

FRB を用いた宇宙論モデルの検証手法

廣島 渚 (東京大学宇宙線研究所)

Abstract

FRB (Fast Radio Burst) は系外に由来するとみられている突発的な電波放出現象である。観測される電波の継続時間がミリ秒オーダーと短く、かつ非常に明るいという特徴を持つ。現在確認されているものは数個と少ないが、今後さらなる観測の報告が期待されている。

プラズマ中での電磁波の伝播速度が周波数の二乗に反比例するという性質を用いると、パルスの多周波観測から dispersion measure (DM) と呼ばれる量が決定できる。DM は視線にそって積分した自由電子柱密度であり、光学観測とは異なった手段で観測者と天体の間にある物質の量を決定する。電波域かつパルスのという FRB の性質は DM を求めるのに適している。

多数の FRB から DM の分布を決定し、宇宙論的なバリオン分布のモデルが予言する計算される DM の分布と比較することでモデルの妥当性を検討できる。本講演では論文 (McQuinn 2014) のレビューを行い、実際に現在得られているシミュレーション結果に対して DM の確率分布を計算すると Gaussian と比べて high DM で確率分布が大きくなることを示す。また、まだなじみの薄い現象である FRB の概説を行い、将来的に FRB が遠方宇宙の探索に寄与する可能性について議論する。

1 Introduction

2007 年に Lorimer らによって Fast Radio Burst (FRB) と呼ばれる突発的な電波放出現象が報告され (Lorimer et al. 2013)、その後 2013 年に Thornton らの論文 (Thornton et al. 2013) でこれが人工的なシグナルではない事が確認されるようになった。FRB は観測される継続時間 \sim msec の間におよそ 10^{38-40} erg のエネルギーを放出する電波パルスである。このエネルギースケールに対応する既知の天体現象は存在せず、また、電波以外の波長の電磁波が FRB と同時に観測された例もない。発生機構については中性子星連星合体やマグネターからのパルス、中性子星の重力崩壊など様々な説が提案されているがまだ議論の途中である。

FRB の特徴の一つに dispersion measure (DM) の値が $500-1000\text{pc}/\text{cm}^3$ 程度と大きいことが挙げられる。DM は「視線上で積分した自由電子柱密度」で定義され、プラズマ中の電磁波の伝播速度が周波数の 2 乗に反比例することを用いると電磁波パルスの多周波観測から決定できる。DM が大きいということは視線にある自由電子が多いという事なので、FRB は遠方で起こった現象であることが示唆される。す

なわち、FRB は $z \sim 1$ の遠方における高エネルギー天体現象であると考えられる。FRB のイベントレートを観測から見積もるとおよそ $10^4/\text{day}/\text{sky}$ であり、今後さらなる観測が期待されている。FRB を利用すると、光学的に暗いバリオンの分布や He 再結合時期などを特定しうること (Kulkarni, S.R., et al 2014) が示されている。

宇宙のバリオンがすべて電離しており、かつ一様に分布しているとすると、 z に対し DM の値は一意に決まる。しかし、分布が一様でない場合には DM 値が同じ z についても視線の方向によって異なる事がありうる。FRB が多数観測されればこの視線方向の差を DM の確率分布に焼き直すことができる。バリオン分布のモデルを仮定して計算した DM の確率分布と観測結果を比較することによりハローの分布を制限する手法が McQuinn によって提案された。以下では、この計算手法と結果について論じ、将来的な有用性と課題を議論する。

2 Methods&Result

星間空間に存在するプラズマの効果により、天体からの電磁波は群速度

$$v = c\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (1)$$

で伝播する。ここで $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m_e}$ はプラズマ周波数である。これより、天体までの距離が d であるとき到来するのにかかる時間は

$$t = \int_0^d \frac{ds}{v_g} \sim \frac{d}{c} + \frac{e^2}{2\pi m_e c} \frac{1}{f^2} \int_0^d n_e ds \quad (2)$$

となる。ここで右辺に現れる視線で積分した自由電子柱密度を dispersion measure (DM) という。すなわち

$$DM = \int_0^d n_e ds \quad (3)$$

である。DM を用いると、周波数 f_1 、 f_2 の電磁波の到来時刻差は

$$\Delta t(f_1, f_2) = \frac{e^2}{2\pi m_e c} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) DM \quad (4)$$

とかけるので、電磁波パルスを多周波観測することで視線上の自由電子柱密度が求められる。プラズマ効果による到来電磁波の遅延を実際に観測する際には、宇宙膨張の効果を入れて

$$DM(z_s) = \int_0^{z_s} \frac{n_e(z, \hat{n})}{(1+z)^2} \frac{cdz}{H(z)} \quad (5)$$

と表せる。

宇宙の中のバリオン分布が一様であれば、宇宙論での密度パラメータを仮定することで DM の値は視線の方向によらず z に対し一意に決まる。宇宙論モデルとして平坦な Λ CDM モデルを採用した場合には

$$DM(z_s) = \frac{3cH_0\Omega_b}{8\pi Gm_p} \int_0^{z_s} \frac{1+z}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} dz \quad (6)$$

である。これを平均値として図 1 下図の黒い実線で示した。しかし、バリオン分布が非一様である場合、同じ z でも視線方向による DM 値のばらつきが生じる。FRB の観測個数が増えれば、このばらつきが求められるはずである (将来的には最大で 1event/hour/sky の FRB 観測が見込まれている

(Hassall et al. 2013))。各 z で DM の値を決定して DM の値ごとにイベントの個数を数えれば DM の確率分布を決定できる。これを利用して宇宙のバリオン分布を決定することを考える。

バリオン分布のモデルを仮定すると、DM の平均値に対する分散 $\sigma(DM)$ 及び確率分布が決定できる。宇宙空間にダークマターハローが分布しており、それに付随して電離したバリオンが存在している状況を考える。視線がこのようなハローを横切ると DM の値が増加するので、ハローの衝突パラメータと質量をパラメータにして各ハローによる DM の増分を評価する。具体的に Sheth&Tormen の halo mass function (Sheth, &Tormen 2002) 及び Faucher-Giguere et al.(Faucher-Giguere et al. 2011) によるハロー中のバリオン質量比の数値シミュレーション結果を用いて DM の分散と確率分布を計算する。図 1 の上図で視線を横切るハローの平均個数を、下図で DM の分散及び一様なバリオン分布を仮定した時の平均値を赤方偏移の関数として示した：

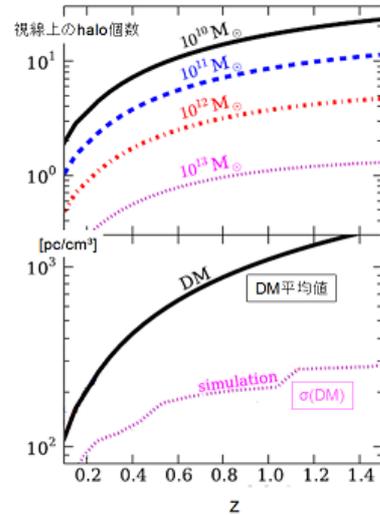


図 1: 上: 視線を横切るハローの個数、下: DM の平均値及び分散 (McQuinn(2014),Fig1 より)

分散と各ハローによる DM の増分 $\Delta_{DM}(R, m_h)$ を計算すると、以下の式を用いて具体的に確率分布 $P(DM)$ が計算できる。ここでパラメータ R 、 m_h はそれぞれハローの衝突パラメータと質量であり、 t に

より Δ_{DM} のフーリエ成分を表す。

$$\tilde{P}(t|z_s) = \exp\left(\int_0^{z_s} \frac{cdz}{H(z)} [A + B^2 \Delta\chi \sigma_{\Delta\chi}^2]\right) \quad (7)$$

$$A = \int dm_h d^2R \frac{n(m_h, z)}{a^2} \times (\exp[-it\Delta_{DM}(R, m_h)] - 1) \quad (8)$$

$$B = \int dm_h d^2R \frac{n(m_h, z)}{a^2} \times b(m_h, z) (\exp[-it\Delta_{DM}(R, m_h)] - 1) \quad (9)$$

$$\sigma_{\Delta\chi}^2 = \int \frac{d^2k_{\perp} dk_{\parallel}}{(2\pi)^3} P_{\delta}(k) \text{sinc}^2\left[\frac{\Delta\chi k_{\parallel}}{2}\right] \quad (10)$$

$$P(DM) = \int dt \tilde{P}(t|z_s) \exp[it\Delta_{DM}] \quad (11)$$

図 1 で求めた分散を与えるバリオン分布に対する $z=1$ での確率分布を図 2 で示す：

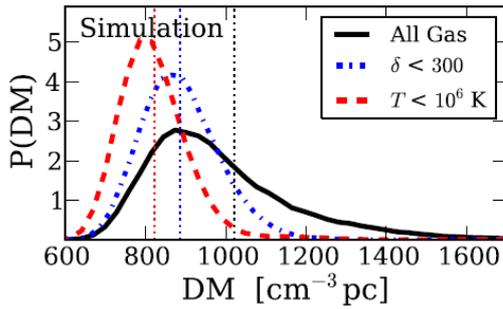


図 2: DM の確率分布 (McQuinn(2014))

図 2 の黒線が全てのバリオン成分を入れた場合であり、赤線と青線はそれぞれ寄与するバリオン成分を温度 $T < 10^6 \text{K}$ 以下の低温のものと自由電子数密度 n_e が 300 以下の低密度のものに限定した場合の確率分布である。これより、低温、あるいは低密度のバリオン成分の寄与のみ考えた時の DM の確率分布が Gaussian 的であるのに対し、実際のバリオン分布が DM の大きい側にテールをひくのが分かる。すなわち、DM の確率分布を観測的に求めたとき、高温あるいは高密度のハローの寄与で非 Gaussian の分布が得られた。この高温成分は図 1 上図の”重い”ハロー ($m_h > 10^{13} M_{\odot}$ など) に対応するものである。仮に観測される DM の分布が低 DM 側にかたよった

とすると、それは比較的小さなハローに付随したバリオンの寄与を意味するので、光学的に得られないバリオン分布の情報が得られたことになる。このように観測で得られた DM の分布をフィッティングすることで、考えているバリオン分布のモデルの精度を上げることができる。

3 Discussion

バリオン分布を仮定して計算した DM の確率分布を観測結果と比較するには、観測で DM と z を独立に決定して分布を求める必要がある。現在 FRB 源の z の値は DM の大きさから見積もられているので、今回紹介した方法を用いてバリオン分布のモデルを検証するには FRB 源の z を何らかの独立な方法で決定しなければならない。さらに、現在の FRB 観測の個数が 6 個程度と少ないことに対し、確率分布を決定するには各 z で少なくとも 20 個程度の FRB を観測する必要があると考えられる。

4 Conclusion

dispersion measure(DM) の確率分布をシミュレーションにより求めたバリオン分布に対し計算すると Gaussian からずれて DM の大きい側にテールをひくことが分かった。これは、個数密度の少ない大きな(重い)ハローや密度の高いハローに付随するバリオンの寄与が無視できないためである。すなわち、DM の分布を求めることで遠方宇宙での大質量ハローの分布が制限できる。Fast Radio Burst(FRB)はこの DM 分布を求めるためのツールになる。FRB の観測例はまだ少ないが、将来的には分布を決定するのに十分な数の FRB 観測が可能であると期待される。

Reference

McQuinn, M., 2014, ApJL, 780, L33
 Lorimer, D.R., Baies, M., McLaughlin, M.A., Narkevic, D.J., & Crawford, F. 2006, MNRAS, 366, 153
 Thornton, D., Stappers, B., Bailes, M., et al., 2013, Sci, 341, 53

2014 年度 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校

Hassall, T. E., Keane, E. F., & Fender, R. P., 2013, MNRAS, 436, 371

Sheth, R. K., & Tormen, G. 2002, MNRAS, 329, 61

Faucher-Giguere, C.-A., Keres, D., & Ma, C.-
P. 2011, MNRAS, 417, 2982

Kulkarni, S. R., et al, 2014, arXiv:1402.4766

hang, P., & Sheth, R. K. 2007, ApJ, 671, 14