

宇宙からの謎の電波突発現象，高速電波バースト

最近，電波の帯域（1.4 GHz）で謎の突発現象が複数発見された。¹⁾ たった数ミリ秒間しかシグナルが検出されないことから，「高速電波バースト」(Fast Radio Burst) と呼ばれている。^{*1} 現在のところ，可視光やX線などの他の波長帯で対応する天体は検出されていない。また，同じ方向から2回以上バーストが検出されたという報告もない。これまでの観測から推定される頻度は，1日におよそ1万回と見積もられている。これは，10秒に一度どこかの方向に見えることに相当する。これほど頻繁に起こる現象であるにもかかわらず，最近までその存在は完全に見逃されていた。もう一つの高速電波バーストの重要な特徴は，以下で述べる分散度 (dispersion measure) が非常に大きな値を持つことである。これにより，電波では宇宙で最も明るい現象の一つであることが示唆される。

銀河系内空間には，平均的に $10^3\text{--}10^6\text{ m}^{-3}$ の個数密度を持つ電子プラズマが存在する。このような媒質中を伝搬する電磁波を考える（図1参照）。この媒質中では，電磁波の低い振動数成分ほど群速度が小さくなる。X線 ($\sim 10^{18}\text{ Hz}$) など高い振動数成分の群速度は，真空中の光速 c とみなせる。しかし電波帯域 ($\sim 10^9\text{ Hz}$) など低い振動数成分では，群速度が c より小さくなる。結果として，異なる振動数成分が放射源で同時に放出されたとしても，観測者に到着する時刻が振動数ごとに異なる。ここで具体例を考える。位置 $x=0$ の放射源から時刻 $t=0$ に電磁波が瞬間的に放射されたとする。図1の左下のパネルは，放射源からすべての振動数の電磁波が同時に放出されたことを表す。この電磁波がプラズマの存在する媒質中を伝搬し，位置 $x=d$ で観測者に検出されるとする。図1の右下のパネルは，位置 $x=d$ に電磁波が到着する時間を振動数ごとに示している。X線などの非常に高い振動数の電磁波は，時刻 $t_a (=d/c)$ に観測者に到着する。しかし電波の帯域では， t_a より遅れて到着することを示している。ある2つの異なる振動数 f_1, f_2 の電磁波の到着時刻の差は，電離した電子プラズマの個数密度を地球から天体までの距離で積分したものに比例する（図1）。この積分値が分散度である。もし電子の個数密度がわかっているならば，分散度の値から放射源までの距離を見積もることが可能である。実際の観測結果の一例を図2に示す。

分散度が非常に大きいことから，以下の議論により放射源までの距離が宇宙論的な距離であることが示唆される。銀河系内空間の電子プラズマによる分散度は，パルサーを利用することで測定されている。パルサーは超新星爆発後

に残る中性子星である。高速電波バーストから得られた分散度は，銀河系内空間の電子プラズマによる分散度より明らかに大きい。この大きな分散度を説明するには，放射源までの距離が我々の銀河より大きくなくてはならない。つまり，高速電波バーストは我々の銀河より遠くに存在している天体からの放射となる。高速電波バーストの分散度を説明するために銀河系外空間のプラズマを考慮すると，放射源までの距離はおよそ100億光年となる。放射源までの距離がわかると，見た目の明るさから光度を見積もることができる。その光度はおよそ 10^{36} J s^{-1} となる。この値から，電波では宇宙で最も明るい現象の一つであると言える。また，この放射が黒体放射とした場合の温度，つまり輝度温度は 10^{30} K 以上である。ここで，温度を見積もる際に必要な放射領域の大きさは，バーストの持続時間から見積もった。放射源でこのような異常な温度は考えられないことから，コヒーレントな放射でなければならない。この他，発生頻度は単位立方Gpcあたり年間およそ1万個である。^{*2} これは，100億光年先から現在までの銀河の個数進化の効果を無視すれば，典型的な銀河一つあたり1000年に一度の発生に対応する。

このような特異な高速電波バーストは，2007年に最初の1例が報告された。²⁾ その後，高速電波バーストに非常によく似ているにもかかわらず，人工的もしくは地球上起源とみられる現象が報告された。³⁾ これにより，宇宙で起こる現象としての高速電波バーストの存在に対して，慎重な立場がとられていた。しかし，2013年に4例の検出が報告されたことで，ノイズなどの可能性が少なくなった。¹⁾ さらに，オーストラリアのパークス64 m電波望遠鏡だけでなく，ごく最近プエルトリコのアレシボ300 m電波望遠鏡でも検出が報告され，ますますその存在の信憑性が高まった。⁴⁾

高速電波バーストの起源に対する議論も非常に活発となり，多くのモデルが提唱され始めた。モデルが満たすべき主な条件は，数ミリ秒の持続時間，電波帯域での 10^{33} J の放出エネルギー，単位立方Gpcあたり年間およそ1万個の発生頻度である。持続時間の短さから，白色矮星や中性子星といったサイズが小さい天体が候補として考えられた。また放出エネルギーの大きさから，それらの天体が起こす極限的なイベントに付随するという考えが有力視されている。例えば，宇宙で最大の磁場を持つ天体である超強磁場中性子星（マグネター）が起こす巨大フレア，⁵⁾ 連星系を成している2つの中性子星の衝突合体，⁶⁾ 合体後一時的に形成する質量の大きい中性子星がブラックホールへ崩壊す

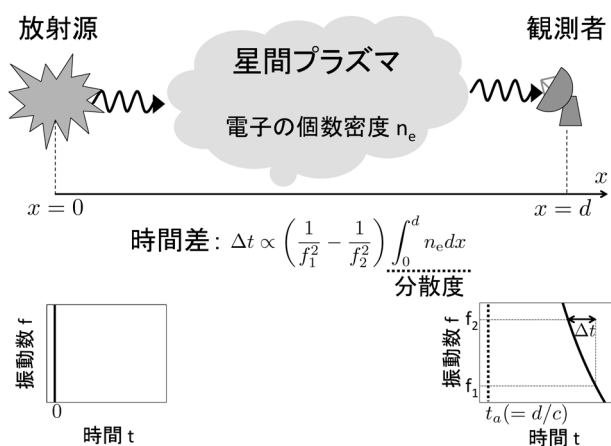


図1 星間プラズマ中の電磁波の伝搬の概略図。左下のパネルは、位置 $x=0$ の放射源で時刻 $t=0$ にすべての振動数の電磁波が同時に放出されたことを表す。右下のパネルは、位置 $x=d$ の観測者に振動数ごとの成分が到着する時刻を表す。時刻 $t=t_a (=d/c)$ は、真空中の光速 c の群速度を持つ電磁波が観測者に到着する時刻。振動数の低い成分の電磁波ほど観測者に到着する時刻が遅れていることがわかる。

る瞬間,⁷⁾ 連星系を成す2つの白色矮星の衝突合体などのシナリオが考えられている。⁸⁾ 一方で、銀河系内の天体が起源の可能性も原理的には残されており、恒星フレアの可能性が議論されている。⁹⁾ この他、宇宙ひもを含めて様々なアイデアが提唱されている。

中性子星の合体が高速電波バーストに関係する可能性がある。この場合、同時に重力波による大きなエネルギー放出が起こる。現在、重力波の直接検出を目指し、日本のKAGRAなど世界各地で地上重力波望遠鏡の建設が精力的に行われている。2010年代の後半には、中性子星の合体が年間で10イベント程度検出されることが見込まれている。よって近い将来の重力波天文学の幕開けとともに、高速電波バーストの理解が大きく進展する可能性がある。また、重力波天体の位置決定としての役割を果たすことも期待される。

高速電波バーストのような高輝度の電磁波の伝搬においては、誘導散乱などのプラズマとの非線形相互作用が影響し始める。放射源の環境を明らかにする上で、これは強力なツールに成り得る。しかし、この相互作用が観測される電磁波にどのような影響を及ぼし得るかは、まだ十分に理解されているとは言い難い。この点において、地上でのレーザー実験による検証も興味深い。

高速電波バーストはまだ数例しか検出されていない。しかし、将来的には電波干渉計SKA (Square Kilometer Array) によって最大で1時間に1イベントの検出が見込まれている。¹⁰⁾ 十分な統計量が得られると、高速電波バーストの様々な応用が期待できる。例えば、高速電波バーストは銀

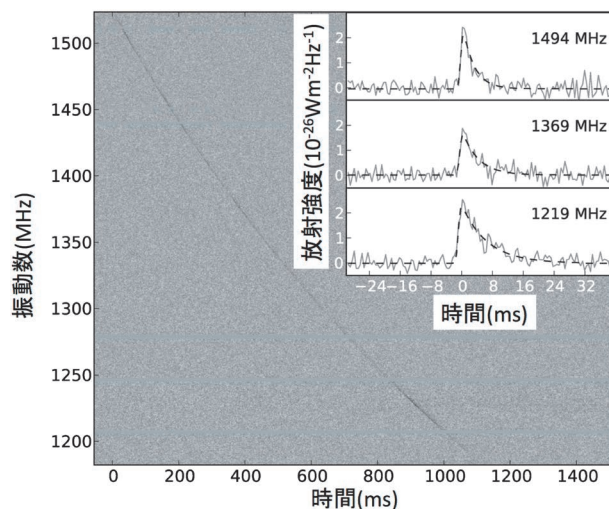


図2 観測されたFRB110220のダイナミックスペクトル (文献1より転載)。時刻の原点は、最初の信号を検出した時刻に対応する。振動数が低いほど、信号が検出される時間が遅れていることがわかる。振動数ごとの信号の持続時間は、数ミリ秒である (右上の3つのパネル)。

河系外空間の物質に影響を受けながら伝搬してくる。よって、これまで電磁波では暗くて検出できなかった銀河系外空間の物質分布を明らかにできる可能性がある。^{11,12)} さらに、分散度は距離の指標として使える可能性がある。すると、Ia型超新星などと同様に宇宙膨張を調べることが可能になる。このように、高速電波バーストは様々な方面への発展が期待される現象である。

参考文献

- 1) D. Thornton, *et al.*: Science **341** (2013) 53.
- 2) D. R. Lorimer, *et al.*: Science **318** (2007) 777.
- 3) 例えば、S. Burke-Spolaor, *et al.*: Astrophys. J. **727** (2011) 18.
- 4) L. G. Spitler, *et al.*: arXiv: 1404.2934 [astro-ph.HE].
- 5) 例えば、S. B. Popov and K. A. Postnov: arXiv: 0710.2006 [astro-ph].
- 6) T. Totani: Publ. Astron. Soc. Jpn. **65** (2013) L12.
- 7) H. Falcke and L. Rezzolla: Astron. Astrophys. **562** (2014) 137.
- 8) K. Kashiwayama, K. Ioka and P. Mészáros: Astrophys. J. **776** (2013) L39.
- 9) A. Loeb, Y. Shvartzvald and D. Maoz: Mon. Not. R. Astron. Soc. **439** (2014) L46.
- 10) D. R. Lorimer, A. Karastergiou, M. A. McLaughlin and S. Johnston: Mon. Not. R. Astron. Soc. **436** (2013) L5.
- 11) K. Ioka: Astrophys. J. **598** (2003) L79.
- 12) S. Inoue: Mon. Not. R. Astron. Soc. **348** (2004) 999.

木坂将大〈高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所〉

(2014年5月9日原稿受付)

*1 最初の発見の報告後、その論文²⁾の筆頭著者名から「ロリマーバースト」(Lorimer burst)と呼ばれていた。しかし、2013年以降は「高速電波バースト」(Fast Radio Burst)が定着している。

*2 1 Gpc = 10^9 pc. 1 pc は約 3×10^{16} m.