

## パルサーとマグネター

植松 聖人 (新潟大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

本発表は論文 (Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1) のレビューである。高エネルギーの X 線パルサーである異常 X 線パルサー (AXPs) や、不規則な間隔で  $\gamma$  線及び X 線の大規模なバーストを放射する軟 X 線リピーター (SGRs) はマグネターと解釈される。マグネターは自身の磁気エネルギーを、電磁波の放射エネルギー源とする孤立した中性子星である。他のパルサーの放射のエネルギー源とされる、ガスの降着、自転、残留熱では AXPs/SGRs の放射活動に十分なエネルギーを供給することができないと一般的に考えられている。このように考えられている理由や現在考案されているマグネターのモデルについて、AXPs/SGRs の観測に基く特性についても触れながら紹介する。さらに、マグネターについて最近発見された弱い外部磁気双極子場と、AXPs/SGRs と他のパルサーとのいくつかの関連についても述べる。

### 1 Introduction

パルサーである中性子星 (NSs) からの電磁波の放射活動における磁気的エネルギーとの関連性は 40 年以上も前から考案されており、AXPs/SGRs の発見によって構築されている。AXPs/SGRs では自転の減少、大きなバーストとフレアによる放射が観測されており、AXPs/SGRs はこれらの特徴を持つ孤立した NSs であるとされる。そしてそれらは自転減少を放射のエネルギー源とするパルサーよりも強い軟硬 X 線の光度を持つ。

歴史上、AXPs と SGRs は発見のされ方により全くの別物であるとされていたが、多くの観測によりそれらの間には本質的な違いはないことが分かった。ほとんどの AXPs は軟 X 線 ( $<10$  keV) の強いパルサーであるとして発見され、初めはガスの降着をエネルギー源とする X 線連星とは区別されなかった。そしてそれらは、長い期間での自転の減少と軟 X 線スペクトルがあるという点で多くの連星パルサーとは異っていると指摘された。一方、SGRs は光線や短いバーストの観測を通して、硬 X 線、軟 X 線領域で発見され、 $\gamma$  線バーストのサブクラスとして分類された。SGRs の持続的な X 線のパルスを確認し、AXPs と同じパルス源を持つことが分かった。

AXPs/SGRs に対しては他の解釈もあるが、マグネター、すなわち高磁化された NSs、という考えを含むモデルが AXPs と SGRs の特性を最もよく説明

できているとして現在広く受け入れられている。マグネターモデルによると、AXPs/SGRs のパルス源からの放射のエネルギー源は、それらの強磁場中に蓄えられたエネルギーであるとされ、その磁場は磁気圏で  $B \sim 10^{13} - 10^{15}$  G に及ぶ。NS の内部では磁場はより一層強いと思われる。このモデルは他のパルサー、すなわちガスの降着、自転、残留熱を放射のエネルギー源とする NSs とは異なる。

ここ数年、マグネターと他のパルサーとの違いは、単に磁場の強さに基づいているだけではないと考えられている。この考えは、AXPs/SGRs の磁場の値を超越していると推論されるいくつかのパルサーの存在より、すでに考案されていた。これらのパルサーは決してバーストやフレア、または磁場のエネルギーによる放射であると推論されるような情報を示すことはない。最近の、比較的弱い外部磁気双極子場にもかかわらずバーストの特性に基づく AXPs/SGRs と分類される、NSs の発見から、AXPs/SGRs と他のパルサーにおける重要な識別は、おそらく NS の内部の磁場の強さと幾何学的要因に関連すると思われる。

## 2 Why a different energy source ?

### 2.1 Rotation

自転周期が  $P = 2\pi/\Omega$  の自転エネルギーは  $E_{rot} = I\Omega^2/2 = 2 \times 10^{46} I_{45} P^{-2}$  erg である。ここで  $I = I_{45} 10^{45}$  g cm<sup>2</sup> は星の慣性モーメントである。パルサーの発見後すぐ、それらの自転周期が増していることが分かり、それは自転エネルギー  $\dot{E}_{rot}$  の減少を意味している。

AXPs/SGRs の周期導関数  $\dot{P}$  は電波パルサーの周期導関数より大きい、その大きな周期が与えるエネルギー  $\dot{E} \sim 10^{32} - 10^{34}$  erg s<sup>-1</sup> はそれらの光度に与えるエネルギーにしては小さすぎる。これは AXPs/SGRs を、自転をエネルギー源とする NSs であるとして説明することは不可能であることを示している。

### 2.2 Accretion

X 線連星のプロセスは連星によるガスの降着として説明される。私達の銀河系や他の銀河系には数百個のガスの降着による NSs があることが分かっており、それらの全ては連星の一方からのガスを降着させている。

今では AXP に分類されているいくつかの X 線源は、かつて、連星の一方によるガスの降着によってエネルギーを得ていたと考えられており、他の X 線パルサーからの類推に基づくとその当時それが最も自然な解釈であった。しかし、近赤外線 (NIR) などの光学的な精密な観測において、もしこれらが大きい質量の連星であるならば観測されるであろう片方の明い光を見つけることはできなかった。さらに、X 線周期の研究からは、連星の軌道運動から期待されるドップラーシフトが示されることはなく、また低質量 X 線連星についても示されることはなかった。

これらの X 線源において、ガスの降着に基づいたモデルへの主な反論は、AXPs/SGRs で観測されたバーストやフレアを簡単に説明できないことである。従ってこれらの現象を説明するためにはさらなるいくつかのメカニズムやエネルギー源が要求される。

### 2.3 Residual heat

NSs が誕生した時、誕生時には  $\sim 10^{11}$  K であった NSs の内部の温度が急に  $\sim 10^9$  K に下った。 $\sim 10^5 - 10^6$  年間継続する内部温度の冷却メカニズムは、星の等温中心核からのニュートリノの放射によるものである。軟 X 線帯の放射がピークになったとき表面温度は数  $10^5$  から  $10^6$  K になり、星の表面の温度勾配は自転周期による観測に影響を与える。

NS の熱的エネルギーだけでは説明することができない、AXPs/SGRs における二つの観測的特性がある：(i) 短いバーストから巨大なフレアに及ぶ変化の多様性、(ii) 硬スペクトルの持続的な放射、である。硬 X 線の短いバーストは歴史上 SGRs の特性であると定義されていたが、今ではほとんど全ての AXPs で観測されている。そしてそれらの持続時間 ( $\sim 0.01 - 1$  s)、全くスペクトル変化のない硬スペクトル (温度特性が  $\sim 30 - 40$  keV) の存在、そして硬 X 線の高いピーク光度 ( $\sim 10^{42}$  erg s<sup>-1</sup> にまで及ぶ) は NS の残留熱を AXPs/SGRs の放射のエネルギー源とする考えでは説明できない。そのため、NS の磁気圏における熱的でない要因が求められる。

### 2.4 Magnetic energy

上述の通り、他の NSs の放射活動における主なエネルギーメカニズムは、AXPs/SGRs の特性を説明する上で問題がある。これは磁気エネルギーという代案、またはマグネターに基づいたモデルへの発展へと繋がった。

半径が 12 km の NS の、全体積を満す磁場が  $B_{15} = 10^{15}$  G である NS の磁気エネルギーは  $3 \times 10^{47} B_{15}^2$  erg である。これは AXPs/SGRs の寿命である  $\sim 10^5$  年間、 $\sim 10^{35}$  erg s<sup>-1</sup> の光度にエネルギーを供給するには十分である。しばしば超新星の残骸 (SNRs)、または大きな連星からのガスの降着をもエネルギー源として考慮される。

孤立した NSs の磁場の見積りは以下の関係式で与えられ、AXPs/SGRs に高磁場が存在することの証拠とされている。

$$B_d = 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P\dot{P}} \text{ G} \quad (1)$$

これは自転周期とその時間微分による導関数の関数として磁気双極子場を与える。この関係は、観測された自転の減少が真空中で回転する磁気双極子からの放射によって引き起こされるという、簡単でかつ理想的な仮定に基づいている。

式 (1) から AXP/SGRs の磁場は典型的な電波パルサーの磁場より大きく  $B_d \sim 10^{15}$  G にまで達することが分かる。

### 3 The magnetar model

NS が誕生した時、高いニュートリノ光度  $L_\nu > 10^{52}$  erg s<sup>-1</sup> によって働いている  $\sim 3\text{--}10$  ms の対流の転覆時間よりも NS の初期自転周期  $P_o$  が短ければ強く磁化された NS が形成される。この場合結果的に生じるダイナモは、 $3 \times 10^{17} (P_o/1\text{ms})^{-1}$  G の磁場を生じさせる。原始の NS において急激なニュートリノ冷却は、小さな磁場を拡大する強い対流を起こすために必要不可欠である。そのようなダイナモはわずか数秒間しか働かないが、原理的には  $10^{16}$  G の磁場を生じさせることができ、NS の内部では、多極子性の磁場構造と強いトロイダル型の内部構造を成していると思われる。

巨大フレアのエネルギー源は磁気エネルギーであるということは明かであるが、これがどのようにして起こるのか、そしてエネルギーが解放される前はどこにそのエネルギーが蓄積されているのかが未だに謎のままである。考えられている二つの主なシナリオは、一つは地殻による弾性エネルギーの蓄積であり、それは最終的に大きなスケールの地割れを引き起こす。もう一つは、磁気圏への徐々なエネルギーの注入であり、それにより磁場は不安定になる。不安定な磁場が安定な磁場へと再編成された時、エネルギーが解放される。最初のモデルでは張力がある限界を超過した時にフレアが起こるが、一方で、磁気圏のモデルではどの過程が急速なエネルギーの解放を生み出すのかを説明することは難しい。

### 4 Magnetars with low external field

最近まで知られていた最も低い磁場をもつ AXP/SGR(式 (1) で与えられる) は、 $B_d = 6 \times 10^{13}$  G である 1E2259+586 であり、それは  $B_{QED} = \frac{m^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^{13}$  G の量子臨界磁場よりもわずかに大きいだけである。

2009 年 6 月に観測された SGR0418+5729 の自転減少率、磁場の上限はそれぞれ  $\dot{P} < 6 \times 10^{-15}$  ss<sup>-1</sup>、 $B_d < 7.5 \times 10^{12}$  G と、マグネターの全ての典型的な特徴を示す線源としては先例のない値である。

また Swift J1822-1606 と CXO J1647-4552 の表面磁場はそれぞれ  $B_d = 5 \times 10^{13}$  G、 $B_d < 7 \times 10^{13}$  G である。これらの磁場は二つの線源から推測される双極子モーメントによって見積られ、SGR0418+5729 の磁場ほど低くはないが、それでも "従来の" AXP/SGRs よりは低い。

これらの発見は、強い磁気双極子モーメントはマグネターに必然なものではないことを示している。実際、マグネターの放射活動や放射のエネルギー源の要因は、内部磁場の強さでもあるが、主な要因は NS の地殻の崩壊/地割れや外部磁場を歪ませるなどの原因となるトロイダル型の内部構造である。

もしかすると磁気圏は磁気双極子ではなく、より高いオーダーの磁気多極子からの寄与を含んでいるかもしれない。その磁気多極子は星の表面近くの磁場を増加させるが、半径範囲で急激な磁場の減衰を与え、自転減少には寄与しない。

### 5 Is there evidence for magnetic activity in other of NSs ?

前のセクションで述べた様に、強い磁気双極子場はマグネターの放射活動の始まりにおいて必要不可欠な要素ではない。これは、式 (1) で見積もられるような "通常の" 磁場の値である NSs も、例えばバーストやフレアのように、マグネターのような振舞いを示す可能性がある。実際、いくつかの例が最近分かっているので一つの例を挙げる。

Kes75SNR の中央にある 0.3 秒のパルサー PSR J1846-0258 は、通常の自転をエネルギー源とする X 線パルサーであると考えられており、 $\dot{E}_{rot} = 8 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$  である。これはパルサーと星雲の X 線放射のエネルギー源には十分な大きさ ( $L_X$  はそれぞれ  $2.6 \times 10^{34}$  と  $1.4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ ) である。2008 年 5 月、PSR J1846-0258 は AXP/SGRs で観測されたバーストによく似た四つの短いバーストを観測した。そのバーストの活動は大きな自転上昇のグリッチを伴った。これらの現象はマグネターの典型であり、PSR J1846-0258 の磁気双極子場は  $B_d = 5 \times 10^{13} \text{ G}$  と推測される。 $\dot{P}$  が測定されている電波パルサーの約五分の一は SGR0418+5729 より大きい  $B_d$  を持っており、これらはマグネターの良い隠れ場である。

## 6 Conclusion

AXPs/SGRs の特性を説明するマグネターのモデルは  $\sim 10^{15} \text{ G}$  の磁場を持つ NSs の存在を示唆する。それらの活動的なフレアは太陽系外から地球に届く最も大きい放射フラックスであり、それはたいてい地球の大気圏で観測できる。

マグネターは、ここでは議論されていない他の天体物理学的要因とも関係がある。これらは例えば、超新星爆発、線バーストの生成、超高エネルギーな宇宙線の加速、ニュートリノの生成、そして重力波の放射である。私達が観測したり研究したりできる宇宙空間だけでは、AXPs/SGRs は間違いなく、理論的研究や観測における興味深い天体物理学的内容を残すであろう。

## Reference

Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1