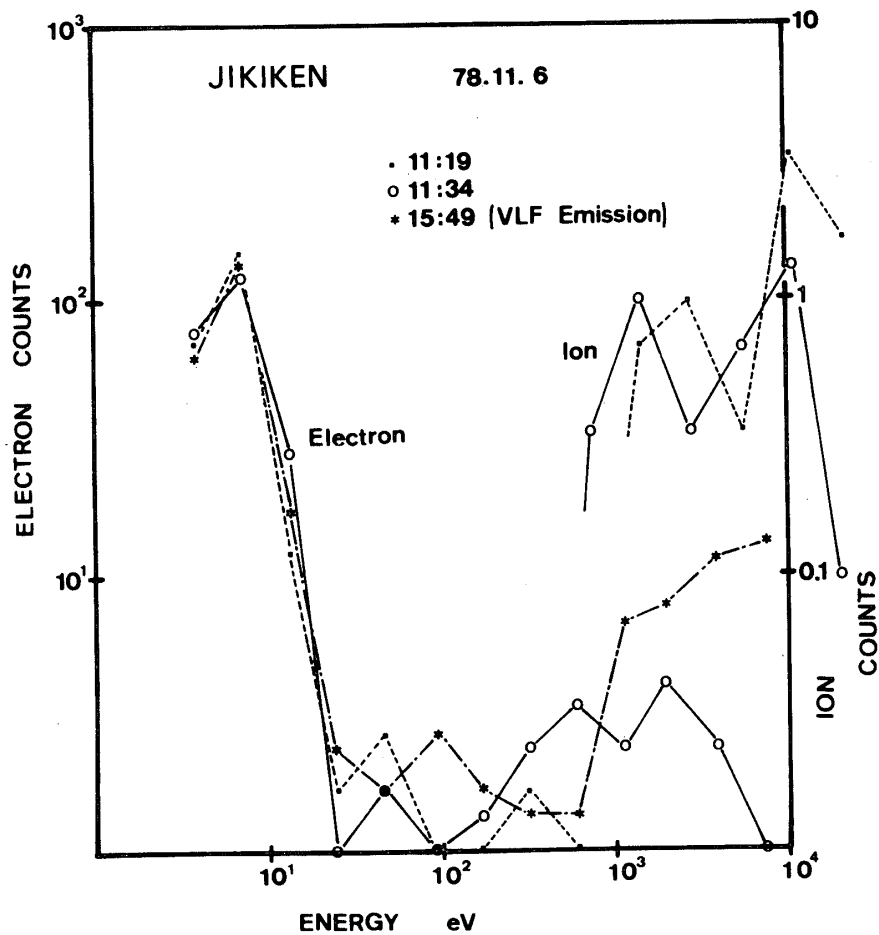
高い領域から低い領域へとおりてゆくことを示しているので、ボイジャーの観測等とも一致している。

最も頻りに観測されるものは、太陽タイプⅢ電波バーストである。既に、ヘクトメートル波帯に達する太陽電波バーストについては1970年に報告されている[5]。これらの結果を、さらに詳しく研究する材料を与えることになるが、特に、低周波まで伸びるアナログチャンネルをもっていることが、このEXOS-Bの特質で、新しく見いだされたのは、TypeⅢの放射とほぼ同時に、低周波側20 KHz ~ 200 KHzにエミッションが発生している。

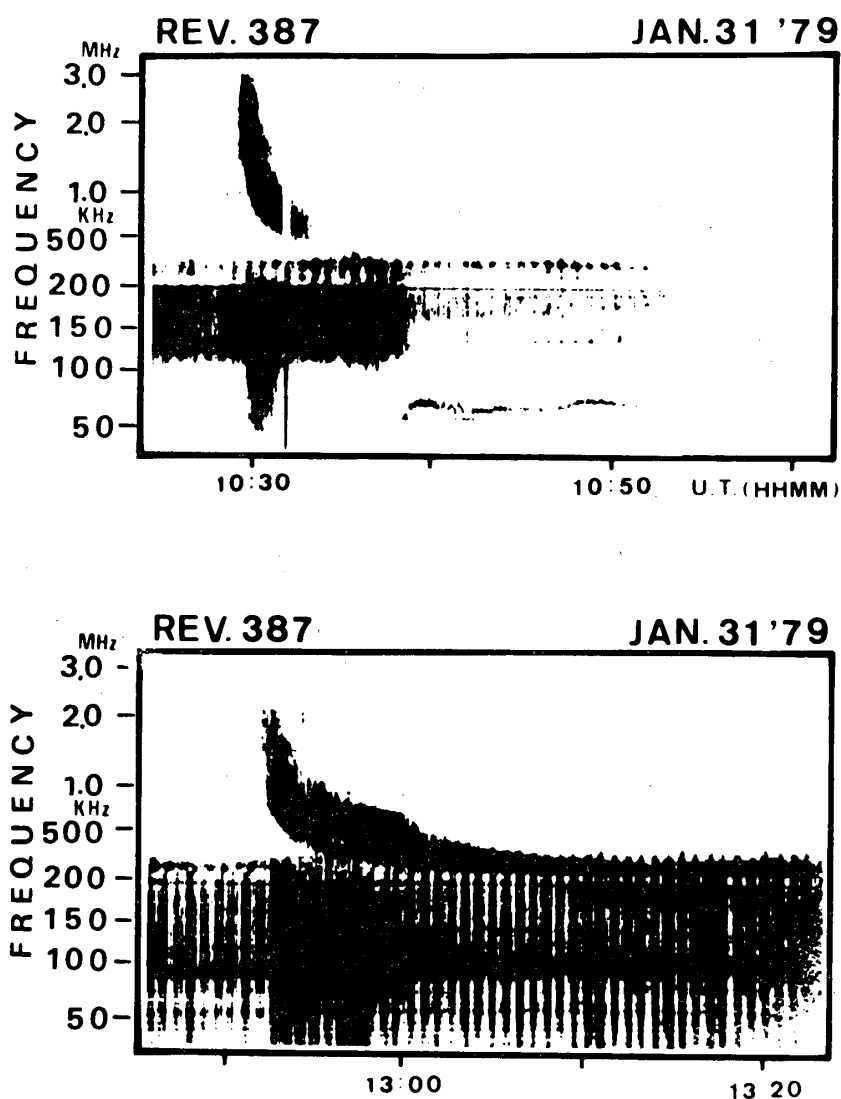
(第8図参照)これは、タイプⅢの放射を生むビームが弱い磁場を伴って放出され、その雲の中で電子プラズマ周波数よりはるかに低い電子サイクロトロン周波数以下の放射をしていることを示している。時に、ビームは停滞し反射されてゆく例もでていたが、これらのすべては、タイプⅢの電波バーストを生む agency とそれにまつわる太陽プラズマ中の状態や波動粒子相互作用を明らかにする貴重なデータを提供している。



第6図 1978年11月6日に観測されたELFおよびVLF放射. 同時の粒子エネルギースペクトルが第7図に示される.



第7図 第6図のVLF・ELF放射が観測された時の電子およびイオンのエネルギースペクトル. 1 keV ~ 10 keVのエネルギーをもつ電子およびイオンのビームが存在している.



第8図 Type III型太陽バーストのダイナミックスペクトル。時間とともに周波数が減少する Type III型放射と同時に周波数 20 KHz ~ 200 KHz にエミッションが発生している。

7. 結 論

JIKIKEN (EXOS-B) 衛星によるプラズマ波動の観測は種々の成果をあげつつ順調に進行している。

JIKIKEN 衛星の主テーマは、波動粒子相互作用の解明にある。本論では、初期の6カ月間に得られた波動観測の結果を粒子データを交えまとめた。既に、磁気圏プラズマ中で起こる波動粒子相互作用過程を示す、新しい事実を含む多くの事例が観測されている。これらの成果は、今後、波動観測データと粒子観測データとの詳細なつき合わせ検討と、豊富なデータの蓄積により、磁気圏プラズマの素過程およびマクロな擾乱過程の解明に大きく貢献する

ものである。また、地球キロメトリック放射は、オーロラの原因をさぐる重要な手段として、今後より深く検討してゆく必要がある。

太陽および惑星から放射されるヘクトメータおよびキロメータ波領域の電磁波は、従来あまり焦点があてられていなかった。新しい領域とも言える。JIKIKEN 衛星による高分解能スペクトル観測により、新たに見いだされたキロメートル波帯の太陽バーストエミッションの解明は、今後の重要な課題の一つである。

謝 辞

JIKIKEN (EXOS-B) 衛星は東京大学宇宙航空研究所、第六号科学衛星プロジェクトとして遂行された。M-3 H-3 実験主任 秋葉鏝二郎教授、及びEXOS-B マネージャー 大林辰蔵教授はじめ、東京大学宇宙航空研究所のスタッフの方々に深く感謝いたします。また、観測に当り JIKIKEN 追跡班ならびにKSCでの諸支援班の方々にも深く感謝いたします。

1979年10月1日

参 考 文 献

- [1] Oya, H., J. Geophys. Res., 77, 3483 (1972).
- [2] Fredrics, R.W., J. Geophys. Res., 76, 5344 (1971).
- [3] Oya, H., Phys. Fluids, 14, 2847 (1971).
- [4] Karpman, V.I., Ju.K. Alekhin, N.D. Borisov and N.A. Rjabova, Phys. Lett., Sect. A, 44, 205 (1973).
- [5] Fainberg, J. and R.G. Stone, Solar Phys., 15, 222 (1970).