

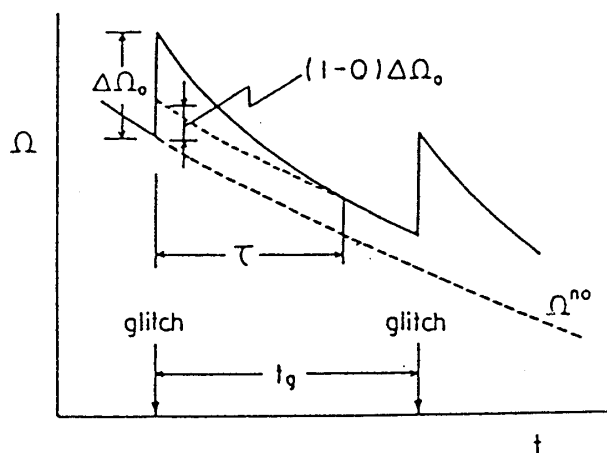
## パルサーグリッチと中性子星の構造

岩手大・人社 高塚 龍之

パルサーのグリッチ現象は中性子星の内部構造についてどんな情報をもたらしつつあるか、これまで提案されてきたグリッチのモデルの小レビューを通して、これを論ずる。また、我々が $\pi$ 凝縮中性子星という観点から提案しているモデルについてその考え方を中心に述べる。

## 1. Crab, Velaのマクログリッチ

パルサーは回転する中性子星であるが、この回転が突然速くなり緩和にはマクロな時間を要する現象はグリッチ (glitch) と呼ばれ中性子星内部の情報源として大変興味深い。グリッチがあると Fig.1 にスケッチしたような $\Omega$  (角速度) -  $t$  (時間) 関係が観測され次式でよく fit できる ( $\Delta\Omega_0$

Fig.1 グリッチに伴う角速度 $\Omega$ と時間 $t$ との関係。

は jump,  $\Omega^{no}$  はグリッチの無い場合) :

$$\Omega(t) = \Omega^{no}(t) + \Delta\Omega_0(Qe^{-t/\tau} + (1-Q)) \quad (1)$$

これまでマクログリッチ (macroglitch) と名づけられる典型的なものは Crab パルサーで 4 回, Vela パルサーで 8 回観測されている。特徴を表 1 にまとめた。

表 1. Crab, Vela のマクログリッチと差異。( ) 内の値はグリッチによってバラツキがあることを示す。Vela の  $\tau$  はこれ以外に 2~3 日の短い成分も観測されている。

	Crab	Vela
年齢 (年)	$\sim 10^3$	$\sim 10^4$
$\Omega$ ( $s^{-1}$ )	188.5	70.4
$\dot{\Omega}$ ( $s^{-2}$ )	$-2.40 \times 10^{-9}$	$-9.85 \times 10^{-11}$
$\Delta\Omega_0/\Omega$	$(0.6 \sim 6.7) \times 10^{-8}$	$(1.1 \sim 3.1) \times 10^{-6}$
$\tau$	(1 日 ~ 1 週間)	(1 ヶ月 ~ 1 年)
$t_g$ (年)	(3 ~ 11)	(1 ~ 4)
観測回数	4	8

## 2. 中性子星の多層構造

Fig.2 は核物理が描く中性子星の構造である。これは標準的とされる Bethe-Johnson の状態方程式に  $\pi$  凝縮の効果を加味して得られた 1 例である<sup>1)</sup>。後に述べるパルサーグリッチのモデルの立脚点と関連して次の点に注目しておく：

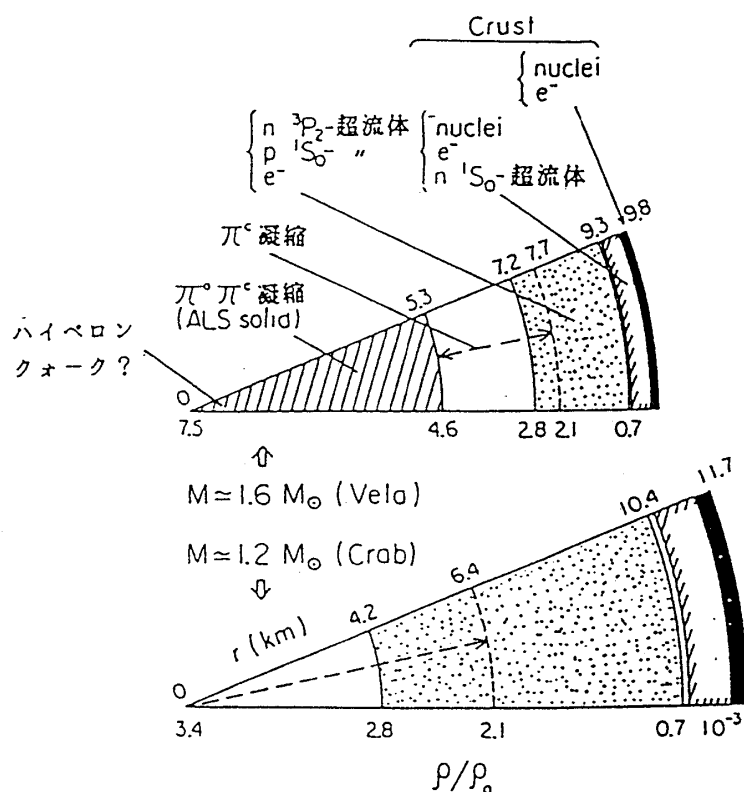


Fig.2 中性子星の多層構造と質量  $M$  依存性。  $\rho_0$  ( $\approx 2.8 \times 10^{14} \text{g/cc}$ ) は核密度。

(イ)  $n$  の超流体には  $^1S_0$ ,  $^3P_2$  型の 2 種があり、これらは強さ、性質のみならず存在密度域が異なる (前者は crust で原子核結晶と共存, 後者は core 領域で  $p$  の  $^1S_0$  超流体と共存)。…… Two Superfluids。

(ロ) 中性  $\pi$  ( $\pi^0$ ) 凝縮はスピン-アイソスピン秩序を伴い 1 次元的に局在した核子「固体」をもたらす…… ALS 固体。

(ハ) 荷電  $\pi$  ( $\pi^c$ ) 凝縮 ( $\pi^0$  凝縮と共存できる) はニュートリノ放出を加速させ、効率のよい冷却機構をもたらす…… Pion Cooling。

(ニ) 超流体や  $\pi$  凝縮相が星全体に占める割合 (従って受けもつ慣性能率  $I_i$ ) は星の質量  $M$  に強く依存する…… 構造の  $M$  依存性。

## 3. グリッチのモデル

マクロな緩和時間  $\tau$  (表 1) が観測されていることは超流体存在の直接的とも云える証拠であり, Fig.2 の多層構造について少なくとも超流体 ( $^1S_0$  か  $^3P_2$  かは問わず) 部分を観測面から裏付けるものである。  $Q$  は超流体が星全体に占める割合と関係していると考えるのが自然で, Crab ( $Q \sim 0.9$ ) と Vela ( $\leq 0.05$ ) は相当異った構造をもつことが暗示される。ここではグリッチモデルの代表的な考え方を簡単に紹介する。歴史的経緯, 詳細は以前の報告<sup>2)</sup>で補っていただければ幸いである。

**星震モデル**

1969年, Baym-Pethick-Pines-Ruderman<sup>3)</sup> は中性子星を2成分;第1成分=荷電粒子系+ノーマルな中性粒子系, 第2成分= $n$ 超流体, でとらえ, グリッチは第1成分での星震 (starquake), マクロな  $\tau$  は星震が超流体に伝わって星全体が corotate するに要する時間, という2成分星震モデルを提案した (この場合, Crab の  $Q \sim 0.9$  を説明するにはどうしても<sup>3)</sup>  $P_2$  超流体が必要となる)。星震の起源は, パルサーのスピンダウン ( $\dot{\Omega} < 0$ )  $\rightarrow$  遠心力の減少に伴い crust にストレスが蓄積  $\rightarrow$  ある限界を越えると crack し星の偏平度が減少 ( $\Delta I < 0$ )  $\rightarrow$  角運動量保存により突然のスピンアップ ( $\Omega \Delta I + \Delta \Omega_0 I = 0 \rightarrow \Delta \Omega_0 \rightarrow 0$ ), 即ちグリッチ, と考える。

当初, 星震は crust で起こるとする crustquake を考えてきた<sup>3)</sup>。しかし Crab では実によくゆくものの Vela ではそうでない。これは主として Vela の星震が Crab より2ケタも大きいことによる (表1)。そこで中性子星の中心部に核子固体を仮定し, Vela はここで星震が起こるとする corequake モデルを導入することになった<sup>4)</sup>。crust でのクーロン結晶に較べて核子固体は核力結晶であるから震度が大きく  $\Delta \Omega_0 / \Omega$  が2ケタ大きいことを合理的に説明できる。

**難点**

ところが後になって次の難点が浮び上ってきた:

- (A) geometrical caging という通常の意味での核子固体はありそうにない…… No solid core.
- (B) corequake で解放される energy が星を加熱し, これが蓄積されると表面温度の観測値と矛盾する…… Heating。

といったモデル設定の根幹にかかわる問題である。最近観測面での進展により  $\dot{\Omega}$  の解析も進み次の点に加わっている。

- (C)  $\tau_1$  (a few months  $\sim$  a year),  $\tau_2$  (a few days  $\sim$  a week) というように long, short の2つの緩和時間をもった指数関数が必要であり<sup>5)</sup>, もとの starquake モデルの Eq. (1) では不十分である…… Two terms。

**「渦糸クリープ」モデル**

上記の難点もあって, Alper-Pines 等のグループは starquake モデルを離れ, 「pin-unpin」あるいは「Vortex Creep」モデルと名付けうるグリッチモデルを唱導している<sup>6,7)</sup>。このモデルは第2成分 ( $n$  超流体のうち crust に存在する  $^1S_0$  型。core 領域の  $^3P_2$  型は第1成分に含める) の振舞とグリッチを関係づけようとするものである。そのシナリオは, パルサーのスピンダウン (容器である crust のスピンダウン)  $\rightarrow$  中味の超流体がこれに follow する為には渦糸密度の減少が必要, 即ち, 渦糸の移動が必要  $\rightarrow$  ところが原子核結晶によってピン止めされ防げられる  $\rightarrow$  超流体が crust に較べ大きい角速度  $\Omega_s > \Omega$  をもつ  $\rightarrow$  ピン止めをはずそうとする magnus 力が  $\Omega$  と  $\Omega_s$  の mismatch  $\omega \equiv \Omega_s - \Omega$  に比例して時間と共に増大  $\rightarrow$  magnus 力 = ピン止め力という臨界値に達したとき ( $\omega = \omega_{cr}$ ) ピンはずれがなだれ的に起こり, 超流体の過剰角運動量を crust に移行, 即ち, グリッチ  $\rightarrow$  渦糸のクリープ過程を通じて糸が再び平衡状態を回復するに要する時間が  $\tau$ , というものである。提案された当初 (「pin-unpin」<sup>6)</sup>) はグリッチ間隔  $t_g$  の説明がうまくゆくとしたが第4回目のグリッチの予想はずれた。その後は postglitch の  $\Omega$  の説明に力点を置いている (「Vortex Creep」<sup>7)</sup>)。モデルの基盤であるピン止めは起こることが微視的に基礎づけられること,  $\tau$  と星の内部温度  $T$  が関係づけられること, postglitch の振舞を説明するに充分 flexible であること等, 興味深いモデルではあるがいくつかの問題点も指摘される<sup>1)</sup>。

## 問題点

(i) ピンはずれは起こるか。 $t_g = \omega_{cr} / |\dot{\Omega}|$  から  $\omega_{cr}$  を求めると, Vela では  $\sim (3-12) \times 10^{-3}$  rad/s, Crab では  $\sim (4-9) \times 10^{-1}$  rad/s と非常に小さい  $\omega_{cr}$  が必要となる。一方,  $^1S_0$  超流体の現実的パラメータからは  $\omega_{cr} \sim (24-2)$  rad/s と計算され, (1-3) ケタも大きい。観測値  $t_g$  と合うためにはきわめて弱いピン止め領域を持ち込まざるを得ないが, このとき, ピン止めそのものの概念が不明になる。

(ii) だだれ的に起こるか。 $\Omega = \hbar n_v / 4m$  より渦糸面密度  $n_v$  を求め, 渦糸間隔  $l = 1/\sqrt{n_v}$  を算出すると原子核間距離の  $10^{-9}$  倍になる。即ち,  $10^{-9}$  lattices あたり vortex は 1 本という状況だからだだれ的にピンはずれが起こる (1 度に  $10^{11} \sim 10^{12}$  本) ような collective effect は考えづらい。

(iii) 関与するピン止め域の慣性能率  $I_{pin}$  と星全体の  $I$  の比を  $I_{pin} \omega_{cr} \doteq I \Delta \Omega_0$  から算定してみると, Vela では  $\sim (1-4) \times 10^{-2}$ , Crab では  $\sim (4-10) \times 10^{-6}$  となる。Crab はよいとしても, Vela は中性子星モデルからの値と矛盾する ( $\leq 0.01$  で  $4 \times 10^{-2}$  は無理)。また,  $I_{pin}/I$  が 2 つのパルサーで  $\sim 10^4$  倍も違うのをどう解釈するか。

(iv) Fig.1 に示した  $Q$  は重要な観測量だが, この値及び Crab, Vela での違い (表 1) をどう説明するか。

(v) (i) とも関係するが  $t_g$  をどう考えるか。熱的ゆらぎによるピンはずれという事で満足しうるのか ( $t_g$  の算出はできない)。

ごく最近, 観測面から  $\dot{\Omega}$  の振舞は渦糸クリープモデルが導くフェルミ関数型ではなく指数関数型でよいことが判ってきた<sup>5)</sup>。即ち,  $|\Delta \dot{\Omega}| \equiv |\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_\infty|$  について観測は Fig.3a 型であり渦糸クリープモデルの導く Fig.3b 型ではない (オフセットタイム  $t_0$  が存在するのが特徴)。これは星震モデルの結果に符合する (Eq.(1))。以前はグリッチがいつ起きたかについて数日  $\sim$  1 ヶ月の不定性があったため, 両型の差異は顕在しなかったが, Vela の第 8 回目は発生後 2 分以内にキャッチされたから深刻である。この点について彼等は次のように説明している<sup>8)</sup>。2 つの case がある。1 つは年令  $10^6$  年より若いパルサーの場合で, mismatch  $\omega$  が  $\omega \ll \omega_{cr}$  でもグリッチが起こるとする。この場合  $|\Delta \dot{\Omega}|$  は Fig.3a 型の指数関数型が得られる (linear responses)。もう 1 つは年令  $10^6$  年以上の年老いたパルサーの場合で,  $\omega \sim \omega_{cr}$  となってグリッチが起こる。このとき  $t_0 \ll \tau$  なら Fig.3a 型に,  $t_0 \gg \tau$  なら従来のフェルミ関数型 Fig.3b が結果する (nonlinear response)。

フェルミ関数型は渦糸クリープモデルの専売特許である。従って old pulsar でオフセットタイムが観測されるかどうか key となる。

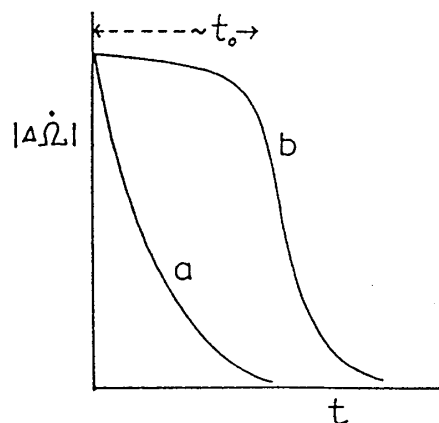


Fig.3  $|\Delta \dot{\Omega}(t)|$  の関数型 (模式図)。a: 指数関数型, b: フェルミ関数型 (オフセットタイム  $t_0$  があるのが特徴)。

## 4. 我々のモデル

以上みてきたようにグリッチのモデルはまだ open で広く可能性をとって考えるべき段階といえる。ところで Fig.2 に示した  $\pi$  凝縮相はこれまでのモデル設定に考慮されて来なかった。最近、玉垣と筆者は「 $\pi$  凝縮中性子星」という観点から新しい星震モデルを提案している<sup>1)9)</sup>。我々は難点(A)~(C)を次のように打開する：

(A)の No solid core  $\rightarrow$  (ロ)の ALS 固体で解決される<sup>9)</sup>。 $\pi^0$ 凝縮はこれまでの量子多体系には無い新しい固化のメカニズムを提供する。剛性率はクーロン結晶の $\sim 10^6$ 倍にもなり corequake の源として OK。

(B)の Heating  $\rightarrow$  (ハ)の pion cooling によって矛盾はなくなる<sup>9)</sup>。 $\pi^c$ 凝縮による冷却は corequake による加熱分を次のグリッチまでに取り除いてくれるため蓄積されない (pion cooling だと 1 年以内に可能、もしこれが無いと  $10^{5-6}$  年もかかる)。

(C)の Two terms  $\rightarrow$  (イ)の 2 種の  $n$  超流体 ( $^1S_0$ ,  $^3P_2$ ) に対応して long, short の 2 つの  $\tau$  があらわれているもの<sup>1)</sup>と考える。

また, Crab, Vela でのグリッチの違いは Crab と Vela の差異  $\rightarrow$  (ニ)の中性子星構造の  $M$  依存性によるもの<sup>9)</sup>と考える。中心密度が  $\pi^0$ 凝縮の発現密度より低い星 (即ち, 軽い星) だと solid core は無い。従って, Crab は  $M < 1.4M_{\odot}$  で solid core は無く crustquake しか起こせない, 一方, Vela は  $M > 1.4M_{\odot}$  で solid core をもち corequake が可能, と考える。

上記諸点が我々のモデルの骨格である。グリッチ後の  $\dot{\Omega}$ ,  $\ddot{\Omega}$  の振舞をよく合わせられること, Crab と Vela の違いを含めてモデル設定と観測との整合性が得られること, 等については玉垣氏の稿を参照していただきたい。

## 5. おわりに

$\pi$  凝縮中性子星にもとづく新しい星震モデルは Crab や Vela のマクログリッチ現象をうまく説明できそうである。逆に云えば, 観測は Vela が  $\pi$  凝縮 core をもつことを暗示しているといえる。この点は中性子星の冷却問題と関連して「Vela には  $\pi$  凝縮相が必要」という指摘<sup>10)11)</sup>とも符合する。

しかし我々のモデルにも問題点がある。 $^3P_2$  超流体が  $\tau$  (short)  $\sim$  a few days をもたらし得るか, グリッチの頻度を合理的に説明し得るか, といった問題点が残されている。前者については支持する論文<sup>12)</sup>もあったが, その後は否定的な結果が出されている ( $\tau$  はせいぜい hours)<sup>13)</sup>。後者については Crab の crustquake に対してモデルによる  $t_g$  が観測値より  $\sim 1$  ケタ大きく, Vela の Corequake に対しては  $\sim 2$  ケタ大きくなってしまう。Crab の 1 ケタは何とか整合できて Vela は難しい。目下のところ Vela では  $\Delta \Omega_0 / \Omega \sim 10^{-(10-11)}$  オーダーの crustquake が Corequake をトリガーさせるという道筋でとらえようとしている。渦糸クリープモデルでもそうだが  $t_g$  を rotation induced glitch という枠組で説明するのはなかなか難しい問題である。

## References

- 1) T.Takatsuka and R.Tamagaki, Prog. Theor. Phys. **82** (1989), 945.
- 2) 高塚龍之, 素粒子論研究 **66** (1983), F35; 日本物理学会誌 **41** (1986), 163.
- 3) G.Baym, C.Pethick, D.Pines and M.Ruderman, Nature **224** (1969), 872.
- 4) D.Pines, J.Shaham and M.Ruderman, Nature Phys. Sci. **237** (1972), 83.
- 5) J.M.Cordes, G.S.Downs and J.Krause-Postorff, Astrophys. J. **330** (1988), 847.

- 6) D.Pines, J.Shaham, M.A.Alpar and P.W.Anderson, Prog. Theor. Phys. Suppl. **69** (1980), 376.  
M.A.Alpar, P.W.Anderson, D.Pines and J.Shaham, Astrophys. J. **249** (1981) L29.
- 7) M.A.Alpar, P.W.Anderson, D.Pines and J.Shaham, Astrophys. J. **276** (1984), 325; **278** (1984), 791.  
M.A.Alpar, R.Nandkumar and D.Pines, Astrophys. J. **288** (1985), 191.
- 8) M.A.Alpar, K.S.Cheng and D.Pines, Astrophys. J. **346** (1989), 823.
- 9) T.Takatsuka and R.Tamagaki, Prog. Theor. Phys. **79** (1988), 274.
- 10) K.Nomoto and S.Tsuruta, Astrophys. J. **305** (1986), L19.
- 11) D.Page and E.Baron, Astrophys. J. **354** (1990), L17.
- 12) J.A.Sauls, D.L.Stein and J.W.Serene, Phys. Rev. **D25** (1982), 967.
- 13) M.A.Alpar, S.A.Langer and J.A.Sauls, Astrophys. J. **282** (1984), 533.  
M.A.Alpar and J.A.Sauls, Astrophys. J. **327** (1988), 723.