

IV 型 パースト

甲斐敬造*

太陽電波に直接関連のある部門に限らず、宇宙線や地磁気嵐とか電離層方面にも“IV型パースト”なる言葉がしばしば現われてくる。太陽パーストは数種類のタイプに分けられているが、この“IV型”は最も多くの研究者によって調べられており、関連領域にも注目されている。そこで、以下IV型パーストとは、どのような観測的特徴をもったものであるか、どのような機構から発生するか、それに関連して、現在問題となっている事柄などを述べてみたい。できる限り客観的に眺めるよう努力したが、発生機構に関しては多分に主観が入ってくると思う。適宜判別していただきたい。

IV型パーストに関連した宇宙線増加とか、地磁気じょう乱等の問題は非常に重要な事柄ではあるが、紙数の関係で、次の機会にゆずりたい。

1. IV型パーストの発見

かつてフランスのボワショーは干渉計（おもに電波源の位置を調べる装置）を使って大きなアウトパーストの後に数十分間持続する、時間的変動のきわめて少なく、のっぺりしたパーストのあることを発見した。電波源は非常に大きく（ 7° ~ 12° ）、時間がたつと太陽の外側（コロナ中を上方）へおよそ 1000 km/sec の速さで動いていき、最後に内側（コロナ下層に向け）に動いて定着する。彼はこのパーストが新しい型であると主張し、“IV型パースト”と名付けた。

それ以前、オーストラリアのワイルドは、早くから動スペクトルとよばれる電波領域でのスペクトル・メーターなるものを考案し、これを用いてメートル波に起こった太陽パーストをI型、II型、III型の3種類に分けている。（175頁の解説参照）

ボアショーは、さらにこの型のパーストが電子密度の小さいコロナの高いところから発生する事実と、時間的変動が少ないことから、II型、III型のようにコロナ電子のプラズマ振動によって発生するのではなく、エネルギーの高い電子が黒点の磁場のまわりを旋回するときだす、いわゆるシンクロトロン輻射であることを示唆している。ボアショーの発見は今からおよそ7年前、1957年のことである。

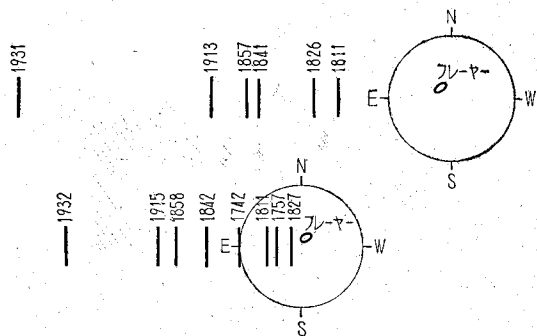
2. IV型パーストの定義

以後、フレージャーに続いて起こり時間的変動が少なく、寿命が長く、しかもコロナ中を上方に運動するパーストは“IV型”と指定された。

折からアメリカのミシガン大学やフォート・デュビスで作られたスペクトル・メーター（100 Mc~580 Mc）で、またしばらく遅れて、オーストラリアのシドニーで（25 Mc~210 Mc）この型のパーストが観測された。その結果IV型パーストは他の型のパーストに比べて広い波長域にわたって電波をだしていることがわかり、ボアショーの洞察の結果が正しいことの裏付けをした。

後になって古い論文に記載されているパーストの記録を見直してみると、この型のパーストがいく例か見出される。しかし残念なことに電波天文の初期には干渉計による電波源の位置の観測が乏しく、それに観測を行っていた波長域も狭く、つまりデーター不足で、それほどの注意を惹かなかった。

一方、もっと波長の短い、いわゆるマイクロ波領域（波長 20~30 cm から 1 cm まで）に、フレージャーとほとんど同時に数十分間持続する大きなパーストが起こる。タクラハかによって、このパーストもIV型パーストと拡張解釈されることになった。時間的変動が少ない、広い波長域にわたって起こる、持続時間が長いことによる。大きなフレージャーの後にはしばしばマイクロ波からメートル波にわたって、きわめて派手にパーストが現われる。しかし一般には、マイクロ波に起こるIV型パーストのほうがひんぱんに起こり、必ずしもメートル波のパーストを伴わないことがある。



第1図 87 Mc（波長約 3.4 m）の干渉計で測ったIV型パーストの電波源の時間的変化。円は太陽面、電波源は線上にある。線のかたわらに書かれた数字は世界時。上図は Nov. 30, 1959, 下図は Dec. 1, 1959. 340 Mc（波長約 88 cm）で測った電波源の位置はフレージャーの近くであって、時間的に変わらない。（クンドウ、ファイラーによる）

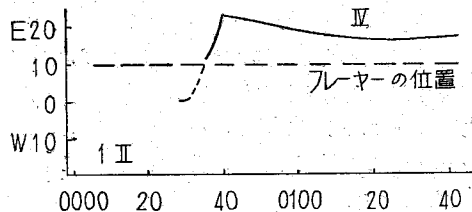
* 東京学芸大学

K. Kai; Solar Radio Emission of Spectral Type IV.

3. つぎつき現われた新“IV型バースト”

前節で述べたように、ボワショーによって命名された“IV型バースト”という言葉はマイクロ波からメートル波にわたって起こる一定の性質をもつバーストに指定されるようになった。しかし、電波は一つの層からエネルギーのきわめて高い電子のシンクロトン機構によって非常に広い波長域（約2オクターヴ）に放射されるのか、それとも観測する波長によって電波源の位置が違っているのか、あいまいであった。干渉計による電波源の位置の観測が進むにつれて、やがて総括してよんでいたIV型バーストを細分する必要が生れてきた。すなわちメートル波では、ボワショーのいうようにコロナの非常に高い所に電波源があって、しばしば外向きの運動を示すが、マイクロ波では、電波源は時間的にほとんど動かず、しかもコロナの下層あるいは彩層上部にある（名古屋大学空電研究所の観測など）。面白い例として同時に起こったIV型バーストについて波長約90cmと3.4mで位置の時間的変化を調べたものがある（第1図）。 $\lambda=3.4\text{m}$ で観測すると電波源は時間とともにコロナ中を上方に移動していくが、一方 $\lambda=90\text{cm}$ ではたえずコロナ下層にあって運動を示さない。中間の $\lambda=1.5\text{m}$ では、電波源が運動を示す例も二、三あるが、大部分はコロナのかなり低い層にあって動きはほとんどみられない（モリモト）。

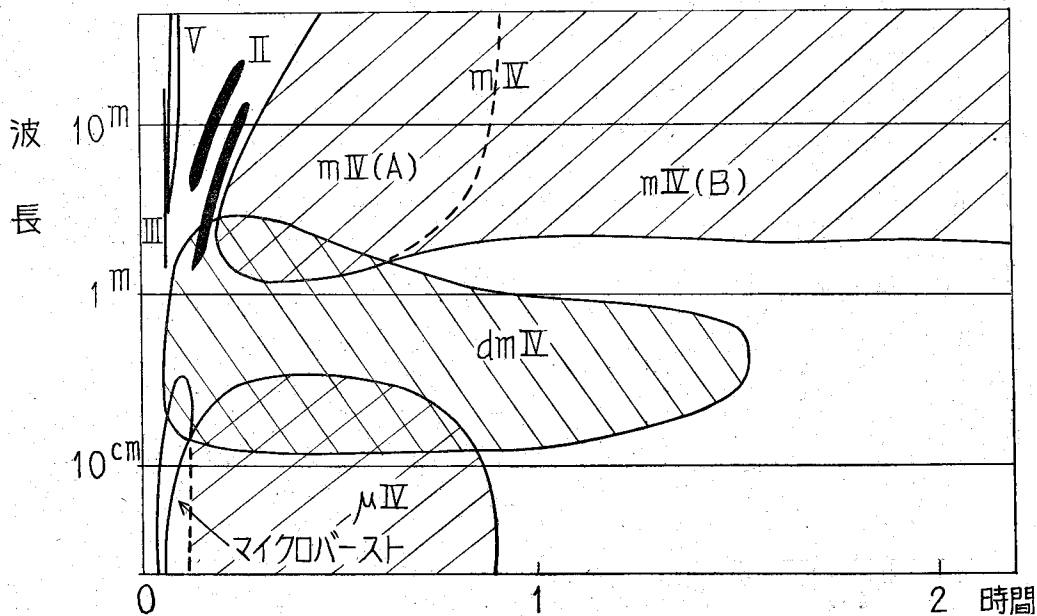
1961年京都で開かれた国際宇宙線会議では、各国からIV型バーストに関する数々の意見がだされ、大勢はIV型をその波長域によって μIV （マイクロIV） dmIV （デシメートルIV）、 mIV （メートルIV）と大別することに傾いた（第2図）。バーストの強さの周波数特性（スペ



第3図 激しい運動を示すIV型バーストの例 (Jun. 27, 1960). オーストラリアの干渉計で観測したもの（波長約4.3m~7.5m）。曲線は電波源の位置を示す。横軸は時間（世界時）、縦軸は太陽面中心から測った東西方向への距離（単位は角度の分）を表わす。（ウィースによる）

クトル）、周辺効果、高さ、偏波などの性質が調べられている。各型の特徴を表にまとめておく。タカラの研究によると、IV型バーストは70~100 Mc, 300~500 Mcと9000 Mc以上に中心周波数の山が現われ、これら3つの分布の山はそれぞれ mIV 、 dmIV 、 μIV に相当する。たとえば200 Mc ($\lambda=1.5\text{m}$)でバーストをみていると、 dmIV と mIV バーストが互いに重なり合ってみえるが、統計的には dmIV をみている可能性のほうが多いことになる。

メートル波に起こるIV型バーストについては京都会議でも研究者の間で多少意見の喰い違いがあったように私には思われる。フランスのグループは mIV をさらに三つの範疇に分けるよう主張した。第1はマイクロ波と時間的に同じところ起こるもので指向性（太陽の中心で観測したときと太陽の周辺で観測したときの差異；一般に周辺ほど観測され難くなる）がほとんどないもの、第2はマイクロ波ではすでにバーストが完全に終わっているが、



第2図 IV型バーストの分類

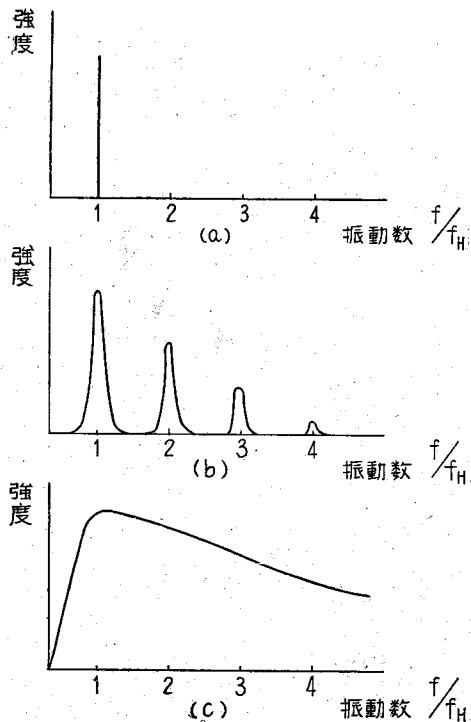
メートル波で持続時間の長いバーストがつづく。それに強い指向性をもつもの。第3は持続時間がきわめて長く(数日)、第2のものと同じ性質をもつものである。

一方、オーストラリアのウィースは40~70 Mc (波長数メートル) の領域で干渉計によるIV型バーストの詳しい解析を行ない、m IVを“moving IV”と“stationary IV”とに分けられることを示した。前者はバーストの初期(5~20分)に現われ、激しい運動を示し、時間がたつと源の位置は次第にコロナ下方に向かい安定な位置に定着する(第3図)。この落ち着いた位置から発生するバーストが後者だという。激しい運動を示すものはむしろ数が少なく、バーストの起っている間、全く運動を示さない“stationary IV”のほうが多い。彼のいう“moving IV”は恐らく、ボワショーの最初名付けた“IV型バースト”と同じものであると思う。また、フランス・グループの第1の範疇に属するものの中には、ウィースの2つのタイプのバーストが含まれているのであろう。

かくのごとく、IV型バーストは次第に細かく分け、“A氏IV”とか“B氏IV”とか研究者の数ほどのタイプが現われそうな勢いになってきた。つまりは、“IV型”という一つのタイプの中に押し込めるにはあまりにもヴァリエティに富みすぎている。このような経過はなんの研究にも大なり小なり共通しているであろう。

4. 偏波の特徴

電波の発生機構および伝播状態を調べる上に、バース



第4図 シンクロトロン輻射のスペクトル

トのスペクトル、指向性、位置の観測と並んで重要なものは偏波の特徴であろう。電波源や電波の伝播途上に磁場が存在すると一般に電波は偏りを示す。とくに、IV型バーストはシンクロトロン輻射によって発生すると信じられているので、磁場は重大な影響を及ぼしているはずである。

しかしながら、偏波の観測は比較的少ない。偏波状態を完全に決め得る装置が世界に数少ないためと思う。幸いわが国にはマイクロ波(名大)と200 Mc(東京天文台)と優れた偏波計が働いている。

マイクロ波と200 Mcとの偏波の向きは、しばしば逆になっている。恐らく前者はEモード、後者はOモード(結晶などの等方的でない媒質中を光が通ると正常光と異常光にわかれる。以下Oモード、Eモードと略記する)と考えられる。たがいに磁極の反対の場所で発生するとすればそれまでであるが、この点は統一的解釈をする際一つのポイントとなってくる。偏波の状態は大部分が部分円偏波で、直線偏波はコロナ中のファラデー効果のため観測し難い。

μ IV: 円偏波率はさほど高くなく、一般に50%以下であり、短波長ほど多少高くなっている。時間的にそれほど偏波率が変わらないのも特徴である。指向性も乏しい。偏波の向きは逆転は2000 Mcあたりでよく起っている。

dm IV: バーストの起こり始めは偏波率は低く、偏波の向きは時折複雑に変化する。しかし30分程たつと向きは一定し、偏波率は次第に増え、太陽中心で起こる場合100%に近い値を示す。ただこの現象には強い指向性があり、太陽周辺で起こった場合には、強い偏波率を示さない、というより偏波部分がみえないといったほうがよいかも知れない。前後して同じ場所に発生するI型バーストとよく似た偏波状態を示すので、Oモードであることは確かであろう。偏波率が増すとき、電波源の位置のなんらの変化もみられない。あたかもプレーヤーの際乱された磁場が、時間がたつと徐々に復元して行くのに対応しているかのように思われる。そういえば、マイクロ波に起こるバーストが強いほど復元に要する時間は長い。この特性は200 Mcの結果であるが、1000 Mc辺りまで及んでいると思う。

m IV: “moving IV”は偏波率は低く、指向性も少ない。運動が終り安定した位置に落ちつくと偏波率も増す。また運動を伴わないバーストでは、偏波率は時間とともに増す傾向がある。しかし、観測例が少なく、まだ確実な結果ではない。

5. シンクロトロン輻射

IV型バーストの発生、伝播機構を考える前に、シンクロトロン輻射の性質について簡単にふれておこう。

よく知られているように磁場のまわりをエネルギーの高い電子が旋回すると輻射が発生する。この現象は最初加速器で電子を加速している際発見された。

放射される輻射の周波数は旋回する電子の回転速度（回転周波数）に関係があって、電子のエネルギーが非常に低いときには電子の回転周波数と同じ周波数をもつ輻射だけが発生する（基本波、 $f=f_H$ ： f_H は電子の回転周波数）（図4-(a)）。 f_H は、電子の質量と磁場の強さで決まる。磁場が強いほど、粒子の質量が軽いほど高い振動数の輻射がでる。電子のエネルギーが高くなると、その質量は相対性理論により静止しているときより重くなり、磁場の強さは同じでも回転速度は鈍ってき、放射される輻射の振動数も小さくなる。電子の速度と光速との比を β とすると基本波の振動数 f_1 は $f_H\sqrt{1-\beta^2}$ となる。しかし高調波を多く含むようになる。電子の軌道が円でなく、らせん形をしていると、ドプラー効果で振動数がずれる。したがって電子がエネルギーおよび方向分布をもっていると、 $f_1, 2f_1, \dots$ のまわりにある幅をもつ輻射がでる（図4-(b)）電子のエネルギーが極端に高くなると、高調波の間隔は狭まり、幅もふとるので、輻射は振動数に対してほとんど連続的に分布するようになる（図4-(c)）。要約すると、輻射に与える電子のエネルギーが高いほど、広い波長域にわたって輻射をだす。一方低エネルギー電子からは限られた波長域にしか輻射は発生しない。

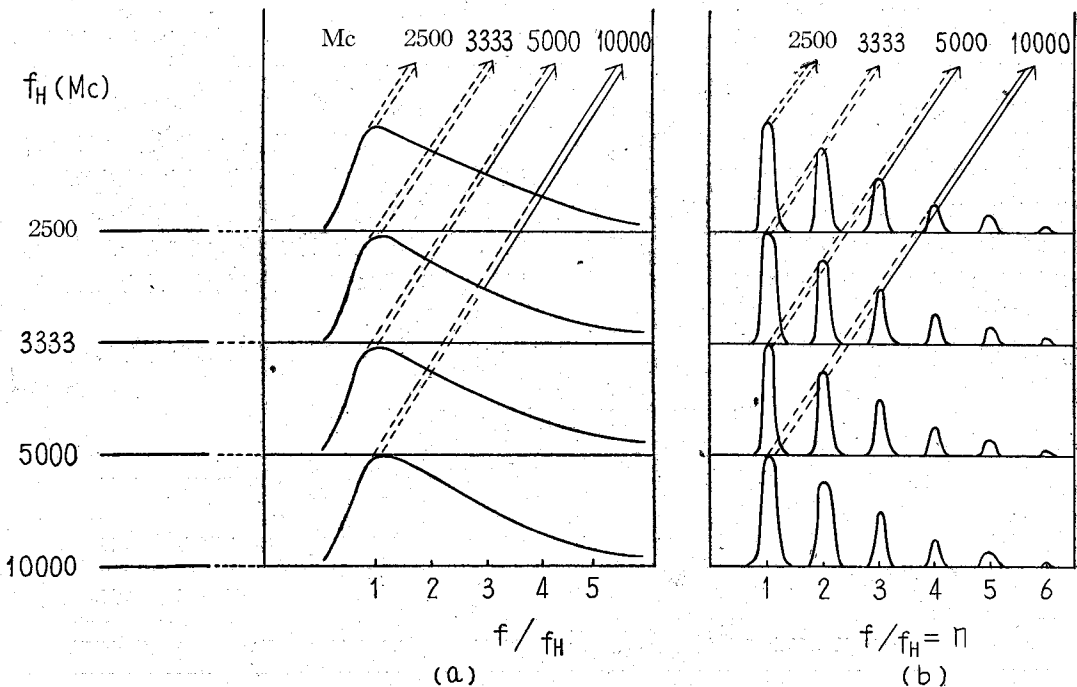
ある波長でみた場合、シンクロトロン輻射の強さは、

磁場の強さと電子のエネルギーおよび方向分布と、それに観測する方向（磁場とのなす角）によって決まる。

ここで注意しておきたいのは、電子が空間的にまばらにしか存在しない場合を除くと、一般に一度放射された輻射は、まわりの電子によって再び吸収される影響を考慮しなければならない。キルヒホッフの原理によれば、良い放射体は同時により吸収体である。さらに輻射に与かる高エネルギー電子による吸収だけでなく、コロナ中に永在する熱電子による吸収も見逃せない。シンクロトロン輻射自体は割に簡単な事柄であるが、この点が太陽電波の解釈を複雑にしている。

ついでにシンクロトロン輻射の偏波にもふれておこう。電子の速度分布が等方的であるときは、電波源での偏波の向きは、つねにEモードである。したがってOモードをだすためには、伝播途上でEモードの波が強い吸収を受けOモードだけ生き残ることを考えねば説明できない。低エネルギー電子による輻射の偏波状態はまわりの熱電子のだす輻射の偏波状態と、ほぼ同じく完全偏波しているが、エネルギーが高くなるにつれて、直線偏波成分がふえるとともに完全偏波状態でなくなる。磁場に沿った方向でみると70~80%の円偏波率を示すが、磁場とほぼ直角の方向からみると40%程度に減少する。

シンクロトロン輻射、理論としてはシュヴァインガーの理論（1949年）などがある。太陽電波に適用しやすい形に拡張整理したタカクラの理論、偏波や輪達方程式を



第5図 IV型バーストの発生モデル

一般的に扱ったカワバタの理論などがある。

6. IV型バースト全体のイメージ

まとめとして、以上説明してきたIV型バーストの観測的事実をシンクロトン説でどう説明したらよいかを考えてみよう。前に述べたようにIV型といっても μ IV, dm IV, m IVなどがいに性格を異にするものがあるわけで、それに対応して、シンクロトン機構などのとり入れ方も違ってくるはずである。変え得る物理量は輻射に与かる電子の分布(空間的, 速度的), 磁場の分布, 吸収の効かせ方(熱電子密度と上の量とのかね合い)などである。言葉を裏がえしていうと, コロナのこれら物理量を観測に合うように決定するのが最後の目的である。高エネルギー電子に関しては, 加速機構や, ある領域内に捕捉する機構がからんできて事情は複雑である。

μ IV: 磁場, 電子密度など一定な層から広い波長域にわたって電波が放出すると考える。そのためには輻射に寄与する電子のエネルギーは相当高くなければならない(数メガエレクトロンボルト程度)。スペクトルの山が4000 Mcより高い周波数のところにくるためには磁場は数百ガウス以上なければならないであろう。磁場の中では熱電子による共鳴吸収という現象が起き, E-モードの電波は著しく吸収される。この現象は波長が長くなると顕著となる。2000 Mcあたりで偏波の向きが変わるのは共鳴吸収によって, 大部分のE-モードの電波が吸収されて, O-モードの電波が強くなるためと考える。高い周波数のところでは共鳴吸収はあまり問題にならず, 電波源での偏波状態がほとんどそのまま観測されるから偏波の向きはE-モードである。円偏波率は前節で述べるように50%あるいはそれ以上で観測による値よりかなり高い。その点はどうも面白くない。一方1000 Mc以下の長波長でも同時に形の似かよったバーストが現われている。強度が予期される以上に強いこと, 偏波率が小さいことの原因から理論的にはどうもマイクロ波のつながりと思えない。しかしどの辺の波長にけじめをつけるかとなると, 形が似かよっているなどの点でためらってしまう。

つぎに別なモデルを考えてみよう。磁場の強さはコロ

ナ上方に行くほど弱くする。各層でその磁場に対応する $f_1 = \sqrt{1 - \beta^2} f_H$ のあたりに山をもつスペクトルをだしていると考え(第5図(a))。たとえば10000 Mcの電波は図の矢印の方向に各層からでる電波を積分したものが観測される。便宜上とびとびの層しか描いていないがその中間の層からの寄与も積分される。計算によると, 共鳴吸収はE-モードに対しては $f_H = 2500$ Mcの層より下で, O-モードに対しては $f_H = 3333$ Mcの層より下で著るしい。したがって図の実線の部分だけが観測される。同じ層からでるO-モードの電波の強さは, E-モードのそれに比べて弱く, 10%以下である。しかし図からわかるように下層からでる電波ほど強いから, 全体としてE-モードのほうが一般に強い。偏波率は $f_H = 3333$ Mcより上層からでるE-モードと, わずかなO-モード成分, それに $f_H = 5000$ Mcと $f_H = 3333$ Mcの層の中間からでるO-モード成分とによって決まる。したがって, 前の均一層モデルの場合に比べて偏波率は小さくなる。波長が長くなるにつれて吸収がよく効きだす関係でO-モード成分が相対的に増し, ついには偏波の向きが逆になる。

1000 Mc近辺での干渉計の精密な観測が不充分なので現在の段階ではどちらのモデルがよいか決定できないが, 偏波率を説明できること, メートル波までつながる形の似たバーストを無理なく説明できる点で不均一モデルのほうが私にはよさそうに思う。

dm IV: dm IVバーストの特徴は偏波率がきわめて高いこと(O-モード), 強い指向性を示すこと, 持続時間が長く, 時間的変動がかなり多いこと, 強度も相当強いものがあることなどである。その発生機構についてはまだ定説がない。

200 Mc~1000 Mcの領域で高い偏波率をだすためには, 全体が一つの層から放射されると考えることは不可能であって, 前項で述べた不均一モデルをとらねばならない。しかし電波をだす電子のエネルギーが高いと, 吸収を考慮に入れても, 100%近い偏波率を説明するのは困難である。

そこで図-5(b)のようなモデルを考える。輻射に与

第1表 種々のIV型バーストの特徴

IV型バーストの種類	波長域	継続時間	時間的変動	電波源の大きさ	電波源の高さ(光球面より)	指向性	偏波(モード)
mIV(A)	メートル波	10分~2時間	なめらか	6'~12'	0.5~5 R \odot	ほとんどなし	弱い円偏波(E)
mIV(B)		数時間	ゆるやかな変動 +細かい変動	?	?	強い周辺効果	強い円偏波(O)
dmIV	デシメートル波	10分~2時間	ゆるやかな変動 +細かい変動	3'~5'	0.1~0.4 R \odot	強い周辺効果	強い円偏波(O)
μ IV	マイクロ波	数十分	なめらか	1.5'~4'	~0.05 R \odot	ほとんどなし	部分偏波(E)

かる電子のエネルギーは低く、 n 番目の高調波と $(n+1)$ 番目の高調波の強度の差は大きくなる（図では便宜上強度の差が顕著でない）。幅も狭くなって連続的でなく、隙間ができるしとびとびの層の中間領域からの寄与は少ない。10000 Mc でみていると、O-モード成分は $f_H=3333$ Mc より上の層から、E-モード成分は、 $f_H=2000$ Mc より上の層から発生する。この点は μ IV の場合と同じである。しかし $n=4$ の層からでる電波の強さは、 $n=3$ の層のそれに比べ充分小さいから、O-モード成分が強くなって高い偏波率を示すようになる。偏波はうまく説明できるが、電子のエネルギーを低くするので今度は電波強度が低くなり、観測される強度を説明するのが苦しくなる。電子の速度分布が熱平衡のときの分布からずれて、エネルギーの高い電子が多いときには、電波は電子のエネルギーを喰って成長していく可能性がある。ちょうどレーザーと同じ原理で入射する波はどんどんふとっていき、低エネルギー電子でも身分不相応の強い電波がだせる吸収と正反対の現象が起こり得る。この増幅作用は電子の速度分布が等方的である場合は起こり難く、すべての電子が円軌道に近い状態にあるとき最も有効に起こる。しかも高調波ほど次第に起こり難くなるか

ら、下層からでる O-モード成分のほうがますます強くなり、偏波率は増し、同時に強度も増してくる。

つぎに指向性であるが、強い偏波を示す成分は、太陽周辺ではほとんど観測されない。磁場とはほぼ直角方向に電波が進むときには、熱電子と電波との相互作用が強くなって、磁場と平行な方向に進む場合と比較して共鳴吸収は増大する。したがって E-モード成分だけでなく、O-モード成分に対しても吸収が著しくなって、電波は逃げられなくなってしまう。もし、太陽の磁場が光球面にはほぼ垂直にのびているなら、このようにして周辺効果を説明することができよう。

m IV: 偏波的性質および経過の観測から、“stationary m IV” と dm IV との間に本質的差異はないように思う。まだ観測資料が充分でないが、もしこの仮説が正しければ、一括して“強い偏波成分”として dm IV と同様に説明できよう。

以上IV型バースト全体をできるだけ統一的に解釈することを試みたけれども、不十分な個所、あるいは偏見も含まれている恐れがある。第一私自身わからないところが多く、原稿用紙と議論している気持で書いた次第である。

解説

太陽電波バーストの種類

太陽電波が比較的短時間強くなる現象をバーストと呼んでいる。動スペクトル（171 ページ第2図参照）を見ると、この現象にもいろいろ種類があることがわかる。現在までのところIV型のほかに次のようなものがわかっていて、

I型バースト: ある種の活動的な黒点が太陽面に現われると、メーター波領域でいく日も間けつ的に現われる。電波強度を時間的に記録していくと、ときにはレベルが上昇し、その上に寿命のごく短い“ヒゲ”がかなり長い間絶えまなく起る。動スペクトルでバーストの起る波長域をみると、時間的に系統的な変化を示さない。強い円偏波を示すのが特徴である。

II型バースト: ひん度は極めて少ないが、大きなフレージャーが起るとほとんど同時に、メーター波に爆発的強さを示すバーストが起る。これがII型バーストである。II型バーストの起ったあとには、しばしばIV型バーストがひきつづいて起るので、IV型バーストの指示役にもなっている。動スペクトルでみると、このバーストは、波長の短い方から長い方へゆっくりと流れていく。移動の速さは大体毎分 1 Mc 程度で、これを電波源がコロナ

上方に運動していくためと解釈すると、上昇速度は毎秒約 1000 km となる。もう一つの特徴は、第2高調波がみられることで、この型の電波が非線形のプラズマ振動によると考えられている根拠である。

III型バースト: 大きなフレージャーと同時に、II型バーストより一瞬早く起る。II型とちがって必ずしも大きなフレージャーに付随して起るのでなく、かなり小さいフレージャーに伴っても起るのでひん度は相当大きい。動スペクトルでみると時間がたつと短波長から長波長へ流れていくことはII型と同じであるが、その移動速度はII型より約 100 倍も速く、一瞬のうちに流れ去っていく。時折高調波成分も観測されている。プラズマ振動により発生すると考えられており、コロナ中の電子密度を推定するのに良く利用されている。

V型バースト: III型バーストのあとにIV型バーストほど大規模ではないが、かなり広い波長域に連続的に起る。シンクロトロン輻射であろうと考えられている。

マイクロ波バースト: フレージャーに付随して cm 波領域で起る。寿命は短かく数分から十数分。