

理研連続講義コースX(第1回)
参考資料

(素粒子論研究66 (1983) F35-F47)

パルサーグリッチとモデル
— historical survey and comments —

岩手大・人社 高塚龍之

パルサー=回転中性子星が突然 speed up する現象はグリッチ (glitch) と呼ばれている。この現象は若いパルサー、Crab や Vela で 3 ~ 4 回、より年老いた数個のパルサーでも 1 ~ 2 回観測されるなどその情報が蓄積されてきている。グリッチ現象は、丁度、地震から地球の内部情報が得られるのと同様に中性子星内部の情報をもたらすものとして大いに期待と注目を集めている。特に、地上では目下のところ実験できない高密度核物質の性質について何らかの知見を提供しているのであれば、この現象は貴重な“実験室”と云えよう。ここではこれまでの観測結果とモデルについて歴史的概観を中心とした小レビューを行い、いくつかの問題点をコメントする。紙数の関係上要点のみにとどめる。

§1 Observations

パルサーの回転角速度 Ω は外界からのトルクのため徐々に speed down している。Fig. 1 には glitch に伴う $\Omega-t$ (時間) の関係の変化をスケッチした。突然の jump ($\Delta\Omega$)₀, これが治まるのに必要なマクロ (days ~ years) な緩和時間 τ , 緩和後も最初の jump は ($\Delta\Omega$)_∞ = (1-Q)($\Delta\Omega$)₀ だけ残存していること, glitch の時間間隔 t_g , などが重要な情報となる。Q は内部構造に関係した量と考えられ構造因子と呼ばれる。Table 1 に Vela と Crab についての観測値を挙げた¹⁾ (macro glitch ($\Delta\Omega$)₀/ Ω > 10⁻⁹ のみ。Crab ではこれより小さい glitch もある。)。これらの観測結果は中性子星物理の理論面に対し、なぜ glitch が起るのか、($\Delta\Omega$)₀/ Ω , マクロな τ , Q, そして t_g で何度も起る理由などを説明する課題を投げかける。と同時に Vela と Crab での glitch の違いについて合理的説明を求めていることになる。

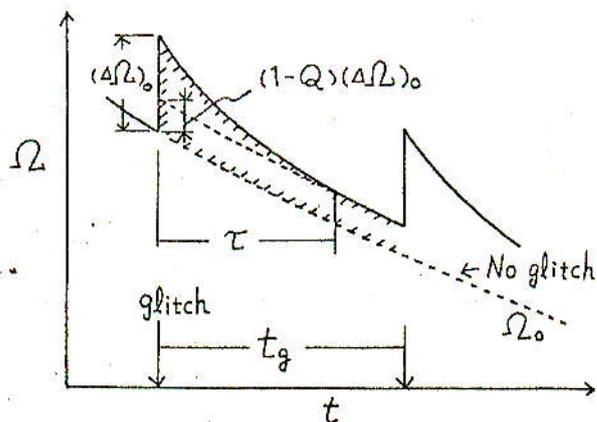


Fig. 1

Table 1

Pulsar	Date	$(\Delta\Omega)_0 / \Omega$	Q	τ (days)	t_g (yrs)
Vela ($\Omega=70S^{-1}$)	'69.3	$\sim 2.3 \times 10^{-6}$	0.15	~ 450) ~ 2.5) ~ 4.2) ~ 2.8
	'71.8	$\sim 2 \times 10^{-6}$?	?	
	'75.10	$\sim 2 \times 10^{-6}$	0.22	~ 450	
	'78.7	$\sim 3 \times 10^{-6}$?	?	
Crab ($\Omega=190S^{-1}$)	'69.9	$\sim 10^{-8}$	0.93	~ 4.1) ~ 3.1) ~ 2.5
	'72.10	$\sim 2 \times 10^{-9}$	0.96	15	
	'75.2	$\sim 3.7 \times 10^{-8}$	0.96	15	

§2 History

これまで提唱されてきた glitch models はその起源をどこに求めるかによって大きく2つの Type に分けられよう：

- Type I ; ① “Crustquake” model,
- ② “Corequake” model,
- Type II ; ③ “Superfluid Metastability” model,
- ④ “Pin-Unpin” model,
- ⑤ Refined “Pin-Unpin” model.

glitch の発生因は中性子星 (N_{\star}) 内部にあるとする見方が有力であるが、 N_{\star} 内部構造を第1成分 (crust + $e^- + p + \text{charged particles} + \text{中心部の normal fluid, solid など}$) と第2成分 (n superfluid) とに分けると、Type I は glitch の起源を第1成分に、Type II は第2成分に着目して考えるものである。 N_{\star} を貫ぬく強い磁場のため第1成分は全体としてしっかりと結ばれており、変化にすばやく反応する。他方、第2成分はこれとは別個に振舞う成分である。glitch という乱れに対しまずは N_{\star} 内部をこの2成分でとらえることは合理的な視点といえる。Type I には、① “Crustquake” と、② “Corequake” models がある。前者は外殻 (crust) に、後者は中心部の solid に原因を求める。Type II には、inner superfluid に着目する、③ “Superfluid Metastability”, crustal superfluid の振

舞いに注目する, ④ “Pin-Unpin” models が含まれる。対応を Fig. 2 に示した。⑤は④の改良版と位置づけられる。

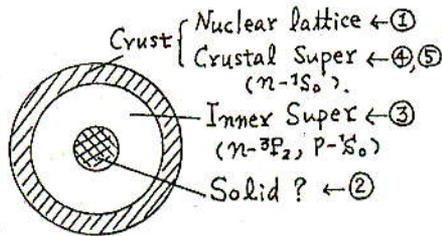
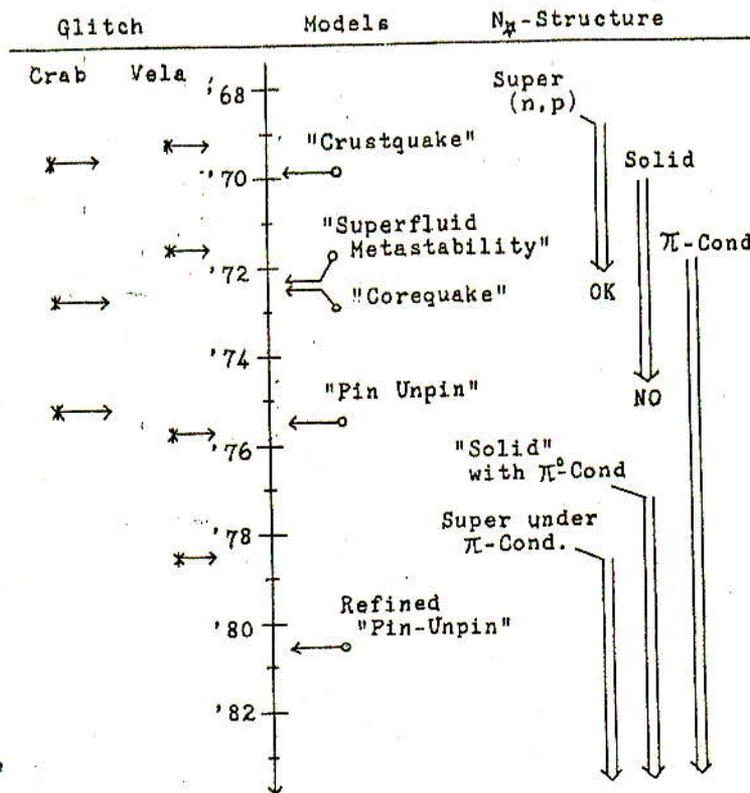


Fig. 2

歴史的にみればこれらのモデルは観測面での進展及び N_{\star} 構造に対する理論面での発展と密接に相関して提唱されてきた。Table 2 からその事情が読みとれよう。

1967年のパルサー発見後2年足らずで Vela や Crab で初めて glitch が観測されると Baym -Pethick-Pines-Ruderman²⁾ によって glitch は crust での星震という “Crustquake” model が出された。このモデルは N_{\star} 構造に2成分を考える出発点となったが, その理論面での根拠は玉垣³⁾, Hoffberg et. al⁴⁾, 及び筆者⁵⁾ らによる inner superfluid (3P_2 型 n-super, 1S_0 型 p-super) の研究によって与えられる事になった。Crab に対しては見事な説明に成功したこのモデルも, Vela で第2回目の glitch が観測されると, Vela に対しては重大な困難をもつことが判明した。

Table 2



この点を克服するために提案されたのが Pines-Shaham-Ruderman⁶⁾ の“Corequake” model である。N_☆ 中心部(Core)の solid 存在がこのモデル成立の基礎となるが、当時この理論的問題は肯定的であった⁷⁾。然しながら、(イ) “Corequake”なら glitch がたびたび起ってよいのに第3回目がなかなか観測されなかったこと、(ロ) より詳細な理論的扱いが進むにつれ、核子の solid 存在にも否定的見解が支配的になったこと⁸⁾、等によってこのモデルへの支持は大きく揺らいで行くことになった。

一方、“Corequake” model の登場とほぼ同時期に新たな視点、即ち第2成分に着目するモデルが提出された。Packard⁹⁾ によるものでここでは“Superfluid Metastability” model と呼んでおく。回転容器中の superfluid He II の準安定状態という地上での実験的知見に基礎をおくこのモデルは glitch model に新しい viewpoint を提示した点で評価される。然し quake model がそうであった様に Vela と Crab を統一的に説明する上で難点のあることが指摘された。このため発展は停留することとなったが、その後あらわれる“Pin-Unpin” model への1つの着眼点を準備することになったと云えよう。

“Corequake” が否定的になってきた状況下で今度は第2成分に視点を移すモデルが提案されることになる。これは Crust 内に存在する n-superfluid の渦系が原子核結晶にピン止めされたりはずされたりする過程に glitch の起源を求めようとするもので、ここでは“Pin-Unpin” model と名付けておく。このモデルはその視点が Anderson-Itoh¹⁰⁾ によって提示され、Ruderman¹¹⁾ によって具体的検討がなされた。結果は“Crustquake”と正反対に Vela では OK だが Crab では新たな仮説を持ち込まない限りうまく行かないといった問題に直面することになる。ところが、“Corequake”から“Pin-Unpin”に移って1年と経たないうちに Vela で第3回目の glitch が観測された。前者のもっていた観測面との重要な矛盾は解消されたことになり、これはパルサー↔理論屋とのドラマでの皮肉な一場面と云えよう。

その後数年経つと観測面での進展も著しくなってきた。この情況に照応し、初期の“Pin-Unpin” model の改良を行ったのが、Pines, Shaham, Alper, Anderson^{1) 12)} 等のグループで、ここでは Refined “Pin-Unpin” model と呼んでおく。物性分野での hard superfluidity の理論的成果を N_☆ 環境下に適用し詳細な議論を行っている。目下進行中の側面も多くあり未だ内味が固定されたとは云えないが、やはり Vela はうまく行くが Crab ではスッキリしない扱いになっているのが現状である。素直なところ手がこみすぎているという印象を受ける。

こうしてみると、superfluid, solid 等、N_☆ 構造への理論面での進歩が glitch model を通して N_☆ 現象と密接に関連していることがわかる。注目されるのは、10年も前から指摘されている π 凝縮¹³⁾ の問題を glitch model と関連させる試みが全く無い事である。 π 凝縮の1つの典型、 π^0 凝縮相では核子系が solid-like な構造(ALS 構造)をもつ¹⁴⁾。glitch model の現況から云って、この ALS 構造、及びこれと共存する荷電 π 凝縮¹⁵⁾ や超流動¹⁶⁾ に着目して、いわゆる“Corequake” model を再考する事は大いに意味のある事となる。

§3 Models

以下、個々のモデルについてかんたんに述べる。

[Type I]

① “Crustquake” model ²⁾

<発生シナリオ>:

回転の speed down → 遠心力の減少 → Crust に stress が蓄積 → stress 限界に達すると crack → N_{\star} の偏平度の減少 (crust の慣性率 I_c ; $\Delta I_c < 0$) → crust の角運動量 L_c 保存のため speed up ($\Delta L_c = \Delta I_c \Omega + I_c \Delta \Omega = 0$; $\Delta \Omega \equiv (\Delta \Omega)_0 > 0$) → $(\Delta \Omega)_0$ が内部の superfluid に伝わって全体が corotate するまでにマクロな時間がかかる。これが緩和時間 τ 。

<mechanics>:

Basic eq. は

$$\text{crust} \rightarrow I_c \dot{\Omega} = -\alpha - I_c (\Omega - \Omega_n) / \tau_c, \quad (1)$$

$$\text{super} \rightarrow I_n \dot{\Omega}_n = I_c (\Omega - \Omega_n) / \tau_c. \quad (2)$$

ここで α は外界からのトルク, Eq.(1) の第2項は crust と super の coupling によって前者にかかるブレーキをあらわす。 τ_c はこれを特徴づける時間, I_n, Ω_n は各々 super の慣性率, 角速度である。
 $t=0$ で glitch on により $(\Delta \Omega)_0$ の jump があると, その後の $\Omega(t)$ は Eqs. (1) (2) より

$$\Omega(t) = \Omega_0(t) + (\Delta \Omega)_0 [Q e^{-t/\tau} + (1-Q)], \quad (3)$$

$$\tau \equiv I_n \tau_c / I, \quad (4)$$

$$Q \cong I_n / I, \quad (5)$$

となる ($I = I_n + I_c$)。この結果は Fig. 1 の glitch function をうまく説明する。 Eq. (3) の [] の第1項は $(\Delta \Omega)_0$ が τ 程度かかって superfluid に伝わることをあらわし, 第2項は corotate してからも残存している jump $(\Delta \Omega)_\infty$ を与える。 no glitch の場合は $\Omega_0(t)$ のみ。充分時間が経った後は全系で角運動量保存ということから,

$$\Delta I / I = -(\Delta \Omega)_\infty / \Omega = -(1-Q) (\Delta \Omega)_0 / \Omega. \quad (6)$$

N_{\star} の球形からのずれを $I(t) = I_0 (1 + \epsilon(t))$ と $\epsilon(t)$ であらわすと, mechanical energies のうち spin down と共に時間的に変化する部分 E は¹⁷⁾

$$E = -(L^2 / 2 I_0) \epsilon + A \epsilon^2 + B (\epsilon - \epsilon_0)^2 \quad (7)$$

$$A = (3/25) (GM_{\star}^2 / R_{\star}) \quad (8)$$

$$B = (57/50) \mu V_c \quad (9)$$

となる。Eq. (7) の各項は rotational, gravitational, elastic energies に対応する (L は全角運動量, R_{\star} は半径, V_c は crust phase の体積, μ は shear modulus, ϵ_0 は reference oblateness)。これを base に観測に関連する諸量が,

$$|\Delta \epsilon| = |\Delta \dot{I}| / I = (1 - Q) (\Delta \Omega)_0 / \Omega, \tag{10}$$

$$t_g = (2A^2 / BI_0) \Delta \epsilon / \dot{\Omega}, \tag{11}$$

$$\Delta E = 2B (\sigma_c / \mu) |\Delta \epsilon_0| = 2A (\sigma_c / \mu) |\Delta \epsilon|, \tag{12}$$

と求まる。ΔE は glitch で解放される elastic energy, σ_c は crust の shearing stress である。

< τ がマクロの説明¹⁸⁾ >:

第1成分と第2成分の coupling を考える。(イ) もし n も p も normal だと n-p 散乱で伝わり, $\tau_{np} \sim 10^{-17}$ sec となってダメ。(ロ) n が normal, p が super だと n-p 散乱は有効でなくなり n と e^- の magnetic int. で伝わるから $\tau = \tau_{em} \sim 10^{-11}$ sec となるが, やはりダメ。(ハ) n が super, p が normal だと super の vortex core 内の normal n (割合として $\sim 10^{-18}$) と p の散乱ということになり $\tau = \tau_{np} \times 10^{18} \sim 10$ sec だがまだまだ足りない。(ニ) n も p も super だと vortex core 内の normal n と e^- の散乱のみが有効となって $\tau = \tau_{em} \times 10^{18} \sim 10^7$ sec となって初めてマクロな τ が OK ということになる。

従って glitch でマクロな τ が観測されていることは N_{\star} 内部に n-superfluid が存在すること, しかも混在している p 成分も superfluid になっていることを要求する。これは n が 3P_2 -super^{3) 4) 5a)}, p が 1S_0 -super^{5b)} として密度 $\rho \approx (1 \sim 3) \rho_0$ (ρ_0 は核密度) で共存するとの理論的証明により裏付けられ 2成分 "Crustquake" model は十分な根拠をもつことになった。

< applications >:

(a) $Q \approx I_n / I \rightarrow$ Crab で ~ 0.95 , Vela で ~ 0.2 だから両者の構造は大きく異なる事を意味する。 M_{\star} が小さい程 crust の占める割合が大という N_{\star} の Eq. of state の特徴から構造のイメージとして, Fig. 3 a, b が得られる。結果する M_{\star} は $(M_{\star})_{crab} \sim 0.5 M_{\odot}$ で OK (カニ星雲を輝やかせるのが N_{\star} の回転 energy だとすると $M_{\star} \geq 0.3 M_{\odot}$; M_{\odot} は太陽質量) だが, $(M_{\star})_{vela} \sim 0.15 M_{\odot}$ となりまずい (N_{\star} 形成の stability limit 近くになってしまう)。…… 第1の難点。

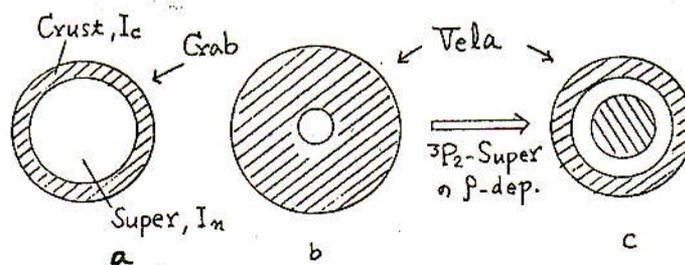


Fig. 3

(b) $\tau \rightarrow$ 先述の様に Crab, Vela で OK。

(c) $(\Delta\Omega_0)/\Omega$ に必要な oblateness change $|\Delta\epsilon|/\epsilon \rightarrow$ Crab で $\sim 10^{-6}$ となりこれくらいなら OK。一方 Vela では $(3\sim 10) \times 10^{-2}$ となり大きすぎる。……第2の難点。

(d) $\Delta E \rightarrow (\Delta E)_{\text{crab}} \sim (4 \pm 2) \times 10^{39}$ erg で OK (結果する luminosity は観測と矛盾しない), $(\Delta E)_{\text{vela}} \sim 10^2 \times (\Delta E)_{\text{crab}}$ となるが深刻な問題ではない。

(e) $t_g \rightarrow (t_g)_{\text{crab}} \sim (3 \pm 1)$ years で OK, 一方, $(t_g)_{\text{vela}} \sim 10^4$ years となって観測値 $t_g \sim (2\sim 3)$ years と決定的に矛盾する。……第3の難点。これは Vela の glitch が Crab より 2~3 ケタ大きい事に起因している。

<評価>:

(イ) Crab については実にうまく行く。(ロ) Vela については第1~3の難点があり、特に第3は決定的である。(ハ) 然しながら $\Omega-t$ 関係の観測結果をよく再現するという点はこのモデルが本質的な面を取り入れていると考えられ捨て難い。

そこで第1~3の難点を救うために登場してくるのが次に述べる“Corequake” model である。後になって指摘された事だが第1の難点は実は難点ではない¹⁹⁾。 3P_2 -super の存在域 $\rho = (1\sim 3)\rho_0$ (それまでは $\rho \geq \rho_0$ でどこまでも super と考えられていた) を考慮すると $(M_{\star})_{\text{vela}} > 0.5 M_{\odot}$ でも観測値の Q に矛盾しない (Fig. 3c)。従って真の難点は第3の点 (第2は第3とからんでいる) のみである。

② “Corequake” model⁶⁾

N_{\star} 中心部が solid であると仮定する。baryon solid だから quake で大きな glitch が可能という事が point である。

<シナリオ>:

solid core をもつ Vela は N_{\star} 形成時に core に elastic energy が前もって貯えられている (地球の場合と似た考え方) \rightarrow Crustquake や magnetosphere の作用で core での quake が trigger され glitch となる \rightarrow 1度 corequake が起きるとそこが weak point になり、以後、ここを発生源として次々と起りうる。

<利点>:

(イ) 中心部に solid が存在するから $(Q)_{\text{vela}}$ と矛盾しないで $(M_{\star})_{\text{vela}}$ を大きくとれる (第1の難点の解消)。(ロ) trigger するのは crustquake などであるから $t_g \sim (2\sim 3)$ years であってよい。 $(\Delta\Omega)_0/\Omega$ が大きいのは solid core での quake だから。今后 10^4 年くらいはこの程度の magnitude の glitch が起ってよいと算定される (第3の難点の解消)。(ハ) solid core だと $|\Delta\epsilon|/\epsilon \sim 10^{-4}$ となって reasonable (第2の難点も解消)。

<問題点>:

(イ) energy 放出が $\Delta E \sim 8 \times 10^{44}$ erg と Crab より 5 ケタ大きい。これは内部から N_{\star} を熱するため luminosity が観測と矛盾する (heating の問題)。(ロ) 土台になる仮定、solid core は可能か (これは 1974 年段階で理論的可能性が否定された⁸⁾)。

[Type II]

③ “Superfluid Metastability” model ⁹⁾

減速回転容器中の superfluid He II で vortex 数 (N_v) は回転速度に比例して減少すべきだが、実際は metastable な状態をもつ (Fig. 4)。これを容器 \rightarrow crust, superfluid He II \rightarrow inner n-superfluid とし N_{\star} に適用 ($\dot{N}_v = 4 m_n \Omega / h$)。

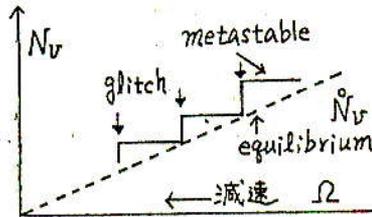


Fig. 4

<シナリオ>:

N_{\star} の spin down \rightarrow inner superfluid はこれに follow せず metastable な状態にある ($N_v > \dot{N}_v$; superfluid は角運動量が過剰) \rightarrow 1 ツの metastable な状態から次のそれへ移るとき余分の角運動量が解放される \rightarrow これが crust に transfer され speed up, 即ち glitch。

<評価>:

glitch の origin を superfluid に求めた最初の試み、然しこのモデルは Banerji-Chanda ²⁰⁾ によって吟味され、Crab と Vela を統一的に説明するには無理のあることが指摘された。

④ “Pin-Unpin” model ^{10) 11)}

crust は nuclear lattice と n-superfluid の共存系であるが、後者の vortex line と lattice との相互作用 (pin, unpin) に着目する。

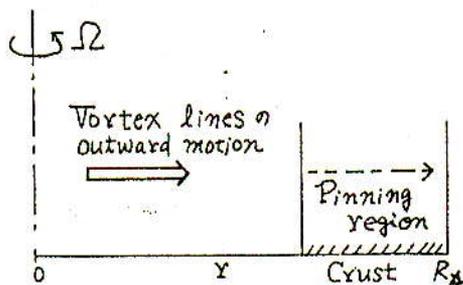


Fig. 5

<シナリオ>:

crust の spin down \rightarrow これに follow するため vortex line が外部へ移動する \rightarrow ところが原子核によって pin され邪魔される \rightarrow pinning region で superfluid に過剰の角運動量が貯えられる \rightarrow 一方,

unpinしようとする力=Magnus力(これは crust と superfluid の角速度の差 $\delta\Omega = \Omega_n - \Omega$ に比例する)が時間と共に増大し、これが pinning force の限界を越えると unpinが起る。これがなだれ的に発生→superfluid の過剰角運動量を crust に transfer → speed up, 即ち glitch。

<mechanics>:

結果のみ述べる。ピン止めは起るが→核内と核外の n-sea では super の energy gap 及び密度が異なるから energy 勘定すれば pin 可能なことが示される。ピンはずれは起るか→Magnus force = pinning force がその条件だが、nuclear lattice が耐え得る最大の shear strain が pinning force より 2~3 ケタ小さいと見積られるため、vortex line が原子核から unpinされる以前に lattice そのものが breaking を起すとしている(fracture)。これが生ずるに必要な mismatch $(\delta\Omega)_{cr}$ は $\sim(10^{-1} \sim 10^{-2})$ と算定され、従って適当な time scale で glitch が起ると考える。

<結果と評価>:

(イ) Vela に適用すると $t_g = (\delta\Omega)_{cr} / |\dot{\Omega}| \sim (3 \sim 30)$ years となって、3 years の方なら観測と矛盾しない。 $(\Delta\Omega)_0 / \Omega$ を説明するには crustal superfluid の慣性能率を I_n^c として $I_n^c / I \sim (1 \sim 3) \times 10^{-2}$ であればよい。これから $M_{\star} \sim M_{\odot}$ と探って差し支えないことになる(crustal, inner superfluids が一体のものとする) $t_g \sim (0.3 \sim 3)$ years, $I_n / I \sim (0.15 \sim 0.5)$ となる。やはり $M_{\star} \sim M_{\odot}$ ととってよい。(ロ) Crab に適用するとうまく行かない。そこで Crab では pinning が弱くても fracture するような crust region で事が起るか、あるいは Vela とは全く別の機構、例えば crustquake によるものと考えられることになる。(ハ) τ 及び Q についてどう考えるのか不明(ただ Crab の場合は creep process によってすぐに steady state に戻るから τ が小さいのではと考えている。)

⑤ Refined "Pin-Unpin" model ^{1) 12)}

<新しい点>:

Fig. 5 を Fig. 6 のように領域分けする。これは pinning force を gap の ρ -dep. を考慮して求めた結果²¹⁾の反映である。新しい2成分: 第1成分→ crust + weakly pinned crustal superfluid + inner superfluid, 第2成分→ strongly pinned crustal superfluid を考える。第2成分が第1成分に内部トルクを及ぼすことをとり入れ、glitch に際しては第1成分はすばやく平衡化すると仮定して pinned vorticity の力学を詳細に展開している。これらが Refined の内容である。シナリオはもとの "Pin-Unpin" model と同様だが (i) glitch は transition region (比較的容易に unpin が起る) で始まり

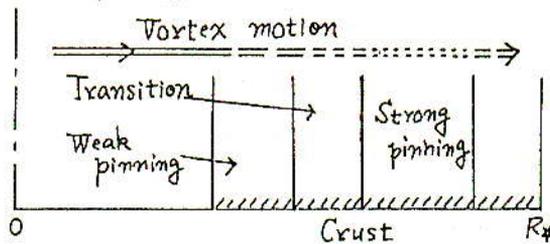


Fig. 6

ここで unpin された vortex line がたまって (ii) これが移動する間に strong pinning region の vortex を sweep し全体的なピンはずれが起る、とする点加わる。

< applications >

(イ) t_g を推定する式が得られ、Vela に対しては実に良く観測値と合致する結果を得ている。勢いを得て次の Vela glitch が 1985 年 2 月～8 月に起るであろうと予言している。(ロ) 同じことを Crab にあてはめるとうまくゆかない。そこで Crab は weak pinning region しかない (Vela より内部温度が高いから) として別の process を考える。即ち, crustquake や external fluctuation で誘起された vorticity jump や creep がこの weak pinning region で起こるとして glitch を説明する事になる。

(ハ) τ については従来の inner superfluid と crust の coupling time とするのではなく, unpin された vortex が repin (recoupling) されるに要する時間 (crust 内で「騒ぎ」が治まるに要する時間) として説明しようとしている。こうすれば “Crustquake” model が直面した (Q)_{Vela} の問題を避けられようという意図であろう (第 1 成分に inner superfluid を含めるのだから $M_{\star} \sim 1.3 M_{\odot}$ と大きく採っても Q は小さくて済むということ)。

§ 4 Comments

model ④, ⑤ について次の点が問題:

(1) unpin は起りそうにない → 単位長さ当りの pinning force ¹¹⁾ $f_p = E_p / ab$ (E_p は pinning energy, $a \sim$ 核半径, b は核間距離) と magnus force $f_m = \rho_n R_p \Gamma \delta \Omega$ (ρ_n は n-super の密度, R_p は中心から pinning region までの距離, $\Gamma = h / 2m_n$) とが等しくなる時の $\delta \Omega$ は現実的な値を代入して,

$$(\delta \Omega)_{cr} \sim 3 (d^2 - d_N^2) (S^{-1}) \quad (13)$$

となる (d_N , d は核内, 核外での energy gap in MeV)。strong pinning region なら $(d^2 - d_N^2) \sim 1$ MeV の order だから $(\delta \Omega)_{cr} \sim 3 (S^{-1})$ 。これだけの mismatch が貯るには

$$t_g \sim (\delta \Omega)_{cr} / |\dot{\Omega}| \sim 10^3 \text{ years (!)} \quad (14)$$

もかなり観測値 $t_g \sim (2 \sim 3) \text{ years}$ の間に unpin はとても起りそうにない。そこで model ④ では, (イ) fracture process を考えることによって, また, model ⑤ では (ロ) transition region を導入する事によって, この問題を回避したものと推測される。然し (イ) の場合は τ をどう説明するか, (ロ) の場合は Q が小さく ($Q \ll 0.2$) なり過ぎないか, の問題が残る。

(2) unpin や fracture がなだれ的に起る機構が不明。何か collective な効果を期待するにしても, N_{\star} の回転の速さから云って nuclear lattice 10^{8-9} 本に 1 本の割合で vortex line があるに過ぎない。即ちスカスカであり collective effects は大変考えづらい。

(3) Vela と Crab で別個の process を導入せざるを得ない現況である。この点で quake model から進歩したとは云えない。Crab では weak pinning region を問題にしているが, gap の ρ -dep. から考えて weak pinning region があれば必ず strong pinning region もある事になり, Crab で後者を考え

ないのは片手落ちである。また Crab と Vela での pinning dynamics の違いを内部温度の差異に求める立場には無理があると思われる (Tsuruta²²) 等の N_{\star} -cooling からすれば、温度は factor 程度の差しかなく、crustal superfluid はこの程度の差だとその存在域は殆んど変わらない。

以上は今后、煮つめるべき課題となるが、特に次の点は観測との関連で重要であることを強調しておきたい：

最近、観測及び N_{\star} 形成の理解²³) といった両面から N_{\star} の質量はいろいろあるのではなく $M_{\star} = (1.4 \pm 0.2) M_{\odot}$ という事が知られている。もしそうならこれは glitch 問題にも強い constraint になろう。世の中に真の Eq. of state は只 1 ツしかないのだから、 M_{\star} が同じなら N_{\star} の内部構造を動かす得るパラメータは内部温度 (従って N_{\star} の年齢 t_0) という事になる。従って t_0 が同じ N_{\star} は $I, I_p, (\delta\Omega)_{cr}$ が同じ値となるから、models ④, ⑤ の結果する

$$I(\Delta\Omega)_0 = I_p(\delta\Omega)_{cr} \quad (15)$$

の関係によって同じ $(\Delta\Omega)_0$ を観測させるはずである。Table 3 には glitch の観測されたパルサーについて $(\Delta\Omega)_0$ と t_0 をまとめた。残念ながら年齢の判っているのは Crab と Vela しかないが $t_c = \Omega / |\dot{\Omega}|$ が

Table 3

Pulsar	t_0 (years)	$(\Delta\Omega)_0$ (S^{-1})
Crab	1.2×10^3	$(0.2-7.3) \times 10^{-6}$
Vela	1.2×10^4	$(1.4-2.2) \times 10^{-4}$
PSR1641-45 ^{24a)}	3.6×10^5	3×10^{-6}
PSR2224+65 ^{b)}	1.2×10^6	2×10^{-5}
PSR0743-45 ^{c)}	1.3×10^6	1×10^{-6}
PSR0525+21 ^{d)}	1.5×10^6	$(2-0.6) \times 10^{-9}$
PSR1325-43 ^{c)}	2.8×10^6	1×10^{-6}

uncertain

年齢の order を与える事に留意し $t_0 \equiv t_c / 2$ を年齢としてある。結果は、(i) $(\Delta\Omega)_0$ と t_0 に systematic な関係がありそうにない、(ii) ほぼ同じ t_0 ($\sim 10^6$ years) のパルサーでも $(\Delta\Omega)_0$ が大きく異なるものがある、となっている。これは “Pin-Unpin” model へ新たな問題を投げかける。 M_{\star} の許容範囲 ($\pm 0.2 M_{\odot}$) を導入すること、年齢による内部温度の違いを考えること、あるいは M_{\star} を上記範囲に限定せず扱ってみること、等によってこれらの問題がどう解決されるか今后検討したいと思っている。

今迄述べてきたように、“Pin-Unpin” モデルにも未だ種々の難点や検討すべき課題が多い。こういった状況を考えると glitch 問題は当面、広く可能性をとって考えるべきであろう。冒頭で触れた様に、A LS 相が N_{\star} 中心部に存在する可能性に着目して “Corequake” モデルを再考するのも大切な 1 ツの方向であると思われる²⁵)。glitch は X 線パルサーでも観測されており益々話題を提供しつつある²⁶)。

最後に、レビュー準備にあたっていろいろ議論をいただいた玉垣氏及び巽、国広両氏に感謝致します。

References

- 1) D. Pines, J. Shaham, M. A. Alper and P. W. Anderson, Prog. Theor. Phys. Suppl. 69 (1980), 376.
- 2) G. Baym, C. J. Pethick, D. Pines and M. Ruderman, Nature 224 (1969), 872.
- 3) R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. 44 (1970), 905.
- 4) M. Hoffberg, A. E. Glassgold, R. W. Richardson and M. Ruderman, Phys. Rev. Letters. 24 (1970), 775.
- 5a) T. Takatsuka, Prog. Theor. Phys. 48 (1972), 1517.
- b) T. Takatsuka, Prog. Theor. Phys. 50 (1973), 1754.
- 6) D. Pines, J. Shaham and M. Ruderman, Nature Phys. Sci. 27 (1972), 83.
- 7a) B. Banerjee, S. M. Chitre and V. K. Garde, Phys. Rev. Lett. 25 (1970), 1125.
- b) J. W. Clark and N.-C. Chao, Nature Phys. Sci. 236 (1972), 37.
- c) D. Shiff, Nature Phys. Sci. 243 (1973), 130.
- 8a) V. R. Pandharipande, Nucl. Phys. A 217 (1973), 1.
- b) V. Canuto and J. Lodenquai, Phys. Rev. C 12 (1975), 2033.
- 9) R. E. Packard, Phys. Rev. Lett. 28 (1972), 1080.
- 10) P. W. Anderson and N. Itoh, Nature 256 (1975), 25.
- 11) M. Ruderman, Ap. J. 203 (1976), 213.
- 12a) M. A. Alper, P. W. Anderson, D. Pines and J. Shaham, Ap. J. 249 (1981), L29.
- b) J. Shaham and D. Pines, (Preprint)
- 13a) A. B. Migdal, ZhETF 63 (1972), 1933.
- b) R. F. Sawyer, Phys. Rev. Lett. 29 (1972), 382.
- c) D. J. Scalapino, Phys. Rev. Lett. 29 (1972), 386.
- 14) T. Takatsuka, K. Tamiya, T. Tatsumi and R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. 59 (1978), 1933.
- 15) K. Tamiya and R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. 60 (1978), 1753.
- 16) T. Takatsuka and R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. 67 (1982), 1649.
- 17) G. Baym and D. Pines, Ann. Phys. 66 (1971), 816.
- 18) G. Baym, C. Pethick and D. Pines, Nature 224 (1969), 673.
- 19) T. Takatsuka, Prog. Theor. Phys. 50 (1973), 1755.
- 20) S. Banerji and R. Chanda, Nature Phys. Sci. 239 (1973), 139.
- 21) M. A. Alper, Ap. J. 213 (1977), 527.
- 22) S. Tsuruta, Physics Reports 56 (1979), 237. 及び本研究会報告。
- 23) 佐藤勝彦, 本研究会報告。
- 24a) R. N. Manchester, L. M. Newton, W. M. Goss and P. A. Hamilton, Mon. Not. R. Astro,

Soc. 184 (1978), 35, Short Communication.

b) P. R. Backus, J. H. Taylor and M. Damashek, Ap. J. 255 (1982), L63.

c) L. M. Newton, R. N. Manchester and D. J. Cooke, Mon. Not. R. Astr. Soc. 194 (1981), 841.

d) G. S. Downs, Ap. J. 257 (1982), L67.

25) 玉垣良三, 本研究会報告。

26) 柴崎徳明, 本研究会報告。