

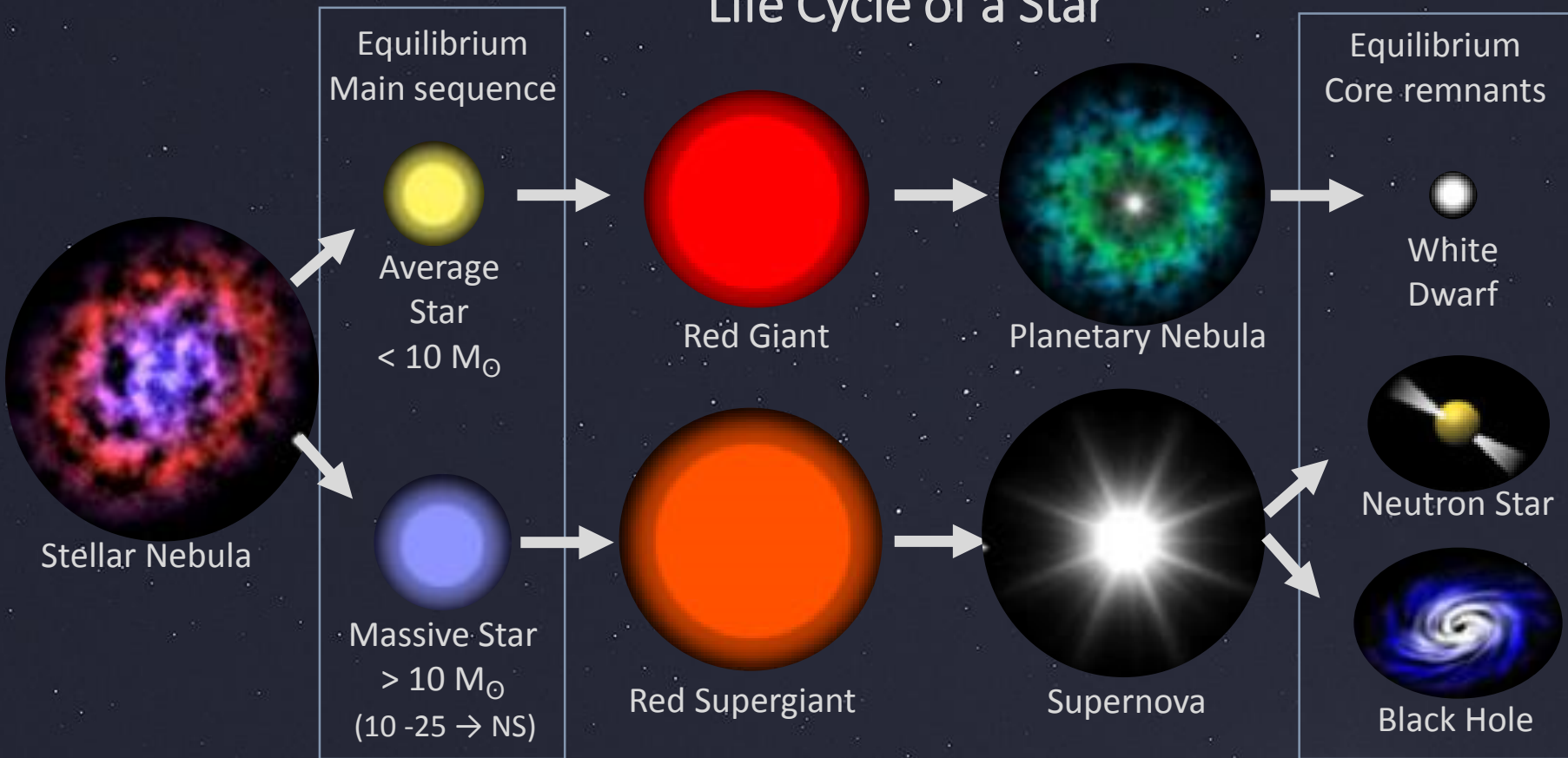
A fehér törpék és a neutroncsillagok fizikája

Magfizika szeminárium 2020

Pataki Adrienn

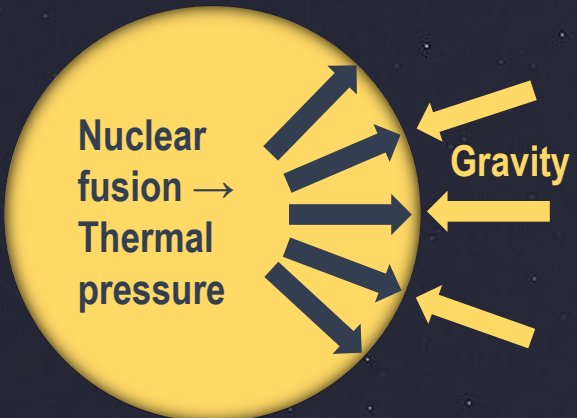


Life Cycle of a Star



WD:
 $M < 1,44 M_{\odot}$
 Chandrasekhar limit (nonrot.)
 $R \approx 0,01 \times R_{\odot} \approx R_{\text{Föld}}$
 $\rho \approx 10^9 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ t/cm}^3$

NS:
 $M = 1,44 - 3 M_{\odot}$
 Tolman–Oppenheimer–Volkoff limit (nonrot.)
 $R \approx 10 \text{ km} \sim R_{\text{város}}$
 $\rho \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3 \approx \rho_{\text{atommag}}$



$M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
 $R_{\odot} = 700.000 \text{ km}$
 $\rho_{\odot} = 1,4 \text{ g/cm}^3$
 $M_{\text{Föld}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$
 $R_{\text{Föld}} = 6.300 \text{ km}$
 $\rho_{\text{Föld}} = 5,5 \text{ g/cm}^3$

Degenerációs nyomás / WD

Atommagok + nem a maghoz kötött elektronok → elektronok „kollektív” állapotban

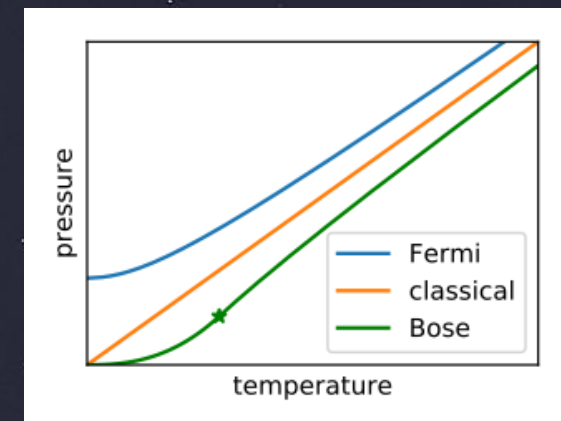
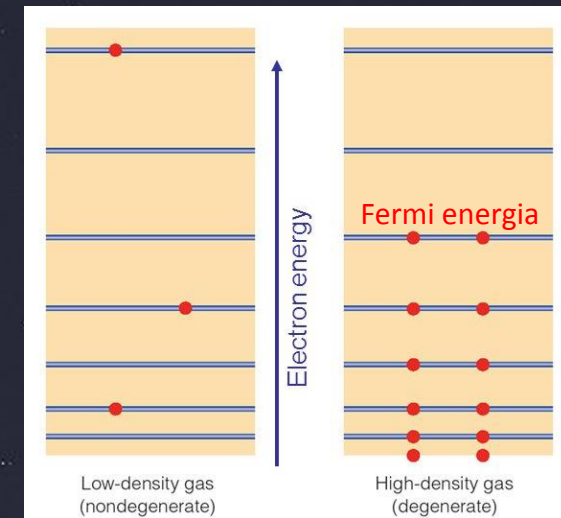
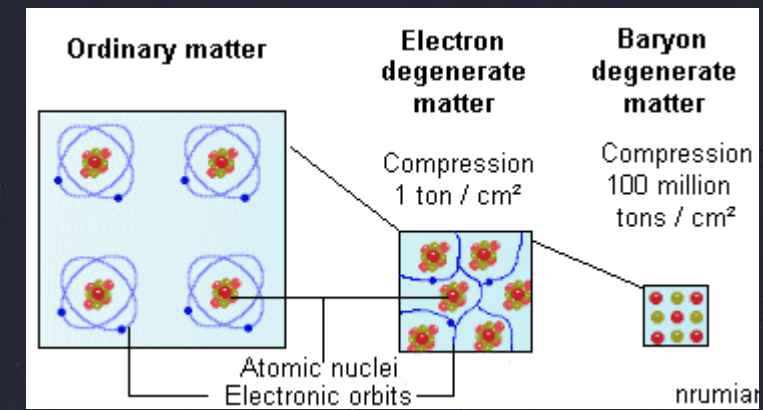
Gravitációs nyomás → nő a sűrűség → az elektronokat megpróbálja a lehető legalacsonyabb energiaszintű kvantumállapotba kényszeríteni.

DE! **Pauli-féle kizárási elv**: 1 kvantumállapotban csak 1 fermion lehet → elektronok már csak magasabb energiaszinteket foglalhatnak el → egyre nehezebb összenyomni ~ **elektronok degenerációs nyomása**

Elektron elfajult anyag (**electron degenerate matter**): elektronok ~ hideg Fermi gáz
Ideális gáztörvény ($P \sim \rho T$) helyett degenerált gáztörvény (P csak ρ -tól függ)

- A degenerációs nyomás nem függ a hőmérséklettől! Csak a fermionok sűrűségétől: $P \sim \rho^{5/3}$
- Relativisztikus elfajult anyag: $P \sim \rho^{4/3}$
- $\Delta x \approx 0 \rightarrow \Delta p$ nagy \rightarrow nagy kinetikus energia (amit nem a hőmérséklet okoz)
- Nehéz összenyomni ~ szilárd anyag
- 0 K-en is van nyomás és E, mert nincs hely az összes elektronnak az alapállapotban
- $M \uparrow \rightarrow$ gravitációs nyomás $\uparrow \rightarrow$ közelebb kerülnek egymáshoz a részecskék $\rightarrow V \downarrow$

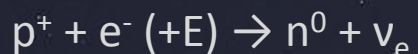
Ez a nyomás a **Chandrasekhar-határig** tud ellen tartani a gravitációs nyomásnak



Degenerációs nyomás / NS

Chandrasekhar-határ felett: az elektronok Fermi energiája már olyan magas, hogy energetikailag kedvezőbb az inverz béta bomlás = **elektronbefogás**:

/az e^- energiája = $(m_n - m_p) c^2 = 1,29 \text{ MeV}$ /



Neutron elfajult anyag (**neutron degenerate matter**): neutronok \sim Fermi gáz
neutronok degenerációs nyomása tart ellen a gravitációnak

A neutronok sokkal közelebb kerülhetnek egymáshoz, mint az elektronok, mert kisebb a Compton-hullámhosszuk (a karakterisztikus méretük)
 \rightarrow a neutroncsillag sokkal kompaktabb, mint a fehér törpe

A Compton-hullámhossz: $\lambda = \frac{h}{mc}$

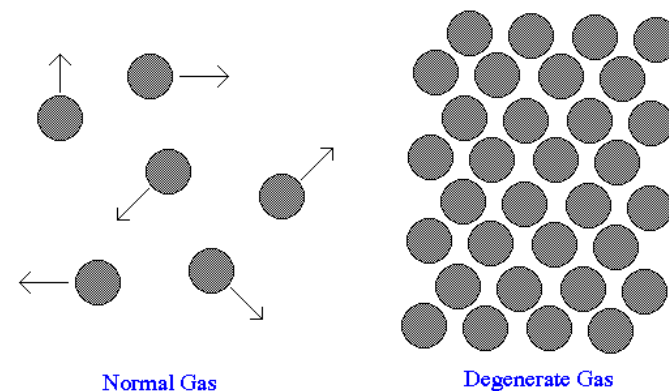
(a részecske tömegének megfelelő energiával rendelkező foton hullámhossza)

Mivel $\frac{m_n}{m_e} \cong 2000 \Rightarrow \lambda_n \cong \frac{\lambda_e}{2000}$

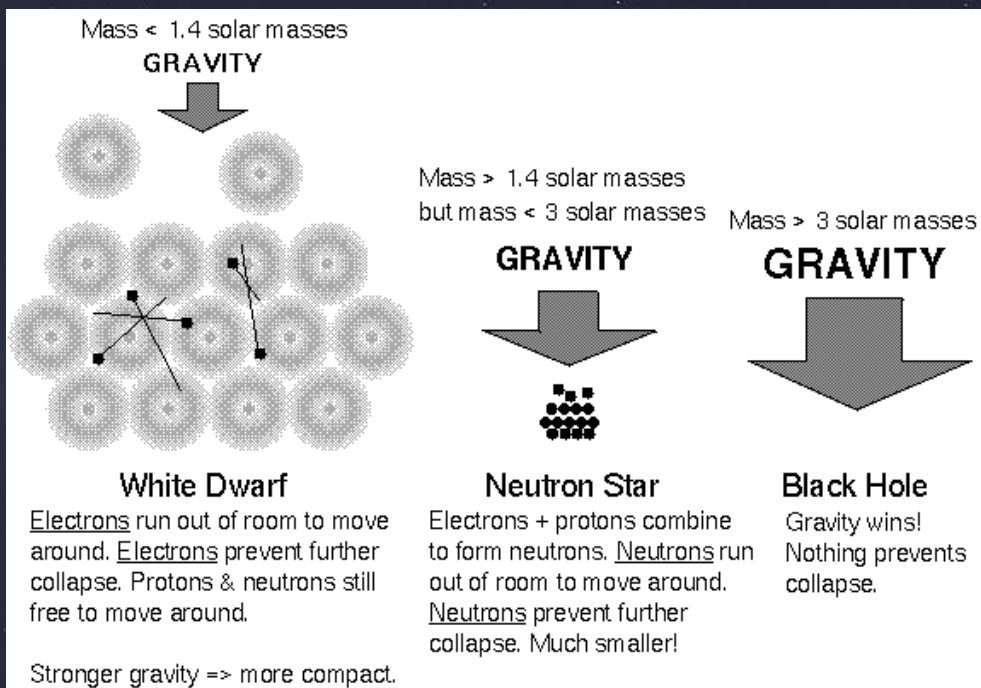
\rightarrow 2.000 x sűrűbben lehet a neutronokat elhelyezni

Ez a nyomás a **Tolman-Oppenheimer-Volkoff-határig** tud ellen tartani a gravitációs nyomásnak. Efölött: fekete lyuk

When a gas becomes extremely high in density, the atoms are not as free to move and they become degenerate.



the result is that you can increase the temperature of the gas (the atoms can wiggle more) but the pressure stays constant (they have no where to move).



Fehér törpe / tömeg-sugár kapcsolat, tömeghatár

Egyensúly → Gravitációs energia = Kinetikus energia

Tömegegységre:

$$E_g = \frac{GM}{R}$$

$$E_k = \frac{Np^2}{2m} = \frac{M^{2/3} N^{5/3} \hbar^2}{2R^2 m}$$

$$E_{k,rel} = Npc = \frac{M^{1/3} N^{4/3} \hbar c}{R}$$

e^- -ok degeneráltak → $p \approx \Delta p$

$$\Delta p \Delta x \approx \hbar$$

$\Delta x \approx$ elektronok átlagos távolsága $\approx n^{-1/3}$

$$p \approx \Delta p \approx \hbar n^{1/3}$$

- G: gravitációs állandó
- M: WD tömege
- R: WD sugara
- V: WD térfogata $\sim R^3$
- p: e^- impulzusa
- m: e^- tömege
- N: $\frac{\#e^-}{M} \rightarrow NM$ db e^-
- n: $\frac{\#e^-}{V} = \frac{NM}{V} \approx \frac{NM}{R^3}$

$$E_g = E_k \rightarrow R \cong \frac{N^{5/3} \hbar^2}{2mGM^{1/3}} \rightarrow R \sim M^{-1/3} \rightarrow M \uparrow \Rightarrow R \downarrow v_e \uparrow$$

$$E_g = E_{k,rel} \rightarrow M_{limit} = N^2 \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{3/2} \cong 0,5 M_\odot$$

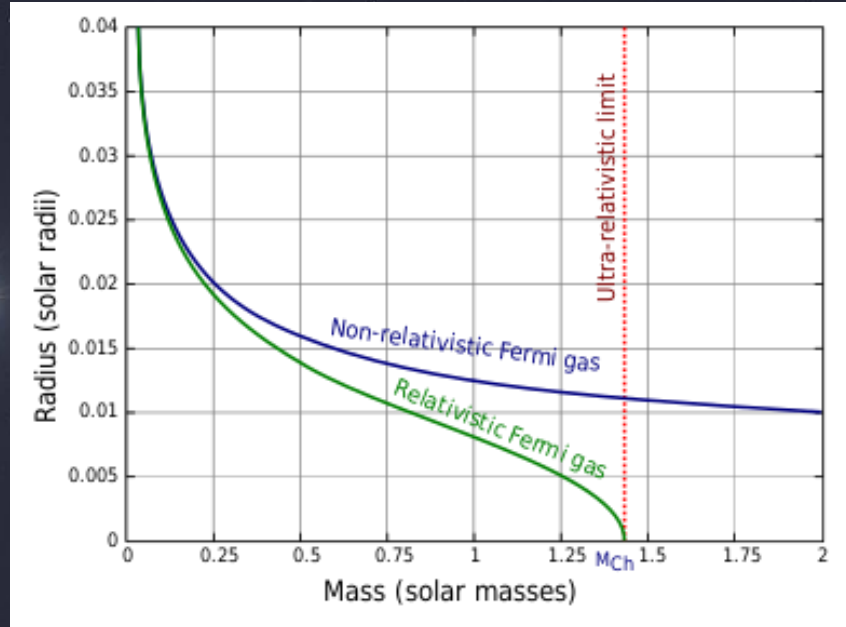
Pontosabb számolás:

elfajult gáz állapotegyenlete + speciális relativitáselmélet
(neutroncsillagra: + általános relativitáselmélet → ???)

$$M_{Ch} = 5,75 M_\odot \frac{1}{\mu_e^2} = 1,44 M_\odot$$

μ_e : 1 e^- -ra jutó moláris tömeg
C, O → $\mu_e = 2$

Ez csak nem forgó fehér törpékre igaz!



Fehér törpe / adatok

Anyaga:

- ha az anyacsillag tömege $< 8 M_{\odot}$ → **C-O** WD (a legtöbb WD ilyen)
- ha az anyacsillag tömege $> 8 M_{\odot}$ → **O-Ne-Mg** WD
- bináris rendszerben tömegvesztéssel → **He** WD

Spektruma:

H, He; C,O-tól eltérő elemek: maradvány vagy akkrécióból
nagy felszíni gravitáció → nehéz elemek bent, könnyűek kint → spektrumban a könnyűek

Fényessége, sugárzása:

nincs magfúzió, az anyacsillagából származó hőt sugározza ki → emiatt van (kis) fényessége

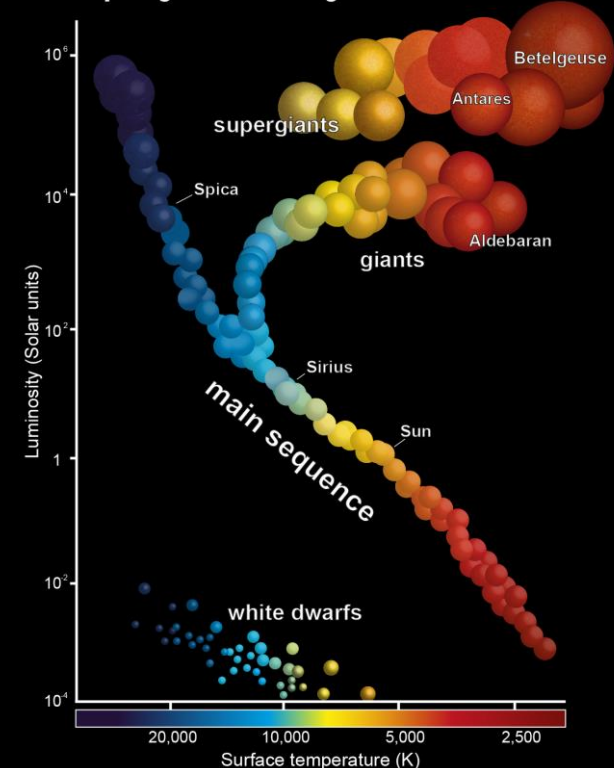
elfajult anyag → elektronok nehezen tudnak más energiaszintű állapotba ugrani
+ kis felszín → a kisugárzás (kihülés) lassú, és egyre lassabb (10-100 Mrd év!)

ahogy hűl, a belsejéből kiindulva elkezd kristályosodni (BCC) → látens hő → még lassabban hűl

Életének vége:

- Termikus egyensúlyba kerül a környezetével → nem sugároz tovább → **fekete törpe**
- C-O WD bináris rendszerben anyag elszívással eléri a Chandrasekhar-határt → **la szupernóva**

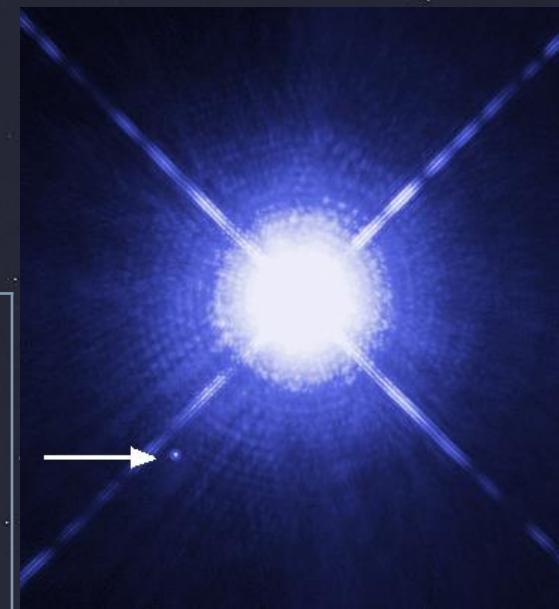
Hertzsprung–Russell Diagram



Fehér törpe / felfedezettek

Gaia (ESA űrtávcsöve): 14.000 fehér törpe (addig: 250)

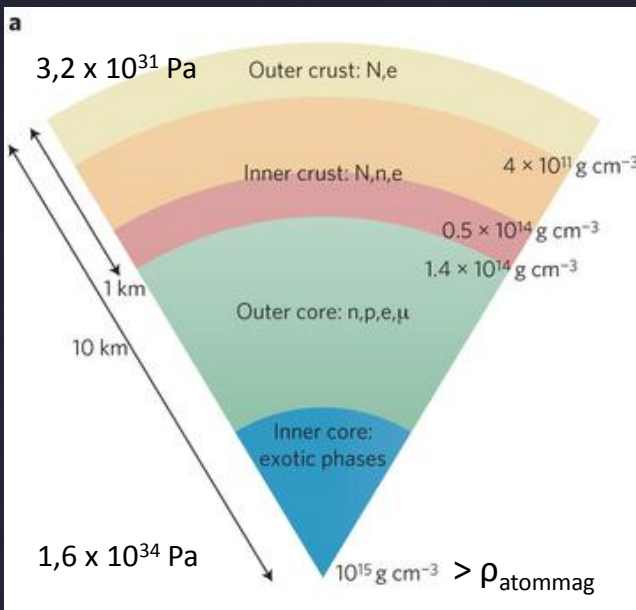
Galaktikus modell szerint a Tejútrendszerben ~ 10 Mrd fehér törpe van



1. felfedezett	40 Eridani B William Herschel 1783 B (WD) + C (RD) = bináris rendszer, körülöttük kering az A (főszorozatbeli csillag)	2. felfedezett	Sirius B Először megjósolták, hogy a Sirius A-nak kell, hogy legyen kísérője, majd az 1860-as években észlelték		
legkönnyebb	0,17 M_{\odot}	legnehezebb	1,35 M_{\odot}	átlag	0,6 M_{\odot}
legkisebb	0,0035 R_{\odot}	legnagyobb	0,265 R_{\odot}	átlag	0,8% - 2% R_{\odot}
legalacsonyabb felszíni hőmérséklet	3.000 K	legmagasabb felszíni hőmérséklet	250.000 K		
legfiatalabb	13 My	legöregebb	12 Gy		
legközelebbi	8,6 Ly (Sirius B)	legtávolabbi	10.5 Mrd Ly		



Neutroncsillag / szerkezet



Atmoszféra: ~ fél m vastag

Külső kéreg: ~ 100 m

atommagok (Fe) szilárd rácsba tömörödve + elektronok

Nagyon kemény és sima: max egyenetlenség ~ 5 mm (extrém gravitáció miatt)

Befelé haladva:

egyre több neutron (extrém nyomáson nem bomlanak el olyan gyorsan, mint a Földön)

neutrongazdag atommagok, majd neutroncsöpögés (**neutron drip**)

neutron gáz → szuperfolyékony neutron → szilárd neutronkristály

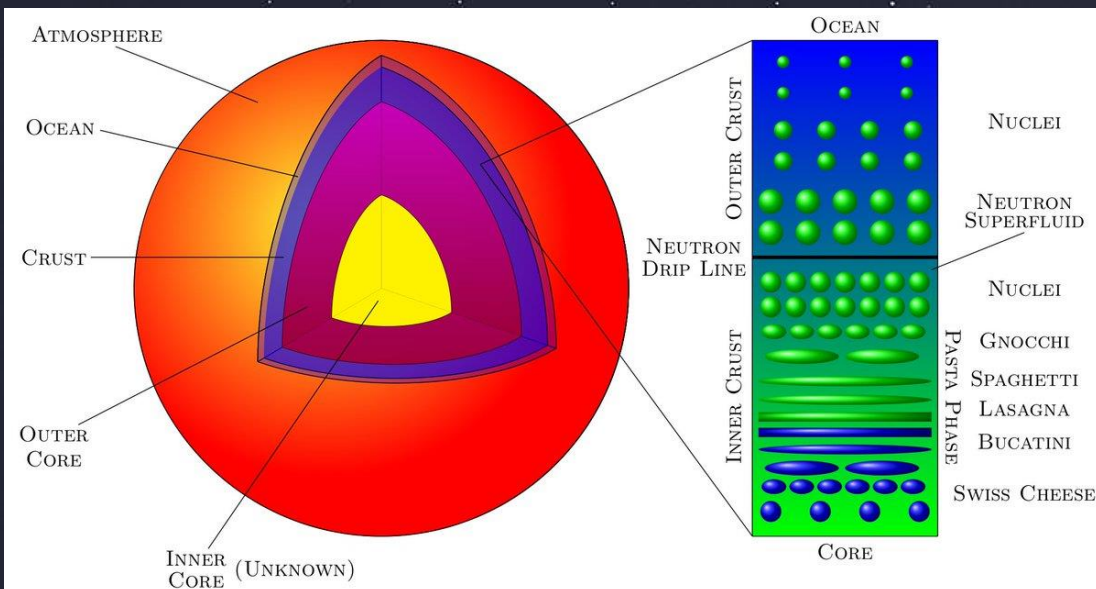
Nukleáris pasta (**nuclear pasta**):

különböző, nem gömb alakú atommagok


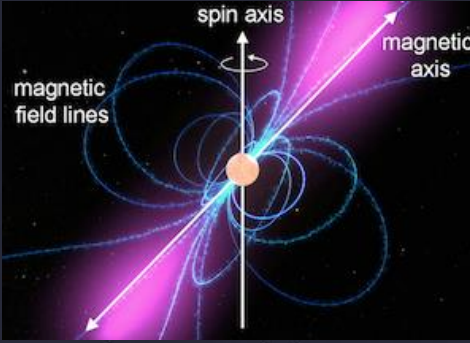
átmenet: hagyományos anyag → ultrasűrű anyag

Belső mag: ??? hipotetikus extrém anyagfajták

- **quark-gluon plazma**
quark-degenerate matter
- hyperon-gáz
s-quarkot is tartalmaz; az s-quark a nukleonok kinetikus energiájából keletkezik, gluon a katalizátor
- pion-kondenzátum
 π megjelenik, ha az e^- kémiai potenciálja = π nyugalmi tömege



Neutroncsillag / adatok

Gravitációs mező	<p>felületén: $2 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$ ($\sim 2 \times 10^{11} \times$ Földi)</p> <p>gravitációs lencseként viselkedik ha NS sugara $\leq 3GM/c^2 \rightarrow$ fotonok egy körpályán keringenek \rightarrow egy kitüntetett pontból a NS teljes felszíne láthatóvá válik!</p> <p>1 m magasból leejtett tárgy 1.400 km/s sebességgel csapódna be + spagettifikáció</p> <p>szökési sebesség: $0,25 - 0,5 c$</p>	
Mágneses mező	<p>felületén: $10^4 - 10^{11} \text{ T}$ ($\sim 10^8 - 10^{15} \times$ Földi, Föld: $25 - 65 \mu\text{T}$) 16 T-val laboratóriumban már levitáltatni tudtak egy élő békát</p> <p>magnetár: $10^8 - 10^{11} \text{ T}$</p> <p>pulzár: mágneses pólusból EM sugárnyaláb a befogott anyag itt zuhan be \rightarrow E szabadul fel (rtg sugarak) világítótornyos effektus (periodikus pulzálás)</p>	
Forgási sebesség	<p>a csillag összeomlásakor a perdület megmarad \rightarrow több 100 1/s spin down</p>	
Hőmérséklet	<p>kialakulásakor $10^{11} - 10^{12} \text{ K}$, ami néhány év alatt 10^6 K-ra esik le (neutrínók elszállítják az energiát) \rightarrow ezen az alacsony hőmérsékleten röntgenben sugároz</p>	

Neutroncsillag / felfedezésük

A Tejútrendszerben ~ 1 Mrd neutroncsillag lehet

Jelenleg 2.000-et ismerünk a Tejútrendszerben és a Magellán-ködben (a legtöbb rádió pulzár)

Detektálásuk: pulzárak \rightarrow sugárzásuk által
 bináris rendszer tagja \rightarrow gravitációs hatása által

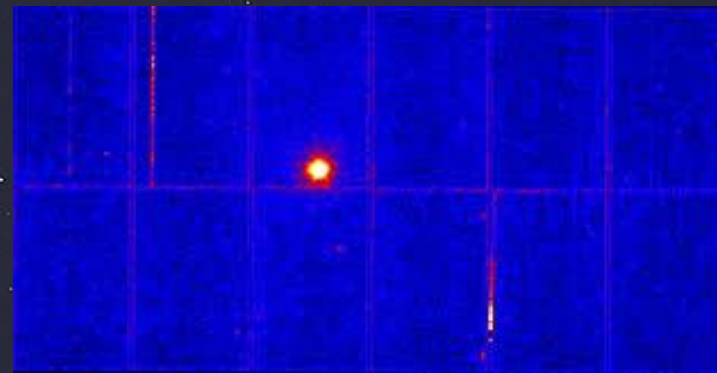
1933.dec: Baade & Zwicky megjósolta a neutroncsillagok létezését
 (kevesebb, mint 2 évvel a neutron felfedezése után!)

1967: 1. észlelt neutroncsillag egy pulzár volt: 1,2 mp-enként ismétlődő jelek
 először idegen civilizációnak vélték

2017: két neutroncsillag összeolvadása által keltett gravitációs hullámokat detektáltak (LIGO-Virgo)



Legfiatalabb	240 y	2020 márc. 12; ESA XMM-Newton Swift J1818.0–1607; magnetár
Legnagyobb tömegű	2,14 M_{\odot}	2019 szeptemberében fedezték fel
Legközelebbi	424 Ly	
Leggyorsabban forgó	716 1/s	\rightarrow felszíni sebesség: 0,24 c



Felhasznált irodalom

https://en.wikipedia.org/wiki/White_dwarf

https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

https://en.wikipedia.org/wiki/Degenerate_matter

https://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_gas

https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_pasta

Bose–Einstein condensates in neutron stars: <https://arxiv.org/pdf/1507.05839.pdf>

Norman K. Glendenning: Compact Stars – Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity - Introduction

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/Ast162/lectures/notesWL22.html>

https://www.judithirwin.com/uploads/9/7/2/4/97241160/phys815_densematterphysics_frosst.pdf

Dávid Gyula: Pislákoló csillagroncsok: <https://www.youtube.com/watch?v=va1GgebVwo0>

https://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/electron_degenerate_matter.html

<https://www.daviddarling.info/encyclopedia/N/neutronstar.html>