

ЗВЕЗДОТРЕСЕНИЯТА – ВИДОВЕ И СИЛА

Бойко Рангелов

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: brangelov@gmail.com*

Ключови думи: Звездотресения, видове, определяне на магнитуда

Резюме: Описани са известни видове звездотресения, като основно внимание е обърнато на слънцетресенията. Използвана е аналогията на слънцетресенията с евентуални звездотресения на другите флуидни звезди. Споменато е и за възможни трусове очаквани на магнетари, пулсари и други видове неутронни звезди. За определяне на магнитуда на звездотресенията е приложен подход от сеизмологията – т.нар. „магнитуд по Рихтер“. По аналогия и чрез екстраполация са предложени енергетични еквиваленти на звездотресения очаквани на звезди от „главната последователност“, „червени и сини гиганти и супергиганти“, „бели и червени джуджета“ според класификацията на Hertzsprung-Russell.

STELLARQUAKES – TYPOLOGY AND POWER

Boyko Ranguelov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: brangelov@gmail.com*

Keywords: Starquakes, stellarquakes, power

Abstract: Known types of starquakes are described, with a focus on sunquakes. The analogy of sunquakes with possible stellarquakes on other fluid stars is used. Possible quakes expected on magnetars, pulsars and other types of neutron stars are also mentioned. To determine the magnitude of the stellarquake, an approach from seismology has been applied – the so-called “Richter magnitude”. By analogy and extrapolation, energy equivalents of the stellarquakes expected for the “main sequence” stars, “red and blue giants and super giants”, “white and red dwarfs” according to the Hertzsprung-Russell classification have been proposed.

Въведение

През последните години космическата сеизмология се развива интензивно [1] и въпросът с измерването на силата на извънземни сеизмични събития (Марс, Луна и др.) повдига проблем за оценка на магнитуда. Нещо повече – слънцетресенията бяха регистрирани и по този начин бяха поставени в дискусия как да се измери силата на сеизмичните събития, наблюдавани върху звездите и наречени звездотресения. Тъй като засега са регистрирани само слънцетресения (и някои взривове на неутронни звезди), е добре по някакъв начин да се въведе скалата за магнитуд на звездотресенията.

При оценката на силата (магнитуд), става дума единствено за звездотресения ставащи като сеизмични събития върху флуидните звезди.

За първи път проблемът с магнитуда на звездотресения на други флуидни звезди [3] (с изключение на Слънцето) се споменава в статията – „Слънцетресения: хелиосеизмичен отговор на слънчеви изригвания“ от Александър Г. Косовичев през 2014 година.

В дискуссионен параграф „1.4 Предизвикателства при разбирането на слънчевите трусове“ в главата „Слънцетресения: хелиосеизмичен отговор на слънчеви изригвания“ той обсъжда проблемите на сеизмичните източници и реакциите на фотосферата към протуберансите при флуидните звезди.

Първите слънцетресения са наблюдавани от мисията SOHO, особено това от 9 юли 1996 г., когато е направена първата оценка на магнитуда [2]. След това е изследвана серия от слънцетресения за 24-ия слънчев цикъл (2011–2017) [4], като е създаден каталог на слънцетресенията [5], направена е статистика за честотата им и за много от техните свойства [4].

Все още източникът на слънцетресенията не е ясно дефиниран, съществуват няколко модела, които се опитват да се съобразят с наблюдателните данни. Някои обясняват механизма на генериране чрез удар отгоре върху фотосферата, други чрез изригвания от вътрешността на Слънцето, а има и по-екзотични предложения, като например т.нар. „холографска реконструкция“ [6].

Засега общ подход за оценка на магнитуда на звездотресенията на флуидните звезди чрез обща методология за оценка на силата им. Използвана е стандартната процедура за оценка на магнитуда и енергията на сеизмичните събития (земетресения), базирана на скалата за магнитуд на повърхностните вълни, разработена от Рихтер и Гутенберг през 30-те години на 20-ти век [7, 8].

Тук е извършена екстраполация при изследването за освобождаване на сеизмична енергия, за да се оцени нивото на очакваните магнитуди на звездотресенията и в крайна сметка да се оцени диапазонът на долната и горната граница, както и възможните вариации и неопределености в магнитудната оценка. Тези съображения се основават на прости математически зависимости, разумни физически предположения и обща методология за оценка на възможните магнитуди на звездотресенията.

Типология

За да се създаде последователно разбиране на за видовете сеизмични събития разглеждани тук е представена следната типология:

Земетресения – сеизмични събития на Земята

Магнитуд на земетресенията – логаритмична скала, създадена от Рихтер и Гутенберг за измерване на силата на земетресенията (за подробности вижте следващия параграф). Увеличение от 1 единица магнитуд означава земетресение с около 32 пъти по-силна мощност [9, 10].

Звездотресения – сеизмични събития (наричани често „смущения“) върху неутронни/пулсарни/магнетарни/компактни звезди. Тези звезди са съставени от супер твърда кора и свръх флуидна вътрешност [11]. Звездотресението е внезапно пренареждане на кората на звездата [12]. Характеризира се с разрушаване на кората, генериране на гравитационни вълни и интензивни гама и рентгенови емисии. Като цяло има две основни сеизмични събития върху тези звезди – първото, разрушаване на кората, последвано от звездни колебания след звездотресения, [13, 14], и второ, образуване на еластични планини върху въртящите се компактни звезди [16]. За изучаване на енергийния бюджет на такива звезди се използва сложен математически апарат, за да се получи реализираната енергия и да има коректни резултати и оценка на разпределението на енергията на множество различни събития, ставащи на подобни звезди [13]. Най-силното измерено звездотресение е регистрирано на 27 декември 2004 г. То освобождава толкова много енергия, че ако се случи на Земята, би било еквивалентно на земетресение с магнитуд 32 по Рихтер (т.е. ако се приеме, че тази скала е използвана за измерване на звездотресението) [17].

Звезден магнитуд – е историческа единица за звездна яркост и нейното определение гласи, че промяна от 5 стойности представлява коефициент 100 в интензитета на яркостта [18].

Слънцетресения – това са сеизмични събития, характеризиращи се с разпространение на повърхностни сеизмични вълни, генерирани от слънчеви изригвания. Не всички слънчеви изригвания генерират слънцетресения (те са около 10–20% от всички изригвания) [3].

Хелиосезимология – дял от астрофизиката, който изследва вътрешната структура на Слънцето чрез изучаване на трептенията на повърхностните му вълни. Средният период на трептенията е около пет минути, което съответства на честота от около 0,003 Hz [19].

Флуидни звезди – тези звезди са подобни на Слънцето. Тук изследването е съсредоточено за определяне на силата (магнитуда) на тези повърхностни сеизмични вълни се оценява чрез апроксимация, екстраполация и аналогия със земетресенията и повърхностните вълни на Земята.

Звездотресения – сеизмични събития, наблюдавани на повърхността на флуидни звезди. За целите на тази разработка единственото изследване е проведено, като се вземат предвид повърхностните сеизмични вълни, генерирани от изригвания и евентуално видими върху фотосферата на флуидни звезди. Всички оценки са калибрирани спрямо слънцетресенията.

Астросейсмология – част от астрофизиката, изучаваща сеизмични събития и трептения върху звезди, планети, спътници и други земни и неземни космически обекти [19].

Математически съображения

Теорията за определяне на магнитуда на земетресенията е добре развита и се основава на логаритми, на зависимости между периодите и амплитудите на сеизмичните вълни записани от сеизмографи. Тази теория е добре описана в трудовете на Рихтер и Гутенберг (и на други изследователи) и затова няма да се спираме тук. Само е важно да се отбележи, че има емпирична връзка между магнитуда определен по повърхностни вълни и сеизмичната енергия която те пренасят и тази връзка се дава от:

$$(1) \quad \log E_S = 4.4 + 1.5 M_e$$

и

$$(2) \quad M_e = (\log E_S - 4.4)/1.5$$

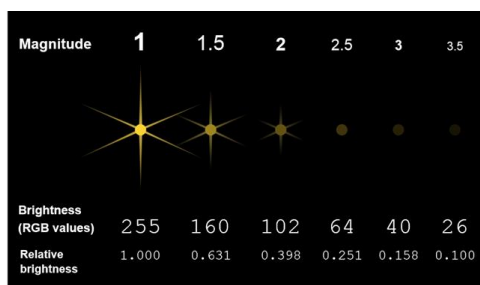
където E_S е енергията на земетресението в джаули, M_e – се нарича енергиен магнитуд. Това означава, че тази величина се изчислява, използвайки емпиричната зависимост E_S - M_e [10].

Връзката между джаул и ерг е: $1 \text{ джаул} = 10^7 \text{ ерга}$

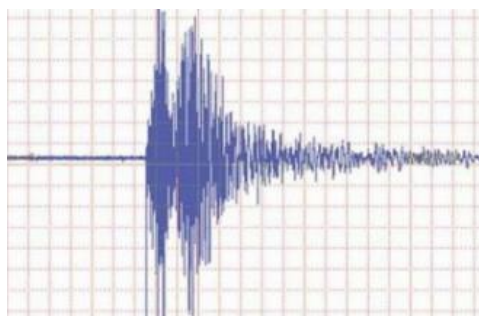
Логаритмичната скала използвана при тези релации означава, че промяна на магнитуда от 1 единица, показва че реализираната енергия се променя около 32 пъти. Така че звездотресение с магнитуд 32 (регистрирана експлозия на неутронна звезда – 27 декември 2004 г.) би бил около 580 000 000 000 000 000 000 000 000 000 пъти по-мощен от земетресението с магнитуд $M_{1.0}$). Видимото регистрирано слънцетресение на 9 юли 1996 г. е имало магнитуд по Рихтер от 11.3. Това означава, че сеизмичното събитие на Слънцето е било около 30 000 пъти по-мощно от турското земетресение на 6 февруари 2023 г. с $M_{7.8}$.

Физически съображения

В началото на 30-те години на 20-ти век Чарлз Франсис Рихтер от Калифорнийския технологичен институт, вдъхновен от магнитуда на звездите, базиран на интензитета на светлинното излъчване (фиг. 1), разработва скала за магнитуд на земетресенията, за да оцени силата на сеизмичните събития, базирана на сеизмографските записи на сеизмичните вълни. Няколко години по-късно, заедно с Бено Гутенберг, създава първите таблици с калибровъчни функции, за да увеличи точността на оценката на магнитуда на земетресенията в далечното поле, използвайки повърхностните вълни като основен носител на сеизмична енергия [8] Фиг. 2.

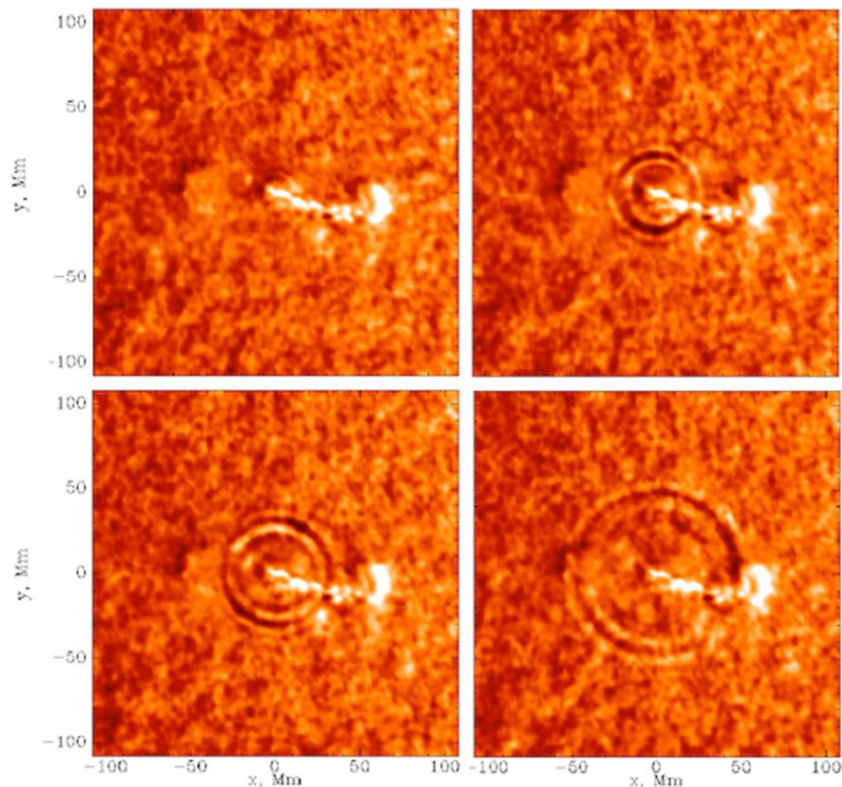


Фиг. 1. Скала на звездния магнитуд според яркостта на небесни обекти [18]



Фиг. 2. Типична сеизмограма

Както се вижда от графиките, „раждането“ на скалата на Рихтер се основава на математическите предположения, представени по-горе. Логаритмичната скала е изключително полезна при подобни изследвания, защото обхваща много широк динамичен диапазон. Опитът от земетресенията показва добре последващото разпространение на енергията и дава възможност за сравняване на енергията на различни видове сеизмични събития. Точно това свойство е използвано при трансформациите между енергия и магнитуд при Слънцетресенията.



Фиг. 3. Повърхностни сеизмични вълни при слънцетресението от 9 юли, 1996 г. регистрирано от мисията СОНО [21]

Много изследвания споменават различни свойства на слънцетресенията, а обобщение на сеизмичните повърхностни вълни върху Слънцето показва:

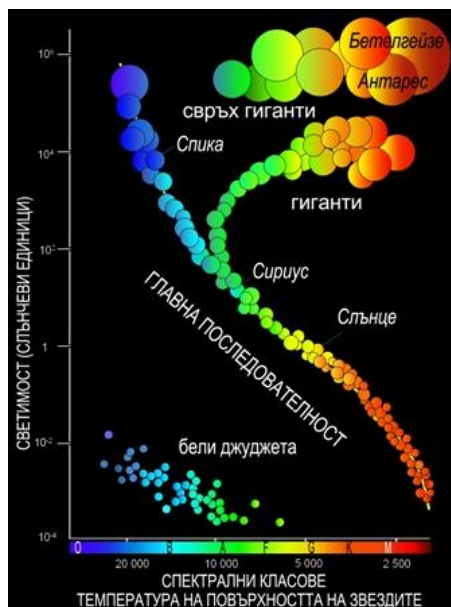
- Повърхностните вълни се разпространяват на сходни разстояния (приблизително 10 Мм – около 10 диаметъра на Земята, в зависимост от силата на слънчевото земетресение).
- Ускоренията за тези изследвани случаи [4] варират между $0,011\text{--}0,020\text{ km/s}^2$.
- Времената за пътуване на наблюдаваните повърхностни вълни са между 30–60 минути, докато се разсеят до нивото на микросеизмичния шум на Слънцето със скорост от десетки km/s до около стотици km/s .
- Честотата на повърхностните вълни на слънцетресенията варира, но е в диапазона от 2 до 6 MHz (3 MHz за събитието от 1996 г.).
- Диапазонът на магнитудите варира между 8–9 единици магнитуд до 13–15 единици за слънцетресенията земетресения, подкрепен от 9 „видими“ наблюдения на слънцетресения, измерени по време на 24-ия цикъл на слънчева активност [4].
- Както беше споменато по-рано слънцетресението от 9 юли 1996 г. е довело до появата на видими повърхностни вълни във фотосферата на слънцето. Трансформацията на сеизмичната енергия, пренасяна от вълните, е с магнитуд „Рихтер-Гутенберг“ от 11,3 [3].
- Много важно е да се отбележи, че само около 15–20% от протуберансите на Слънцето, генерират слънцетресения. Защо това е така е все още необяснимо.

Основни параметри на флуидните звезди

Общата класификация на звездите е представена чрез H-R (Херцшпрунг-Ръсел) диаграмата – Фиг. 4. Тя показва връзката между повърхностната температура на звездите и тяхната светимост в слънчеви единици.

Като цяло, дисперсията на параметрите нормирани по Слънцето е:

- Повърхностна температура: 3000 K – 50000 K;
- Светимост: $10^{-6} L_{\odot}$ – $10^6 L_{\odot}$;
- Радиус: $0.01 R_{\odot}$ – $800 R_{\odot}$;
- Маса: $0.08 M_{\odot}$ – $80 M_{\odot}$.



Фиг. 4. Диаграмата H-R на (Херцшпрунг-Ръсел) показва разпределението на звездните спектрални класове (O-M), според светимостта и температурата на флуидните звезди

Доминиращият брой звезди с маси в интервала от 0,25 до 2 маси на Слънцето е около 90%. Това означава, че фокусът на нашето изследване е основно насочен върху дясната част на H-R диаграмата, която съдържа по-голям брой флуидни звезди.

Основните допускания при изследването са:

- Оценката на магнитуда на звездотресенията върху флуидните звезди се основава само на повърхностните сеизмични вълни.
- Оценката по тази скала на магнитуда не включва енергийния бюджет, произведен от всички други възможни източници на излъчване на енергия на флуидната звезда (например гама и рентгенови лъчи, плазмени изригвания, магнитни смущения и др.).
- Флуидът, в който се разпространяват повърхностните вълни, се счита за хомогенен.
- Слънцетресенията са основният калибрационен фактор, тъй като техният магнитуд се оценява чрез директни измервания. Например, изригването със средна сила на 9 юли 1996 г. предизвика слънцетресения с магнитуд 11,3 по скалата на Рихтер.
- Генерационният потенциал на флуидните звезди се приема пропорционален на техния размер.

Методология за оценка на силата на звездотресенията

Методологията за оценка на магнитудите на звездотресенията се основава на няколко основни принципа:

- Следвайки свойствата на флуидните звезди, линейната екстраполация и интерполация се считат за достатъчно представителни за оценка на магнитудите на звездотресенията. Това се потвърждава от многобройни изследвания и резултати на енергията на слънцетресенията, излъчвана и пренасяна от сеизмичните повърхностни вълни генерирани от тях.

- Типологията на звездите позволява да се предположи, че потенциалът на мощността на звездотресенията е пропорционален на размерите, масите, температурите и позицията на звездите на диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел. Това дава възможност за оценка на магнитуда на звездотресенията за спектралните класове О-М (на главната последователност). Гигантите, свръхгигантите и белите джуджета се нуждаят от подобен подход, но за всяка група поотделно.
- Използване на подхода на Рихтер-Гутенберг за оценка на магнитуда на земетресенията чрез повърхностни вълни (т.е. логаритмична скала) за голям динамичен диапазон, е приложен върху звездотресения.
- Калибриране на слънцетресенията за всички звездотресения е възможно, тъй като слънцетресенията са по-добре изследвани и имат достатъчна статистическа тежест, за да се считат за надеждни.
- Независимата оценка на горните и долните граници на възможните звездотресения е доказана чрез независими методи (особено за слънцетресенията) и екстраполирана към спектралните класове на другите звезди.

Този методологичен подход дава общ интегриран поглед върху оценката на магнитудите на звездотресенията и диапазона на техните вариации. Това би могло да бъде много полезно, при планирането на наблюденията на различни мисии, насочени към изучаване на явленията, наречени звездотресения. Появяват се данни че телескопът „Джеймс Уеб“ вече регистрира явления върху флуидни звезди, приличащи на звездотресения.

Резултати при оценка на силата на звездотресенията

Използвайки описаната методология и вземайки предвид математическите и физическите допускания, са оценени интервалите на възможните магнитуди на звездотресенията, като са калибрирани всички стойности и са определени трансформациите им в сеизмична енергия и обратно.

Подобен подход е приложен за звездните обекти от всички спектрални класове, класифицирани чрез H-R диаграмата (с изключение на неутронни/пулсари/магнетари/компактни звезди).

Както бе споменато по-рано, механизмът на генериране на звездотресения е спорен, но повечето учени, считат източника им, като експлозия вътре в звездното вещество водещи до протуберанси, подобни на слънчевите.

В това изследване не се разглежда механизмът на генериране на звездотресенията. Разглеждат се само повърхностните сеизмични вълни и възможните магнитуди са изчислени чрез техните параметри. Както е показано по-рано, логаритмичната скала може да бъде представителна за сравняване на оценените магнитуди на звездотресенията. За да може да се представи визуално направената оценка, е създадена Таблица 1. Тя дава възможност за изготвяне на схеми за магнитудите на звездотресенията и диапазоните на техните вариации. Поради големите неопределености, хипотетичните $M_{\max}$ и $M_{\min}$ също имат по-големи вариации в стойностите си.

Таблица 1. Приблизителна хипотетична средна оценка на магнитуда на звездотресенията и очакван диапазон, определени от зависимостта на типовете флуидни звезди, съгласно диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел и магнитуда „по Рихтер“ на повърхностните вълни

Спектрален клас	Среден магнитуд	Максимален магнитуд	Минимален магнитуд	Диапазон	Типове звезди
A–K	9.7–11.7	14.6–15.0	7.0–9.0	8 единици	Главен ред
K–M	9.0–10.0	10.5–11.5	6.0–6.5	4.5 единици	Главен ред R
O–A	10.0–12.0	15.0–17.5	7.5–8.5	10 единици	Главен ред L
G–M	12.0–14.0	14.0–15.0	9.5–10.5	5.5 единици	Гиганти
G–M	18.0–20.0	20.0–25.0	17.0–18.0	8 единици	Червени супергиганти
B–A	18.0–20.0	20.0–25.0	17.0–18.0	8 единици	Сини супергиганти
B–G	8.5–9.5	10.0–10.5	6.0–6.5	4.5 единици	Бели джуджета

Легенда: A–K е частта от главната последователност (Слънце и подобни); K–M е част от главната последователност: (R) – разположена вдясно от A–K (малки маси и ниски температури), O–A е част от главната последователност (L) – разположена вляво от A–K (големи маси и високи температури) – всичко според диаграмата Херцшпрунг-Ръсел.

Заклучение

Представена е стандартна типология на различните видове звезди. Разработена е методология за оценка на силата на звездотресенията, използваща основите за определяне на магнитуда на земетресенията. Приложена е процедура за екстраполация, за да се разшири обхватът за оценка на силата на звездотресенията, възможни върху флуидни звезди, чрез метод на трансформация на повърхностните сеизмични вълни в енергия и обратно.

Използвана е H-R диаграма и е направено предположение за класификация по магнитуд-размер на звездотресенията, за да се оцени хипотетичния среден очакван магнитуд на звездотресенията, както и възможните вариации относно точността на оценката.

Създадена е практическа таблица, изразяваща тези зависимости. Те могат да бъдат полезни при планирането на космически мисии, насочени към регистрация и наблюдение на звездотресения. В светлината на новите данни от „Solar Orbiter“ за по-точните данни за слънцетресенията и слънчевите смущения влияещи на Земята.

Литература:

1. Rangelov B. Space Seismology. Peer Rev J Sol Photoen Sys. 2 (5). PRSP. 000547. 2024. <https://crimsonpublishers.com/prsp/pdf/PRSP.000547.pdf>
2. <https://www.cnet.com/science/space/scientists-spot-first-sunquake-of-the-current-solar-cycle/>
3. Kosovichev A., 2014. Sunquakes: helioseismic response to solar flares., "Extraterrestrial Seismology", Cambridge Univ. Press, 23 pp. arXiv:1402.1249v1
4. Quinn S., M. Mathioudakis, David B. Jess., Flare-induced Sunquake Signatures in the Ultraviolet as Observed by the Atmospheric Imaging Assembly., The Astrophysical Journal, 920:25 (10 pp), 2021. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0139>
5. Sharykin I., Kosovichev A., Sunquakes of Solar Cycle 24., The Astrophysical Journal, 895:76 (14 pp), 2020 May 20 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab88d1>
6. Stefan T. and Kosovichev A., 2020, Estimation of Key Sunquake Parameters through Hydrodynamic Modeling and Crosscorrelation Analysis., The Astrophysical Journal, 895:65 (15 pp), 2020 May 20 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab88ae>
7. Gutenberg, B., and C.F. Richter (1936). On Seismic Waves, Gerlands Beitrage zur Geophysik, 47, 73-131.
8. Gutenberg B. and Charles Francis Richter., Magnitude and energy of earthquakes., Annali di Geofisica, Vol. 9, n. 1, 1956. file:///C:/Users/pc/Downloads/Gutenberg_2010.pdf
9. Kayal J.R., EARTHQUAKE MAGNITUDE, INTENSITY, ENERGY, POWER LAW RELATIONS AND SOURCE MECHANISM., USGS Science Center., 40pp. <https://escweb.wr.usgs.gov/share/mooney/SriL.II3.pdf>
10. Choy G. and John L. Boatwright., Radiated seismic energy and energy magnitude. Version August 2002; editorially adapted and amended July 2012; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.6
11. Anderson, P. W. ; Itoh, N., Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon., Nature, Volume 256, Issue 5512, pp. 25–27 (1975). DOI:10.1038/256025a0
12. Baym, G. ; Pines, D., 1971. Neutron starquakes and pulsar speedup., Ann. Phys. (USA), Vol. 66, p. 816–835 DOI:10.1016/0003-4916(71)90084-4
13. Lu, Ruipeng; Yue, Han; Lai, Xiaoyu; Wang, Weihua; Zhang, Shenjian; Xu, Renxin., 2023. Quakes of compact stars., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 520, Issue 3, pp. 4289–4300., doi:10.1093/mnras/stad270
14. Ashton G., R. Prix, and D. I. Jones., Statistical characterization of pulsar glitches and their potential impact on searches for continuous gravitational waves., PHYSICAL REVIEW D 96, 063004 (2017)., DOI: 10.1103/PhysRevD.96.063004
15. Litvinenko, Y. A New Model for the Distribution of Flare Energies., Solar Physics, Volume 167, Issue 1–2, pp. 321–331. doi: 10.1007/BF00146342
16. Gangwar., Y. David Ian Jones ., Applying the starquake model to study the formation of elastic mountains on spinning neutron stars., MNRAS 532, 2763–2777 (2024) <https://doi.org/10.1093/mnras/stae1671>
17. https://en.wikipedia.org/wiki/SGR_1806%E2%88%9220#cite_note-5
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Magnitude_%28astronomy%29
19. <http://astrothesaurus.org/uat/709>
20. <https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismograph>
21. <http://soi.stanford.edu/press/agu05-98/press-rel.html>