

MATERIA STRANA NELLE STELLE A NEUTRONI?

Risposta alla domanda comparsa su Quora:

[Quanto è verosimile la formazione della materia strana in una stella di neutroni ?](#)

1. Introduzione

La domanda è certo fatta da persona che sa che cosa è la “materia strana” e che cos’è una “stella a neutroni”.

In ogni caso, per quanto riguarda le *stelle a neutroni* si può vedere la risposta di G. B. Galimberti a questa stessa domanda.

Per quanto riguarda la *materia strana* esiste una sola risposta su Quora alla domanda “**Che cos’è la materia strana?**”, che rinvia all’articolo di Wikipedia.it. La definizione data all’inizio dell’articolo è: “*La **materia strana** è un **ipotetico** stato ultradenso della materia che si ritiene possa formare la parte interna particolarmente densa delle stelle di neutroni. È composta da quark up, quark down e quark strange in uno stato “liquido”.*” Per il resto, a mio parere, la risposta di Wikipedia lascia un poco a desiderare. Il testo inglese di Wikipedia afferma che si tratta di materia *degenere*, in cui tutti i livelli di energia possibili, fino alla cosiddetta energia di Fermi, sono occupati, in virtù del principio di Pauli.

Comunque, in breve, “materia strana” non è sinonimo di materia bizzarra o pazzoide o, quanto meno, dalle imprevedibili proprietà. La materia ordinaria è prevalentemente costituita da quark Up e Down, mentre la *materia strana* si chiama così perché come dice la definizione italiana (senza spiegarlo a chi non ha qualche familiarità con l’inglese), è formata essenzialmente da tre tipi di quark, Up (Su, u), Down (Giù, d) e *Strange (Strano, s)*. Quest’ultimo viene chiamato “strano” perché non è stabilmente presente nella materia ordinaria, ma è elemento essenziale in certe particelle instabili scoperte a partire dal 1947, che furono chiamate “strane” perché avevano proprietà *allora* giudicate strane. La principale delle proprietà strane era che queste particelle (di cui le prime ad essere scoperte furono il Λ^0 e il K^0) venivano formate in circa $10^{(-23)}$ s, tempo caratteristico delle “interazioni forti”, e, mentre ci aspettava che decadessero pure per “interazione forte” in un tempo dello stesso ordine di grandezza, si trovò che la loro vita media era tra $10^{(-7)}$ e $10^{(-10)}$ secondi, tempo caratteristico delle “interazioni deboli”: in proporzione, era come se fossero create in un secondo e vivessero come minimo 300 000 anni. Di siffatte particelle non se ne erano mai viste. Inoltre, in collisioni di particelle ordinarie, venivano sempre prodotte in coppie. Limitatamente alle “interazioni forti” (escludendo evidentemente i decadimenti dovuti alla “interazione debole”, in cui una particella

decadeva in particelle ordinarie), avveniva qualcosa di simile alla conservazione della carica elettrica: dando il nome di *S* a questo nuovo tipo di carica, due particelle, entrambe con $S=0$, potevano collidere e annichilarsi producendo due particelle con carica $S=+1$ e $S=-1$ rispettivamente. Il nuovo tipo di carica (che non ha nulla a che vedere con la carica elettrica) fu detto "Stranezza", in quanto caratterizzava le particelle strane. Al quark unico portatore di una unità di Stranezza, fu dato il nome di **Strange**, **s**. In realtà al quark **s** è assegnata stranezza $S=-1$, per convenzione e coerenza del modello.

(Si veda in **Nota 1, Fig.N1** il quadro del "modello standard")

2. Come si formerebbe la Materia strana?

Come è noto, una stella di neutroni è paragonabile a un nucleo gigante, con abbastanza simili proprietà, a parte le dimensioni.

TAVOLA I: PARAGONE TRA NUCLEI E STELLE DI NEUTRONI

Oggetto	Numero di massa, A	Densità media
Nucleo	< 238	$2.8 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$
Stella di Neutroni	10^{57}	$7 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$

Inizialmente si pensava che, a parte una crosta o strato superficiale rigido, l'interno fosse costituito da un liquido indifferenziato di densità costante, di caratteristiche non chiare, il "neutronio", termine poi utilizzato più nella fantascienza che nella scienza. A causa dei differenti valori di densità e pressione che regnano all'interno della stella, oggi si pensa che questa non abbia più un interno indifferenziato, ma abbia una struttura a cipolla come in Fig. 1.

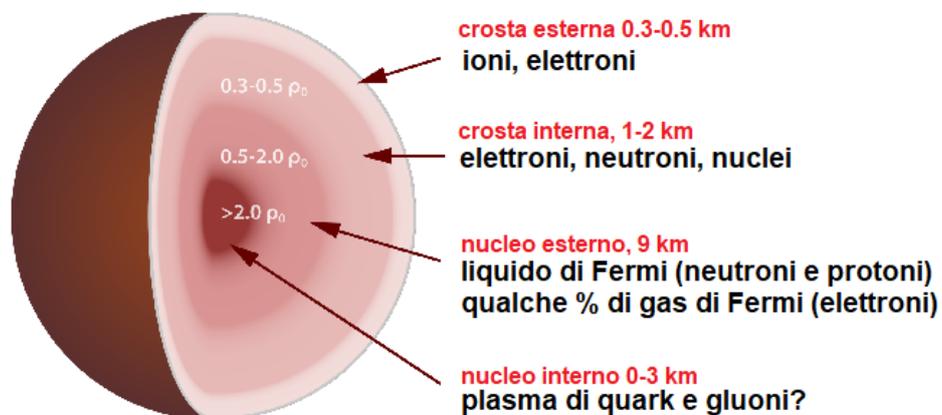


Fig.1

Spaccato di una stella di neutroni, versione 2007, tradotta in italiano (1)

La pressione q è in termini di $q(0)$, pressione di saturazione, che viene raggiunta quando i neutroni sono in contatto l'un con l'altro.

Tutto questo varrebbe per le stelle a neutroni con masse tra 1.4 e 3(?) masse solari. Viaggiando nell'interno della stella di neutroni diretti verso il suo centro, vediamo che la densità aumenta. In effetti, raggiunta una determinata (e praticamente ignota) pressione e densità critica, i nucleoni dovrebbero frammentarsi nei loro componenti, i quark della materia ordinaria, Up e Down, più gluoni. La ragione sta nel fatto che i quark sono confinati negli *adroni* (particelle che possono partecipare nelle interazioni forti, tra cui il neutrone) da una forza che li lega tra loro, la quale, diversamente dall'attrazione gravitazionale o elettrostatica, *cresce con la distanza*, e spiegherebbe il cosiddetto "confinamento dei quark". Quindi, una forte compressione, porta i quark più vicini, a distanze alle quali la forza di confinamento è più debole. I quark potrebbero allora liberarsi. Se questa transizione renda la stella più o meno resistente alla pressione causata dal collasso gravitazionale è una domanda aperta, la cui risposta dipende dalle *due Equazioni di stato* (EOS, relazione che lega temperatura, densità, pressione di uno stato della materia) della materia neutronica e dei quark rispettivamente, entrambe le quali si sono sinora dimostrate impervie a un calcolo esatto. Per i quark sono state proposte, soprattutto in passato, equazioni di stato *rigide*, che permetterebbero l'esistenza di stelle con massa fino a 7 masse solari. Ora sembrano prevalere equazioni di stato *soffici*, che lascerebbero le masse delle stelle di quark nella regione occupata dalle stelle a neutroni. *In ogni caso, le stelle di quark sono tutt'ora considerate una categoria intermedia fra le stelle di neutroni e i buchi neri.*

Noi non conosciamo l'equazione di stato (EOS) del materiale del nucleo della stella a neutroni e ci sono quindi ignote la *densità (temperatura, pressione) critica*. Esistono, naturalmente molte proposte, non poche delle quali basate sul fatto che la densità critica del passaggio dai nucleoni ai quark (Up e Down) dovrebbe essere accessibile all'interno di una stella a neutroni. E questo potrebbe essere vero, non solo per una stella di neutroni ordinaria, ma anche se la stella fosse al limite del collasso in un buco nero. Per esempio si pensa che per raggiungere la densità critica basterebbe che la distanza tra neutroni fosse inferiore al loro diametro di un fattore circa 4, e la densità meno di 100 volte superiore a quella di una stella a neutroni.

Ma, dice Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star)

*“Teoricamente, tale scenario è considerato scientificamente plausibile, ma è stato impossibile dimostrarlo sia dal punto di vista osservazionale che sperimentale, poiché le condizioni estreme necessarie per stabilizzare la materia di quark non possono essere create in nessun laboratorio né osservate direttamente in natura. **La stabilità della materia dei quark, e quindi l'esistenza delle stelle di quark, è per questi motivi tra i problemi irrisolti in fisica.**”*

Gli ottimisti possono vedere in Fig.2 un diagramma che rappresenta, come esempio, l'equazione di stato di **Siemens e Jensen**. Si può notare che, secondo questa equazione di stato, basterebbe una densità dieci volte superiore a quella nucleare, per entrare nella regione "Gas di quark". Questo limite sembra *indipendente dalla temperatura* (alla formazione, la temperatura di una stella di neutroni sembra poter arrivare fino a 80 MeV, ma in pochi anni questa dovrebbe scendere a meno di un KeV per l'emissione di neutrini

legata alla trasformazione di un protone in un neutrone). In ogni caso, a temperature più alte, la densità necessaria alla formazione di materia strana sarebbe inferiore a 10 volte la densità di contatto:

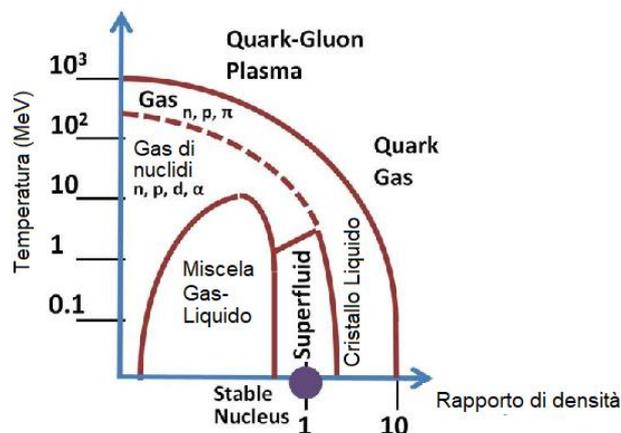


Fig.2

Fasi (o rappresentazione grafica di un'equazione di stato) della materia nucleare di un liquido composto di protoni e neutroni in egual numero. Si noti che si parla di "quark" in generale, senza accennare alla presenza o no di quark strange. Da Siemens e Jensen.

Attribution: Brews ohare [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]

Quindi, nonostante il prudente approccio di en.Wikipedia, all'ipotesi che un nucleo di quark e gluoni possa formarsi assegnerei una probabilità del 70%,.

Poiché sembra che un nucleo di una stella di quark originata da materia ordinaria sarebbe stabile solo oltrepassata una certa pressione/ densità/ temperatura critica assai elevata, ne seguirebbe che una stella di quark ordinari *potrebbe solo sussistere come nucleo di una stella a neutroni*.

Fino a questo punto, abbiamo sempre a che fare con i quark Up e Down della materia ordinaria.

A questo quasi-consenso se ne aggiunge un altro: che, pur partendo da una stella di neutroni che risulta dal collasso di una stella di materia ordinaria e non strana, si giungerebbe rapidamente allo stato in cui circa 1/3 dei nucleoni è Up, 1/3 è Down e 1/3 è Strange. Questo stato sarebbe lo stato favorito della materia quark, essendo lo stato di minima energia, perché avrebbe un livello di Fermi più basso, con tre tipi di fermioni invece di due, e tre diversi livelli di Fermi, uno dei quali (quello del "mare" di quark Strange), sarebbe assai più basso perché Strange, è circa 20 volte più massiccio di Down e circa 40 volte più massiccio di Up, e l'energia di Fermi è inversamente proporzionale alla massa delle particelle considerate.

La conversione avverrebbe grazie a reazioni del tipo di

$$\text{strange} + \text{up} \leftrightarrow \text{down} + \text{up}$$

$$\text{up} \leftrightarrow \text{strange} + \text{positrone} + \text{neutrino}$$

che richiedono **interazioni deboli** per liberarsi della “stranezza” o per acquisirla. (Reazioni che producono quark ancora più massicci sono meno probabili).

Abbiamo dunque la catena che segue: nel nucleo di una stella a neutroni (1) la trasformazione di nucleoni ordinari in quark ordinari (Up e Down) è probabile; (2) la trasformazione di un liquido di due specie di quark in un liquido costituito da tre specie di quark, incluso lo Strange, più o meno in parti eguali è **quasi certa, penso al 90%**.

Le mie due (dilettantesche) valutazioni di probabilità darebbero una risposta alla domanda **Quanto è verosimile la formazione della materia strana in una stella di neutroni ?** Risposta (a mio modesto parere): **verosimile al 60-65% di probabilità.**

3. Ma solo nelle stelle a neutroni?

(**Bodmer (1971) e Witten, (1984).**)

E.Witten sperava che la materia strana potesse rivelarsi un buon candidato alla *materia oscura*. Certamente il Big Bang era il luogo ideale per produrla, data la sua altissima temperatura e densità iniziale: questo, nessuno lo metteva in dubbio. Occorreva però che, raffreddandosi alla temperatura (densità e pressione) odierna, la materia strana potesse sussistere. **A questo punto Witten introdusse la sua congettura o “ipotesi della materia strana”,** secondo la quale *la materia strana contenente un numero sufficiente di quark , a pressione zero e temperatura zero sarebbe tuttavia lo stato di minima energia o stato fondamentale della materia, in quanto ogni adrone avrebbe energia inferiore a quella degli adroni legati nel Fe (56), che è il nucleo più legato.*

*Parte della congettura, come si vede, è il **postulato** che la materia strana sia stabile solo in massa, cioè quando si abbiano dei grumi di quark nei rapporti (1/3, 1/3, 1/3) con un numero sufficiente di quark.*

Questo risponderebbe alla più ovvia obiezione, cioè come mai i nuclei non si trasformino spontaneamente in nuclei strani, se un nucleo strano è più stabile di un nucleo ordinario. La risposta è che perché un nucleo si converta, un terzo dei suoi quark deve diventare Strange. La trasformazione di Up e Down in Strange (e viceversa) richiede **interazioni deboli** che hanno il loro tempo caratteristico (da $10^{(-10)}$ a $10^{(-7)}$ s). Ma partendo da un nucleo di 240 barioni, 720 quark Up e Down, pensare che 240 di essi si convertano in Strange tutti insieme in questo periodo è tanto improbabile da potersi dire che un nucleo

isolato, come i nuclei della materia ordinaria, di fatto, è in uno **stato metastabile**, la cui vita media è di gran lunga superiore all'età dell'universo. Un nucleo singolo è troppo piccolo per mutarsi in un nucleo di materia strana stabile. A questi nuclei o ammassi di materia trasformati in materia strana viene dato il nome inventato da **A. Farhi e R.L. Jaffe**, di "**strangelets**".

*Naturalmente, se questo ragionamento fosse corretto, si incapperebbe nel problema opposto, come possano formarsi grandi masse di materia strana, la cui probabilità di formazione sarebbe ancora inferiore. Ma a questo risponde appunto il **postulato dell'ipotesi della materia strana**: quanto più la massa di quark è grande, tanto meglio definito è il suo stato di minima energia, in cui prima o poi la massa di quark riposerà, con la distribuzione (u, d, s) nei rapporti (1/3, 1/3, 1/3), in qualunque modo ci si arrivi. In realtà, secondo la "**ipotesi della materia strana**" lo stato finale di tutta la materia sarebbe quello con tre quark u,d,s in eguali proporzioni. Quando, non si sa, ma certo prima o poi la metastabilità terminerebbe.*

Ma, **per tornare alla materia oscura**, studi successivi, di **A. Farhi** e altri, hanno dimostrato in modo convincente che anche assumendo come corretta la "**ipotesi della materia strana**", questa decadrebbe in materia ordinaria nel primo secondo di vita dell'Universo. Quindi, niente materia strana primordiale. Tuttavia, non è del tutto escluso che la materia strana sia la materia oscura, ma in tal caso essa deve esser stata prodotta in seguito.

Una stella costituita unicamente di quark Up e Down, con superficie a zero temperatura e pressione, sarebbe altamente instabile e si dissolverebbe spontaneamente. Tuttavia, una delle conseguenze della congettura di Bodmer e Witten è che questo non avverrebbe se un numero sufficiente di quark Up e Down si trasformasse in quark "Strange", di massa più elevata. Il vantaggio deriva dal fatto che la densità dei quark sarebbe spartita fra tre tipi di quark (invece che due), uno dei quali ha massa elevata e livello di Fermi assai più basso. Sarebbe questa la "**materia strana**", e la stella una "**stella strana**". Ne segue che una stella di quark potrebbe essere stabile solo se si trasformasse al più presto in una stella "**strana**". Questo forse spiega perché l'articolo italiano di Wikipedia "**Stelle di quark**" non faccia distinzione fra "**stella di quark**" e "**stella strana**", mentre a rigore le stelle strane sono una sottoclasse delle stelle di quark. https://it.wikipedia.org/wiki/Stella_di_quark.

Ad ogni modo, la domanda su Quora non chiedeva informazioni sulle stelle di quark.

Un'ultima possibile occasione di creazione di materia strana sarebbe il collasso di una Supernova di Tipo II, che potrebbe direttamente produrre una stella strana. Perché no?

4. Come si osserva una stella di neutroni con nucleo di materia strana?

Resta da chiedersi quali **osservazioni** ci possano assicurare o almeno suggerire che abbiamo effettivamente individuato una stella a neutroni con un nucleo di quark.

È più semplice incominciare dalle stelle di quark. En-wikipedia afferma: (https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star) *Se esistessero, le stelle di quark assomiglierebbero e*

si confonderebbero facilmente con le stelle di neutroni: si formerebbero **nel collasso** di una stella massiccia in una **supernova di tipo II** (3), potrebbero essere estremamente **dense e piccole** e possedere un altissimo campo gravitazionale. Mancherebbero anche alcune caratteristiche delle stelle di neutroni, **a meno che non possedessero un guscio di materia di neutroni**, poiché non si prevede che i quark liberi abbiano proprietà corrispondenti alla materia degenerata di neutroni. Ad esempio, potrebbero essere radio-silenziose o non avere dimensioni tipiche, campi elettromagnetici o temperature superficiali, simili alle stelle di neutroni.

Interpreto la frase di Wikipedia come un'affermazione che una stella di neutroni che non si comportasse come le altre, qualunque fosse la differenza di comportamento, potrebbe essere una candidata come stella strana. Ma una stella strana che avesse un guscio di materia di neutroni sarebbe quasi indistinguibile da una stella di neutroni.

5. Conclusione.

In conclusione, a chi ha fatto la domanda si può rispondere con la **risposta breve** che se la materia strana si forma, il che per ora è solo un'ipotesi, **non conosciamo oggi (2019) officine migliori, più abbondanti e certamente esistenti dei nuclei di stelle a neutroni**, delle quali conosciamo bene l'esistenza, attraverso le Pulsar. Anche Wikipedia è d'accordo, e dice: "**La materia strana ... si ritiene possa formare la parte interna particolarmente densa delle stelle di neutroni** ». La tesi che materia strana effettivamente si formi **nei nuclei delle stelle a neutroni**, è quasi comunemente accettata, **come ho stimato, al 60-65% di probabilità**. Alla temperatura, densità e pressione che ci attendiamo nel nucleo delle stelle a neutroni, si crede che la materia strana potrebbe formarsi ed essere stabile pur senza che esista una rigorosa equazione di stato che lo dimostri.

Certo, una stella interamente composta di quark sarebbe ancora più adatta, ma la loro esistenza è ancora più dubbia, anche se non mancano alcuni candidati (4), che hanno dato impulso allo studio di modelli stellari per stelle "strane", e per stelle a neutroni contenenti un nucleo "strano", sulla base della congettura di Witten. *Una stella strana avrebbe la sua genesi o nel collasso di in una Supernova di Tipo II o per contagio, partendo dal nucleo di una stella a neutroni*. La congettura di Witten infatti può essere estesa a concludere che se anche una piccolissima porzione di materia strana entrasse in contatto con materia ordinaria, rapidamente trasformerebbe anche questa in materia strana.

NOTE

(1) Il Modello Standard delle particelle elementari.

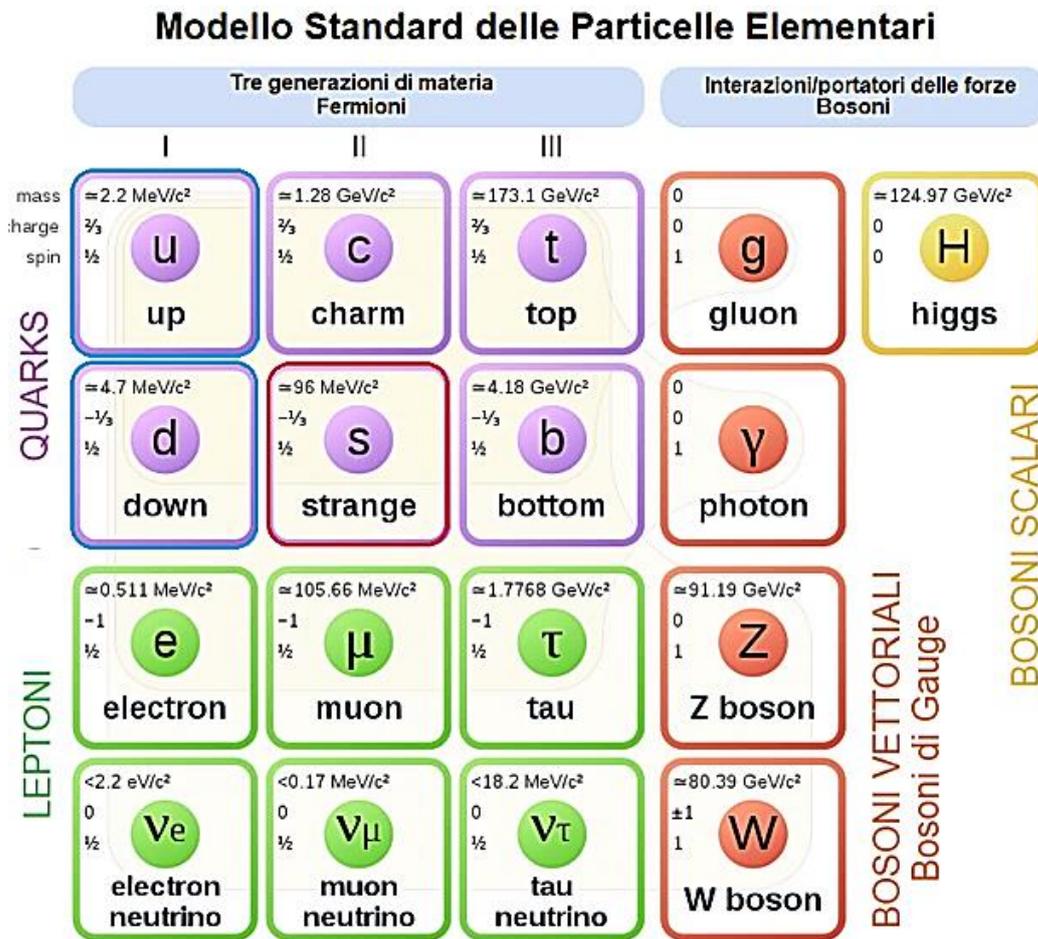


Fig.N1: Il modello standard. Il quark *strange*, il portatore della stranezza, è cerchiato in rosso. Esso non fa parte della materia ordinaria. E i mesoni π , dove sono finiti? Non sono i portatori della forza tra nucleoni, come disse Yukawa? I mesoni π sono finiti fuori del modello standard con tutte le particelle elementari pre-1970: sono particelle composte di due quark e non hanno posto in questa tavola di quark semplici.

(2) Attribuzioni di Fig. 1.

Vector compound of en:File:Neutron_star_structure.JPG and en:File:Neutron_star_cross_section.jpg, data from Paweł Haensel, Alexander Y. Potekhin (Aleksandr Ūrevič Potekhin), Dmitry G. Yakovlev (2007). *Neutron Stars*, p. 12. Springer. ISBN 978-0-387-33543-8. Densities are given in units of the nuclear matter saturation density ρ_0 .

(3) Secondo l' "Ipotesi della materia strana", un nucleo di quark strani potrebbe "contagiare" l'intera stella a neutroni e trasformarla in una stella di quark (o stella strana). Questa è la base di svariati scenari apocalittici, buoni per romanzi di fantascienza.

(4) **Candidati come stelle di quark:** https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star

Allo stato attuale la stella di quark è fortemente ipotetica, tuttavia osservazioni effettuate il 10 aprile 2002 con il [Chandra X-ray Observatory](#) hanno riscontrato due candidate, designate con le sigle [RX J185635-3754](#) e [3C 58](#), precedentemente considerate stelle di neutroni.

La prima delle due risulta **molto più piccola** e la seconda **molto più fredda** di quello che dovrebbero essere secondo le leggi fisiche oggi conosciute, suggerendo l'ipotesi che esse siano composte da materia più densa del "neutronio". Queste osservazioni sono comunque poste in dubbio dagli scopritori stessi i quali ritengono che tali risultati non siano conclusivi.

[XTE J1739-285](#), fu osservata Philip Kaaret ([University of Iowa](#)) e dal suo gruppo, che la citarono come possibile candidata a stella di quark. La stella ruota 1122 volte al secondo, con periodo di rotazione di 0.9 millisecondi, e avrebbe così la rotazione più veloce di ogni altra pulsar, ma i risultati non sono ancora statisticamente significativi. Questa rotazione è vicina al limite di 1500 rotazioni al secondo, a cui si pensa che la pulsar andrebbe in pezzi a causa dalla forza centrifuga.

Nel 2006, Y. L. Yue et al., dell'Università di Pechino, hanno suggerito che [PSR B0943+10](#) possa essere **una stella di quark di bassa massa**. (Bisogna dire che la pulsar ha un comportamento in raggi X e onde radio estremamente peculiare).

Nel 2008 è stato suggerito che osservazioni delle supernovae [SN 2006gy](#), [SN 2005gj](#) e [SN 2005ap](#) indicano l'esistenza di stelle di quark. Così pure, si è ipotizzato che il nucleo collassato della supernova [SN 1987A](#) possa essere una stella di quark. Si noti però che tale nucleo collassato è invisibile, e l'ipotesi che si tratti di una stella di quark è basata appunto sul fatto che esso è invisibile, ciò che si presta poco ad ulteriori osservazioni.

In 2015, Z.G. Dai et al. dell'università di Nanchino hanno suggerito che la Supernova [ASASSN-15lh](#) è una neonata stella di quark strana.

Nell'insieme possiamo concludere che l'esistenza di stelle strane è ancora controversa.