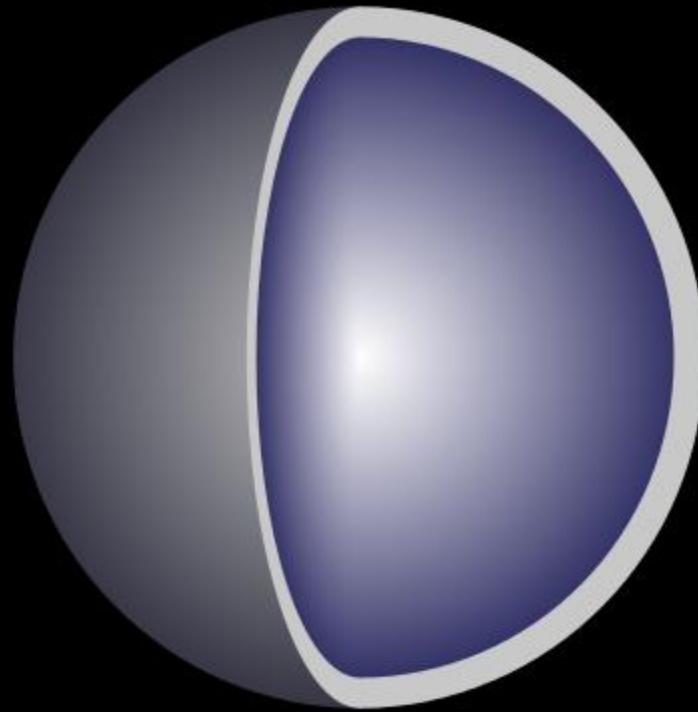


# Innerer Aufbau von Neutronensternen



## Neutronensterne sind stellare Objekte im hydrostatischem Gleichgewicht

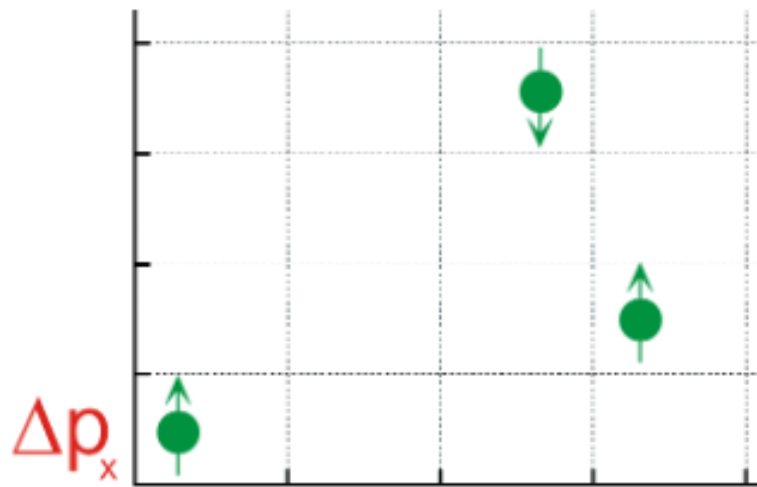
Die Gegenkraft zur Gravitation wird durch den Entartungsdruck der fermionischen Materie (Elektronen, Neutronen) aufgebracht. Die thermische Komponente spielt dabei keine Rolle – d. h. Neutronensterne bleiben auch bei Abkühlung stabil

Der Aufbau eines nichtthermischen „Entartungsdruckes“ in einem Fermionengas (Fermionen – Teilchen mit halbzahligen Spin) ist ein Quanteneffekt, der sich aus dem **Pauli'schen Ausschließungsprinzip** ergibt:

*In einer durch die Heisenbergsche Unschärferelation gegebenen Phasenraumvolumen können sich niemals zwei Teilchen im gleichen quantenmechanischen Zustand aufhalten*

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h^3$$

In Fall von Elektronen und Neutronen finden maximal zwei Teilchen in einer Phasenraumzelle platz. Sie unterscheiden sich lediglich in der Ausrichtung des Spins.

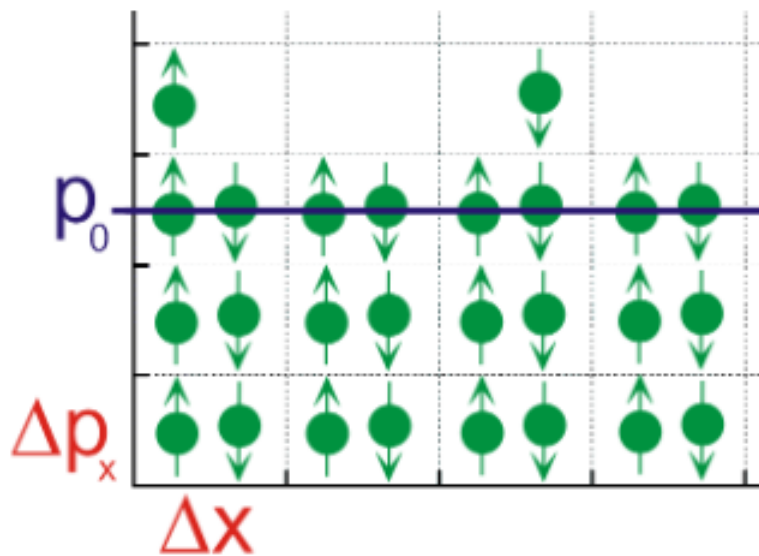


bei genug „Platz“

→ keine Wechselwirkung

→ ideales Gas

⇒ **thermischer Druck**



für hohes  $\rho$  oder  $T \rightarrow 0$

→ es wird eng im Phasenraum

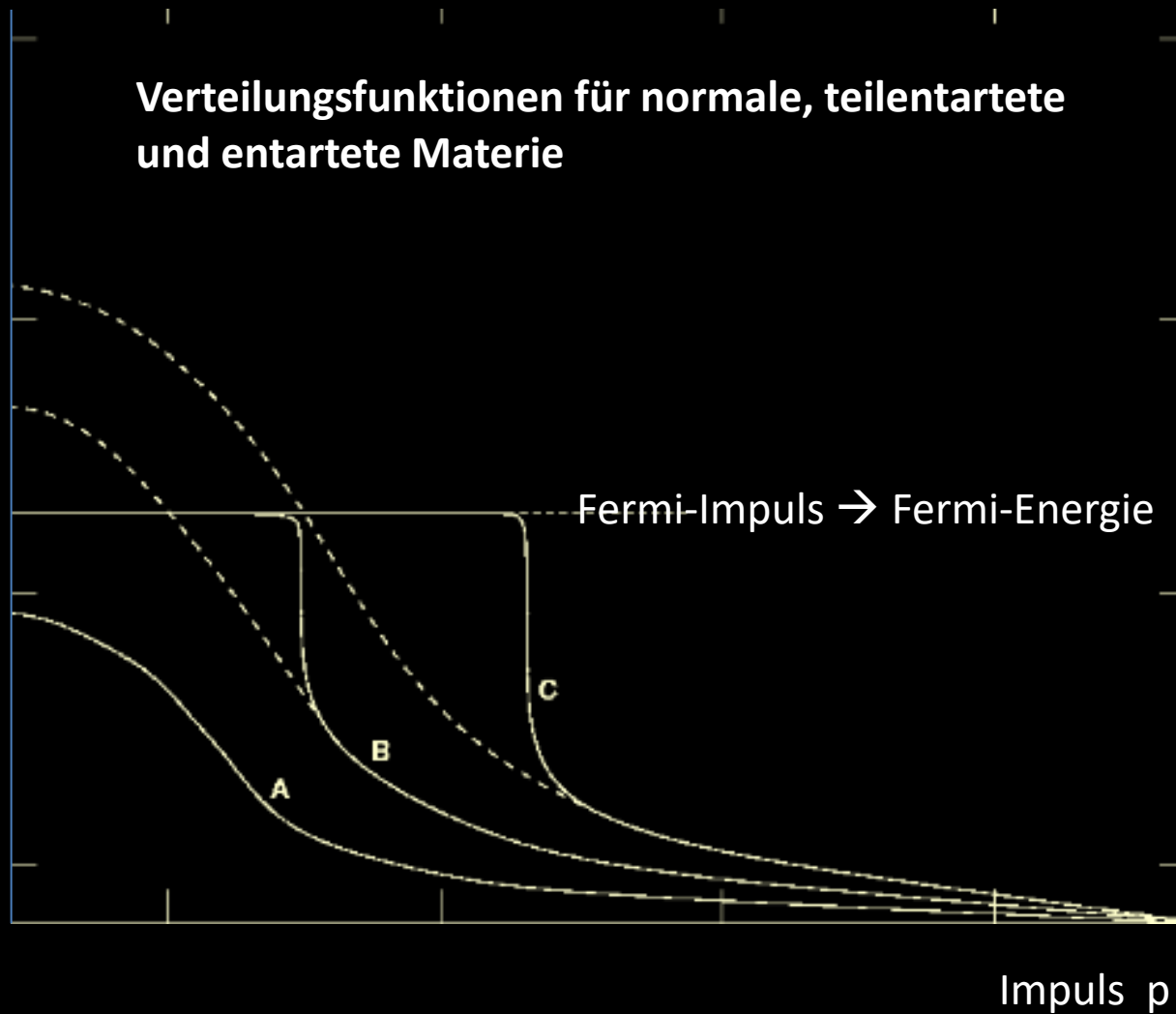
→ Entartung tritt ein

⇒ **Entartungsdruck**

Der Druck  $p_0$  entspricht einer bestimmten Energie. Die Energie, bis zu der alle verfügbaren Phasenraumzellen belegt sind, nennt man Fermi-Energie  $E_F$ .

## Verteilungsfunktionen für normale, teilentartete und entartete Materie

Anzahl Fermionen pro Impulsintervall

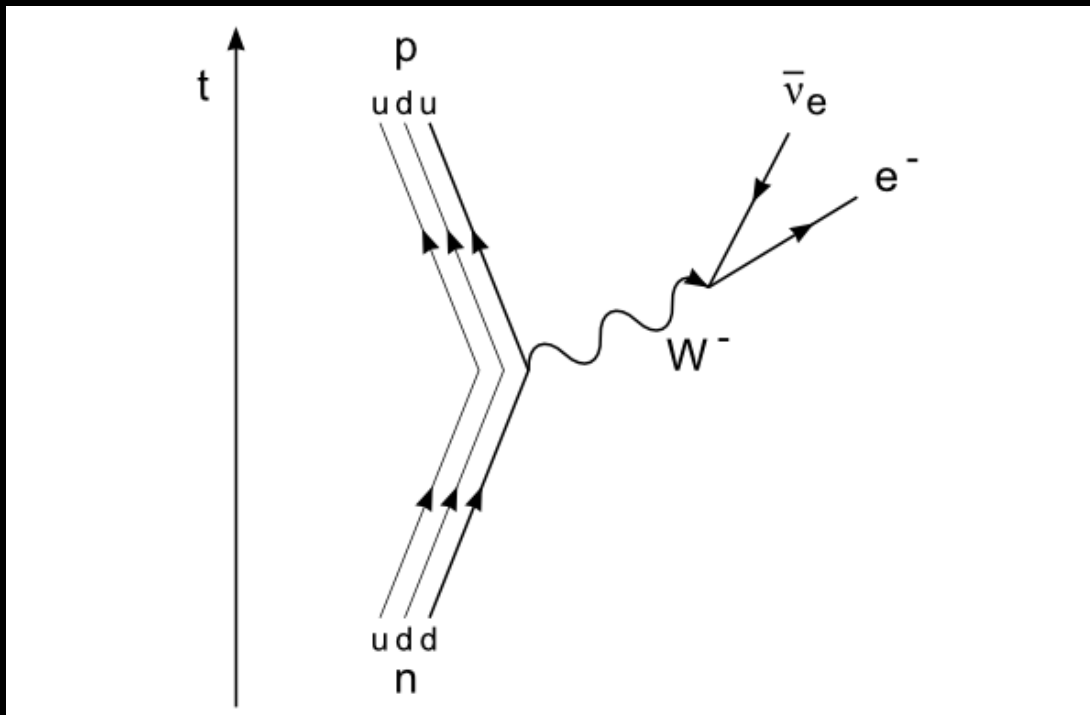


- A Maxwellverteilung
- B Entartung tritt ein
- C Entartung steigt

- Der Entartungsdruck ist nicht-thermisch (also selbst bei  $T=0$  vorhanden)
- Entartung tritt in Sternen erst bei sehr hohen Dichten auf (das Sternvolumen begrenzt die Anzahl der verfügbaren Phasenraumvolumina)
- Es gilt bei Entartung: Je größer die Masse, desto kleiner das Volumen (hydrost. GW)

Die hydrostatische Stabilisierung eines Neutronensterns erfolgt durch den Entartungsdruck der weitgehend inkompressiblen Neutronenflüssigkeit im Inneren des Neutronensterns.

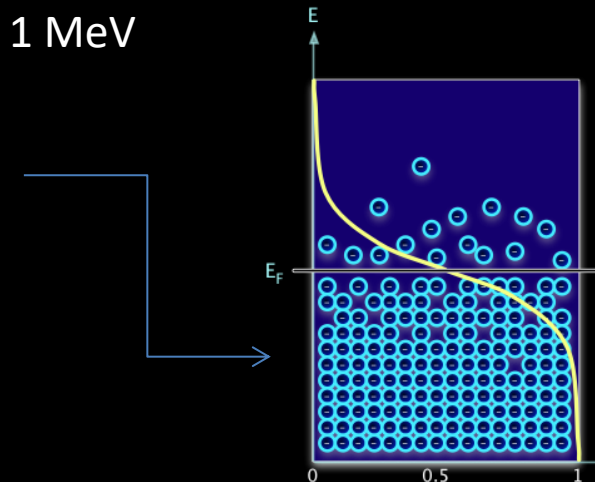
Die Elektronenentartung verhindert den Beta-Minus-Zerfall der Neutronen, die deshalb im Gegensatz zu „normalen“ Bedingungen langzeitstabil sind (absolute Zahl der Elektronen ist dabei gleich der absoluten Zahl der in der Neutronenmaterie eingelagerten Protonen).



Lebensdauer: 14 min 40 s

Halbwertszeit: 10 min 10 s

Energie des Elektrons kleiner  
1 MeV

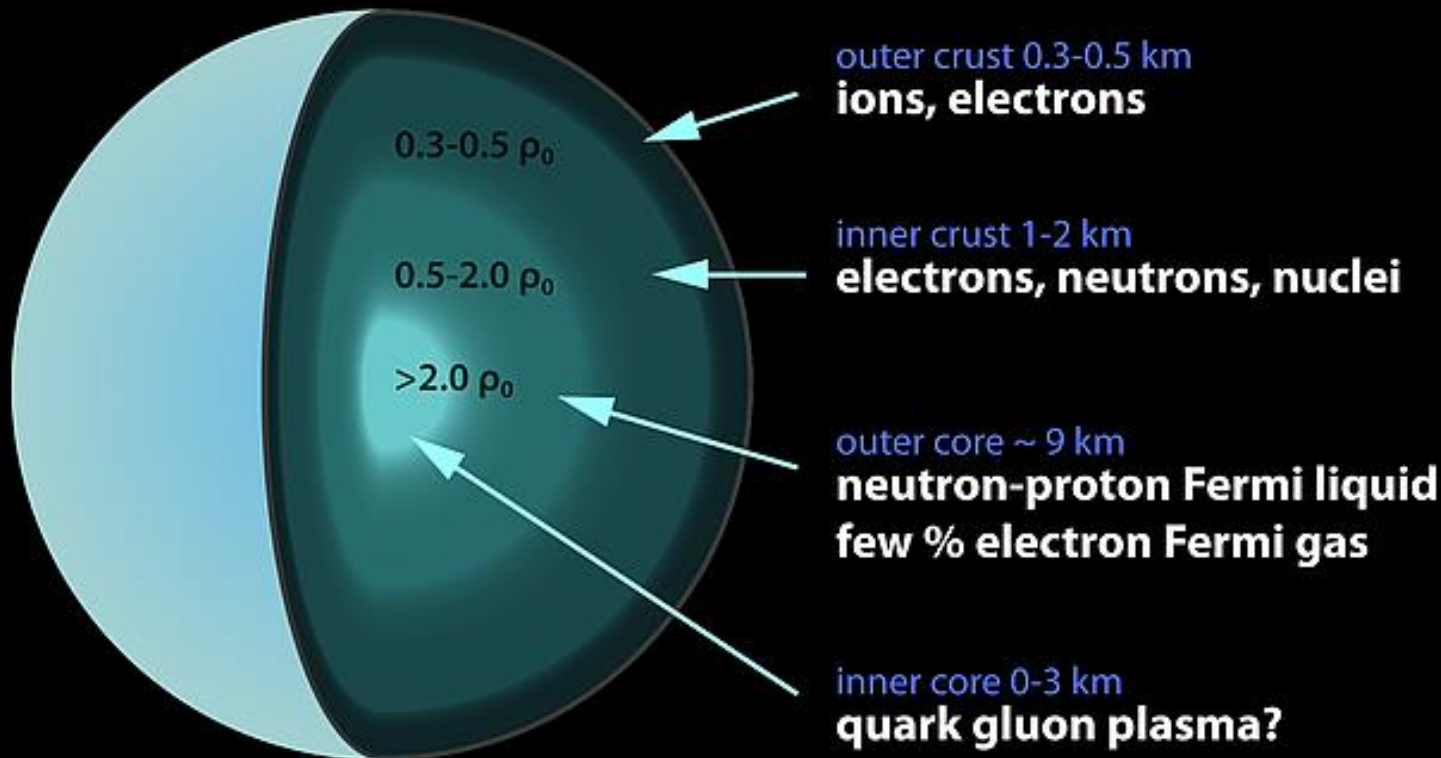


Die Bedingung des hydrostatischen Gleichgewichts führt zu einem radialen Druck- und Dichtegradienten.

Druck in der Neutronensternkruste:  $\approx 10^{33}$  Pa

Druck im Zentrum eines Neutronensterns:  $\approx 10^{38}$  Pa

*(abhängig von der verwendeten Zustandsgleichung)*



$\rho_0 =$  Atomkerndichte ( $4 \cdot 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>)

# Schalenaufbau eines kanonischen Neutronensterns ( $M=1,4$ Sonnenmassen)

## Atmosphäre

Temperatur: 3 Millionen K

Skalenhöhe einer Wasserstoffatmosphäre  $\sim 1$  mm

Skalenhöhe einer Kohlenstoffatmosphäre  $\sim 1$  cm

Da die thermische Energie der Teilchen immer noch größer ist als die coulombsche Bindungsenergie eines Kristallgitters, handelt es sich hier immer noch um ein Gas!

Die Dichte erhöht sich dabei über die Skalenhöhe von  $\approx 10^6$  kg/m<sup>3</sup> auf  $\approx 10^{10}$  kg/m<sup>3</sup>

Die Dynamik der Neutronensternatmosphäre wird primär

- a) durch das lokale Magnetfeld
  - b) durch den Druck der hindurchdiffundierenden kurzwelligigen Strahlung
- bestimmt.

Bei Röntgendoppelsternen bestimmt die Atmosphärendynamik und die chemische Zusammensetzung primär die einfallende Materie (Akkretion)

Emittiert thermische Röntgenstrahlung

# Kruste

Der Atmosphäre folgt in radialer Richtung die „Kruste“, die durch den Übergang in eine kristalline bzw. quasikristalline Struktur hoher Temperatur ( $T \approx 10^{11}$  K) und Dichte ( $\rho_c \approx 10^{16}$  bis  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>) gekennzeichnet ist

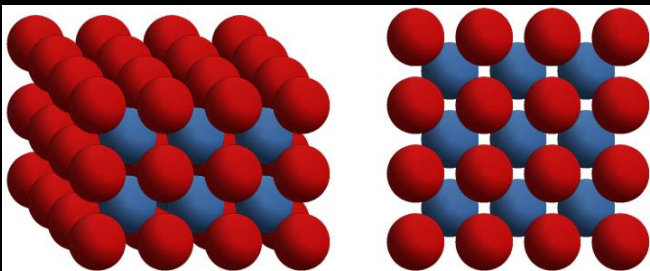
**Äußere Kruste:** Solange  $T > 5 \cdot 10^9$  K kommt es zu strukturellen Änderungen

→ pyknonukleare Reaktionen: He → ... → Fe (exotherm)

→ Bei Unterschreiten der Temperatur → Kristallisation (nach ca. 100 Jahre Abkühlung)

Kristallines Ionengitter aus Fe-Kernen, eingebettet in ein entartetes Neutronengas

→ extrem „reines“ kubisch-raumzentriertes Gitter (milliardenfach härter als Stahl!)



Berge und Gebirgszüge können nur wenige Millimeter bzw. nach neueren Untersuchungen nur wenigen Zentimeter hoch werden

→ Nachweisbar über Gravitationswellen!



Die äußere kristalline Kruste ist bis etwa zu einer Dichte von 1/500 der Atomkerndichte stabil (d. h. bis in ca. 100 m Tiefe)

- Ionen sind Eisenkerne (Fe)
- Mit zunehmenden Druck nimmt die Wahrscheinlichkeit immer mehr zu, dass Protonen im Fe-Kern Elektronen einfangen und sich in Neutronen umwandeln (inverser Beta-Zerfall)
- Die Neutronen werden gemäß der Hundschen Regeln auf die Kernenergieniveaus verteilt
- Erreicht das oberste besetzte Niveau den Ruheenergiewert des Neutrons, dann „tröpfelt“ das Neutron aus dem Eisenkern heraus und wird zu einem „freien Neutron“



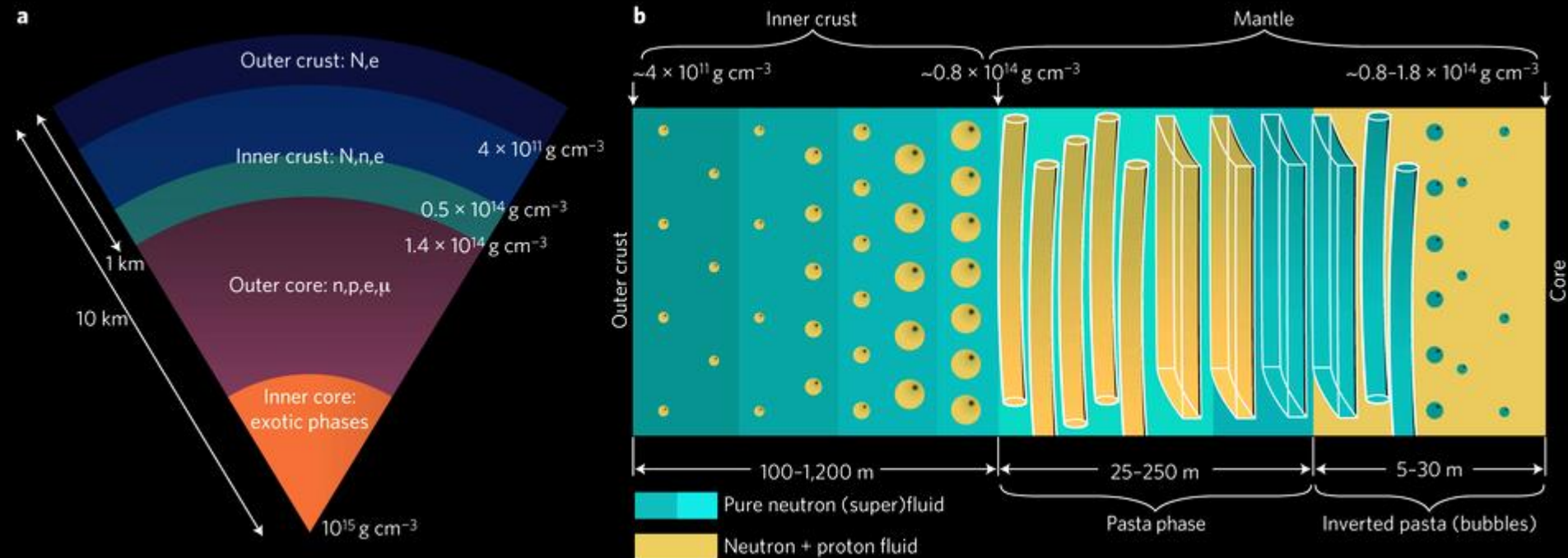
**Neutron drip point**

$$4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$$

Diese freien „Kontinuumsneutronen“ bilden ein entartetes Neutronengas innerhalb des Kristallgitters, das mit weiter steigender Dichte in eine Neutronenflüssigkeit übergeht, in dem sich schließlich das Ionengitter auflöst und nur wenige freie Protonen (maximal 20%) übrigbleiben.

# Innere Kruste

Im Übergangsbereich zwischen innerer Kruste und Bulk geht die Materie in eine Neutronenflüssigkeit über, die außerdem noch Elektronen und zu einem geringen Prozentsatz Protonen enthält (ca. 9:1 für n:p).



„Pasta-Phasen“ der Kernmaterie: