

天文数値シリーズ (7)
— 理科年表による —

太陽電波・X線・粒子

甲斐敬造*

理科年表天文 28, 29 は太陽の放射する電波, X線 (γ 線), および粒子に関する諸量をまとめたものである。とくに, これら放射のフレアーに伴う異常増加現象に重点を置いた数値である, 放射の形態や波長域は著しく異なるが, 電波, X線, 粒子等の現象は, たがいに深い関連をもっている。たとえば, 硬 X線バーストはフレアーの初相に加速された電子が, 太陽大気の高密度の下層 (彩層やコロナの基底) でまわりの粒子と衝突することによって発生すると考えられているのであるが, 加速された電子の一部は, 弱い磁力線に沿ってコロナ上層に逃れ出し, その途上でプラズマ波を励起し, あるプロセスで横波に変換されて電波の III 型バーストとして観測される。また, コロナ上層から惑星間空間に広がっていく高速電子は地球近傍で人工衛星などによって粒子線の電子成分 (エレクトロン・バースト) として検出されるのである。

図 1 は電波, X線, γ 線領域の波長を示すものである。波長が数ミリメートルから数十メートルの間の電波は地上から観測することができるが, それより短い波長の電波は地球大気によって吸収され, またそれより長い波長の電波は電離層にさえぎられて地上に到達することはできない。X線, γ 線および粒子線は人工衛星や, 気球, ロケットなどの飛翔体に観測装置を積んで地球大気の外側で観測を行なっている。

さて年表に掲げられた数値であるが, 太陽定数とか惑星までの距離などと違って相当程度の散らばりがある。とくに強度については分散が著しい。電波, X線現象の規模は現象ごとに大幅に異なるからである。したがってここに掲げられた数値は“平均的”な値, あるいは“代表的”な値と考えていただきたい。

太陽電波 定常的成分と異常増加 (バースト) に大別できる。分類の項に記された静常太陽の輻射と S 成分

(slowly varying component の略) とが前者であり, 他はいずれも後者である。静常太陽の輻射とは, 太陽面上に局所的な活動領域が全くみられないときに太陽全体から放射される電波の総量をいい, 年間を通じほとんど変化しないのであるが, 詳しくは太陽大気電子温度や密度の分布の変化と同じく太陽活動周期 (約 11 年) とともに若干変化する。なおこの成分は周波数が高い (波長が短い) ほど強く, 逆に波長の長いメートル波領域では, 静かな太陽の認定が困難である。

S 成分は黒点を含む太陽面活動領域上層のコロナ・コンデンセーション (天 22 参照) から発生するもので, コンデンセーションの消長につれて数日~1カ月程度で変化する。しかし変化の周期はこれから述べるバーストに比べるときわめて長いので便宜上定常的成分に分類されることが多いようである。

I, II, III, IV 型バーストはおもにメートル波領域に現われる現象である。電波スペクトル計 (動スペクトル計) によって観測されるスペクトル (強度の周波数分布) の時間変動のパターンによって分類されたものである。

I 型バーストは出現する周波数帯域幅が狭く, 個々のバーストの寿命は表に示されたように秒またはそれ以下できわめて短く, かつ周波数の系統的なドリフトは認められない。I 型バーストは集団をなして現われるのが普

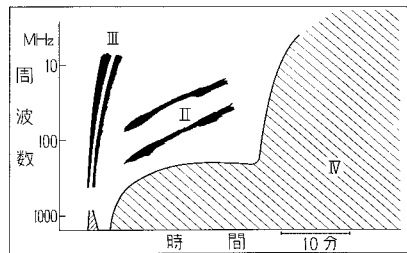


図 2

通であり, 集団は数十分から数日間も継続する。これがノイズストーム (電波嵐) とよばれる現象である。

II 型および III 型バーストは, 図 2 に示すように強度のピークが時間とともに低い周波数へドリフトするのが特徴である。このドリフトの割合は, II 型バーストでは ~ 0.1 MHz/秒であり, III 型バーストでは ~ 10 MHz/秒である。違いは約 2 桁もあり, その中間の値を示すバーストは観測されていない。これらの周波数ドリフトの値を速度に換算すると, II 型バーストに対して $\sim 10^8$ km/秒,

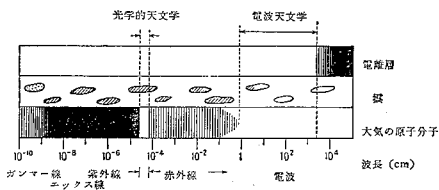


図 1

* 東京天文台 K. Kai: Solar Radio, X-ray and Particle Emission.

III型バーストに対して $\sim 10^8$ km/秒 (光速の 1/3) となり、上の事実は、速度が約2桁異なる二種類の擾乱体が存在することを強く示唆している。種々の観測事実および理論的考察から、前者はフレアーのとき発生する磁気衝撃波であり、後者は高速電子の流れであると考えられている。

IV型バーストは広い周波数帯に同時に現われる。動くIV型バースト (moving) と動かない (stationary) IV型バーストの二種類がある。前者は ~ 400 km/秒の速度で上層に飛んで行くプラズマの雲であり、紅炎の噴出と関連があるとも考えられている。

マイクロ波バーストはフレアーの初相に現われる突発的なバーストである。メートル波帯に現われるバーストが高い周波数へ延びたものとは考え難く、これと区別するためとくにマイクロ波バーストとよんでいる。後に述べるエネルギーの高い硬X線バーストと関連が深い。

“大きさ”の項は、電波源の広がりを示すものであるが、静常太陽の輻射を除くと $1' \sim 4'$ というように分散が大きい。現象ごとに大きさが若干異なることもあるが、おもに測定する周波数によって電波源の大きさが異なることによる。一般に短い波長で測るほど電波源が小さい。大きさは電波干渉計によって測定されるのであるが、現在 $1'$ より秀れた分解能をもつ干渉計による測定は少なく、 $1'$ と記されているのは大体において電波源の大きさの上限と理解していただきたい。最近、大型の宇宙電波観測用の望遠鏡を組み合わせてバーストなどの大きさの上限を測定する (fringe visibility を測定することによって) 試みがなされており、S成分やバーストのなかには $\sim 5''$ 程度の細かい広がりがあることがわかってきている。電波源の大きさを正確に測定すると、年表に与えられた式 $F=2kT_b\Omega/\lambda^2$ を用いて、 T_b : 輝度温度を求めることができ、電波の発生の原因 (たとえば、熱的とか、非熱的とか判別する) を調べる上に大変参考になる。

X線バースト 地球大気は $< 3000 \text{ \AA}$ の電磁波に対して透明でない。したがってその波長域で天体を観測するためには、不透明な地球大気の外に出て行かねばならない。飛翔体による天体観測が始まった頃は、気球やロケットがしばしば用いられたのであるが、滞空時間が短いため太陽の観測には能率が悪く、現在では人工衛星による観測が主である。

20 \AA より波長の短い電磁波をX線とよんでいる ($20 \sim 100 \text{ \AA}$: 極端紫外線)。X線はエネルギー (波長) の大小により、硬 (高エネルギー) X線、軟 (低エネルギー) X線と分類している。境界は便宜上、 20 KeV (キロ・エレクトロンボルト、波長として約 0.6 \AA 、または 1 \AA (10 KeV) である。電磁波 (光子、量子) のエネルギーと

波長または温度との関係を下の表に示す。

エネルギー (eV)	エネルギー (erg)	温度 ($^{\circ}\text{K}$)	波長 (\AA)	
10	1.6×10^{-11}	1.16×10^8	1239.8) 極端紫外線) 軟X線) 硬X線
10^2	1.6×10^{-10}	1.16×10^8	124	
10^3 (1 KeV)	1.6×10^{-9}	1.16×10^7	12.4	
10^4	1.6×10^{-8}	1.16×10^8	1.24	
10^5	1.6×10^{-7}	1.16×10^9	0.124	

X線の測定には、X線の電離効果を利用するものと、光電効果 (X線が表面をたたくときに発生する電子を測定する) を利用するものがある。軟X線の測定では、おもに電離箱が、硬X線の測定ではおもにシンチレーション・カウンターが用いられる。

X線のスペクトルは、異なる波長 (エネルギー) 域ごとに強度を測定することによって求めることができる。X線源の大きさは、入射角の小さい回折格子を用いたり (軟X線)、いわゆる小田式コリメーター (硬X線) を用いて測定される。

観測されるX線強度は、衝突し合う電子とイオンの密度の積に比例し、かつ電子の速度 (温度) に依存するので、温度を知るか、または二つの異なる波長で強度を測定することによって、エミッション・メジャー (emission measure) を求めることができる。

γ 線バースト 硬X線よりさらにエネルギーの高い電磁波を γ 線とよぶことがあるが、ここでは年表に掲げたように、太陽大気の中で起る核反応によって発生する量子を γ 線バーストとよんでいる。

粒子線 太陽は電波、光、X線などの電磁波のほかに、陽子、電子などの粒子を放出している。年表に記されたフレアーに伴う異常増加のほかに、太陽から定常的に流出されるプラズマは、太陽風としてよく知られているものである。

きわめて大規模なフレアーに伴って地上でも太陽宇宙線を観測することがある。ただし、高エネルギー粒子 ($> 10^9 \text{ eV}$) が地球大気と衝突する結果中性子やメソンの二次粒子を発生し、それらをニュートロン・モニター等で測定する。そのほかりオメーターを用いて宇宙からくる電波の変化を測定し間接的に太陽粒子線 ($10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{ eV}$) を地上で測定することも可能である。しかし、気球 ($> 10^8 \text{ eV}$) やロケット、人工衛星 (全エネルギー領域の測定が可能) など飛翔体を用いて直接粒子線を観測するのが現在では可能となり、より一般的である。

粒子線の異常増加とフレアーの経度分布との関連であるが、年表に記されているように太陽面の西側で発生するフレアーとの関連が圧倒的に深いのは興味ある事実である。これは太陽の自転によってらせん状に巻きついた惑星間磁場と関連がある。