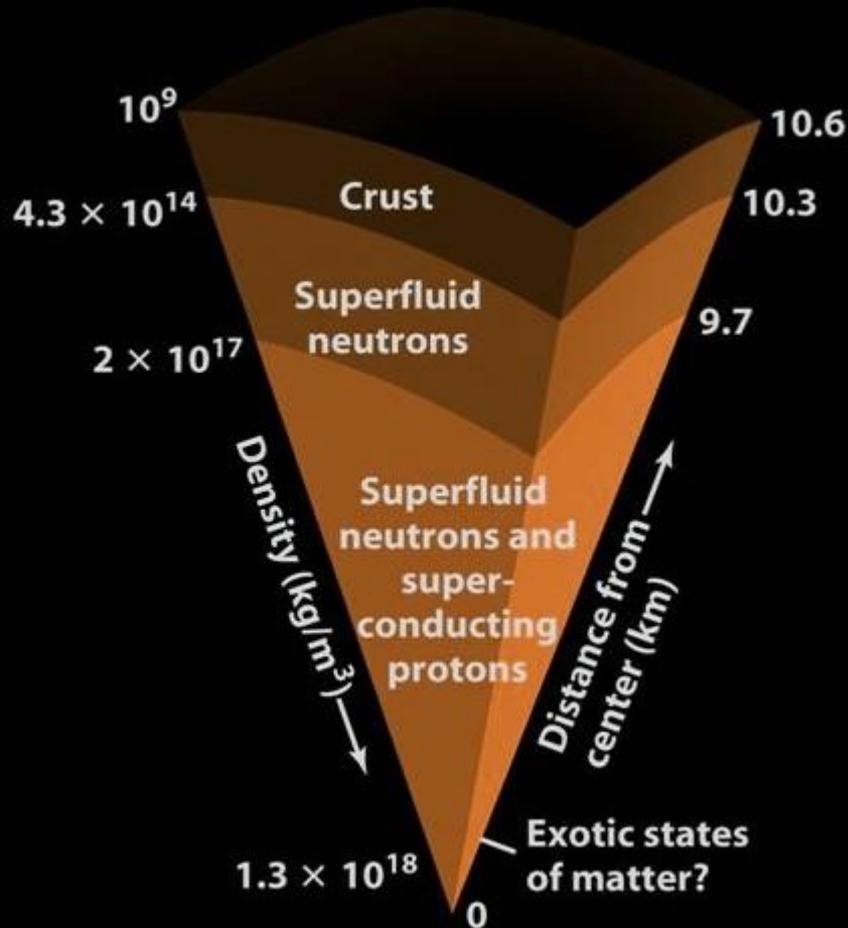
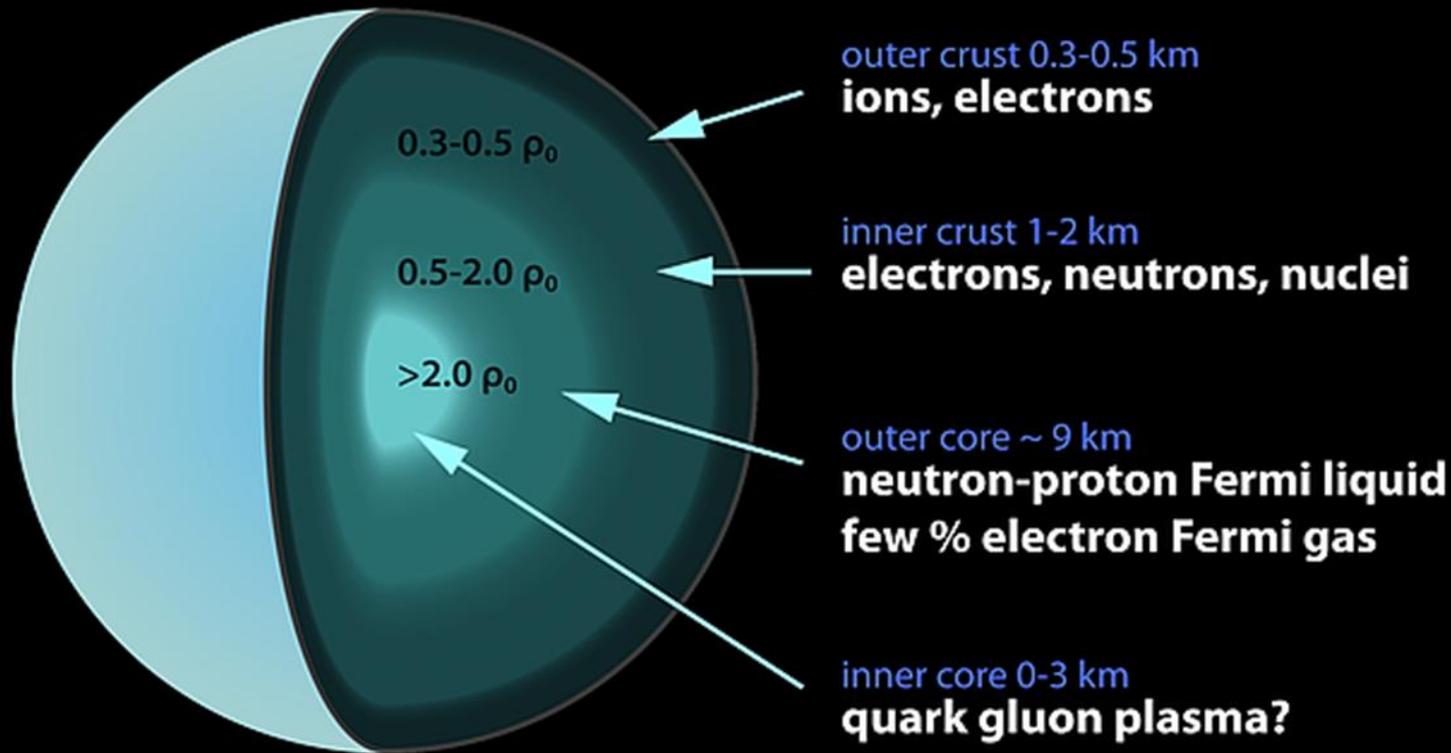


Kompakte Sterne

Suprafluide Neutronensternmaterie

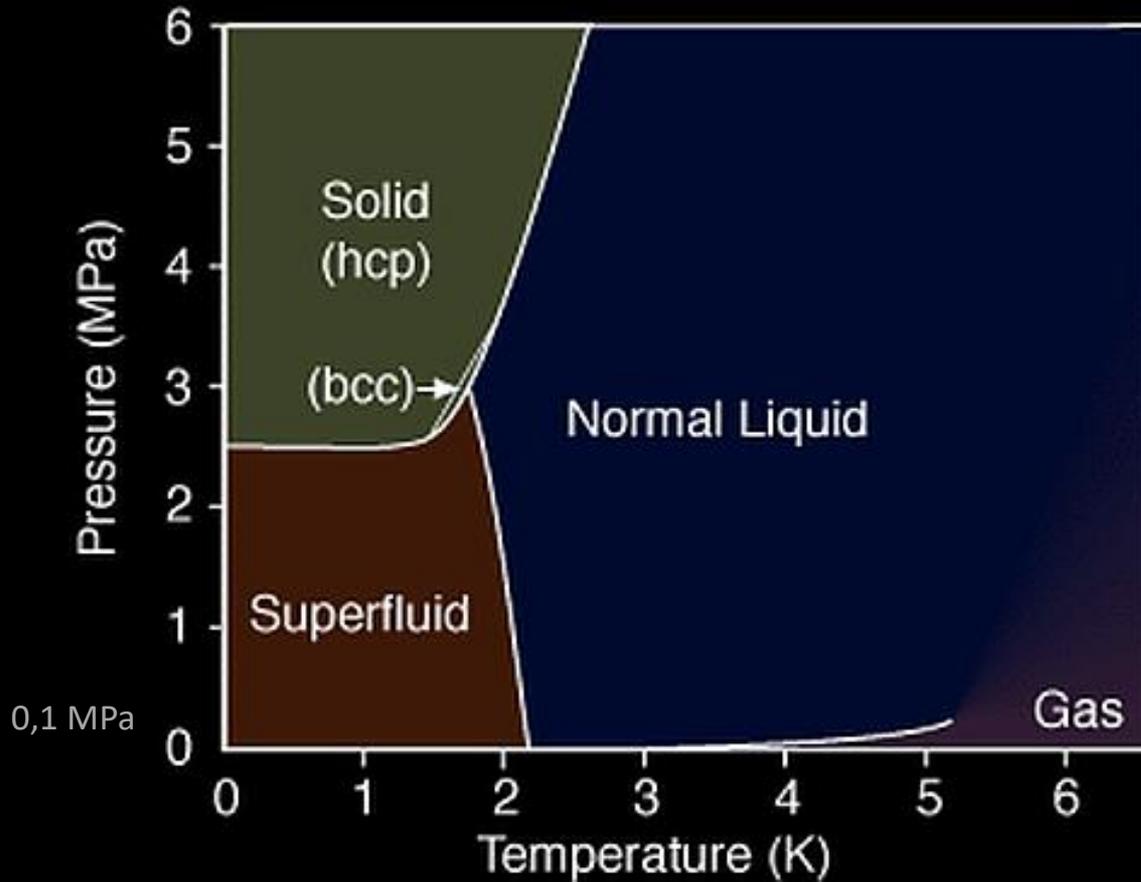


Im kanonischen Neutronensternmodell besteht der Mantel aus einer suprafluiden Neutronenflüssigkeit mit einer eingelagerten supraleitfähigen Protonenkomponente.

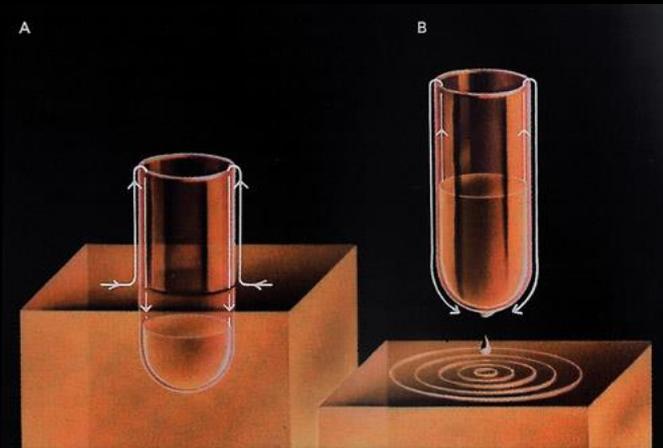


$\rho_0 = \text{Atomkerndichte } (4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3)$

Das Phänomen der Suprafluidität



He-4 wird flüssig bei 4,2 K
He-4 wird supraflüssig bei 2,2 K



Phasendiagramm von Helium - 4

(Erstaunliche) Eigenschaften einer Supraflüssigkeit

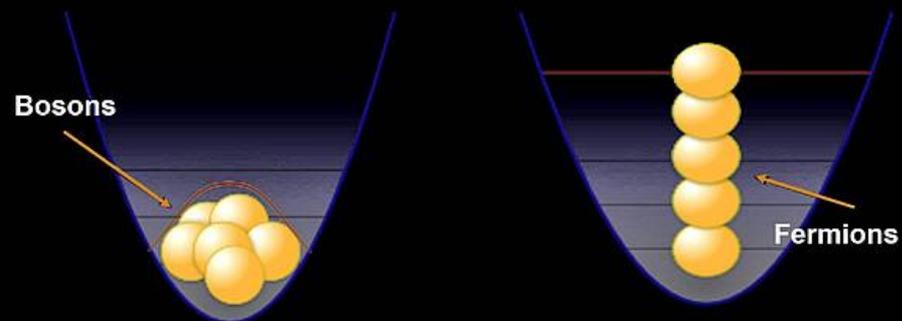
- Die innere Reibung (Viskosität) verschwindet
- „Onnes“-Effekt („kriecht“ an einer Behälterwand hoch und entschwindet...)
- Ist immer isotherm. Es lässt sich kein Temperaturgradient aufbauen (SW: 2. Schall)
- Kann keine Kraftwirkung auf einen anderen Körper ausüben
- Ausbildung quantisierter Wirbel in rotierender Flüssigkeit



Fontäneneffekt

Die Eigenschaften von suprafluiden Helium lassen sich klassisch nicht erklären.
Es handelt sich hierbei um einen makroskopischen Quanteneffekt.

Ensembles von Teilchen mit ganzzahligen (oder verschwindenden) Spin verhalten sich nahe am absoluten Nullpunkt völlig anders als Teilchen mit halbzahligen Spin.

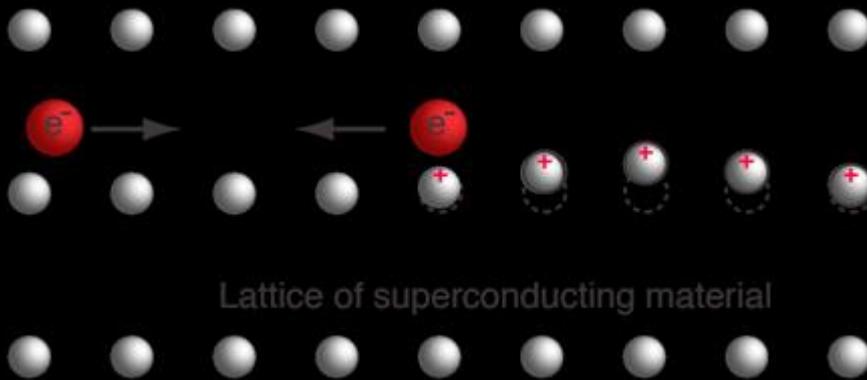


- Bosonen sind ununterscheidbare Teilchen → totale Delokalisation bei $T=0$
- Fermionen sind unterscheidbare Teilchen

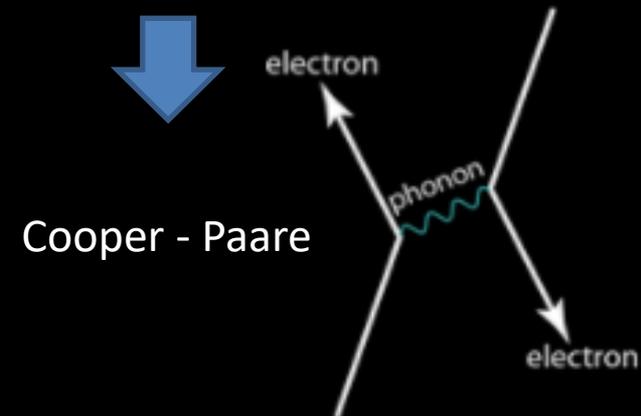
Suprafluidität und Supraleitfähigkeit sind im Prinzip das gleiche Phänomen

- Suprafluidität → elektrisch neutrale Teilchen (z. B. H-4, He-3, Neutronen)
- Supraleitfähigkeit → elektrisch geladene Teilchen (z. B. Elektronen, Protonen)

Problem: He-3, Elektronen, Neutronen und Protonen sind FERMIONEN!



Pseudopaarung von Elektronen durch Elektronen – Phononen- WW



Elektrischer Widerstand (\equiv Viskosität) verschwindet

BCS – Theorie der Supraleitfähigkeit

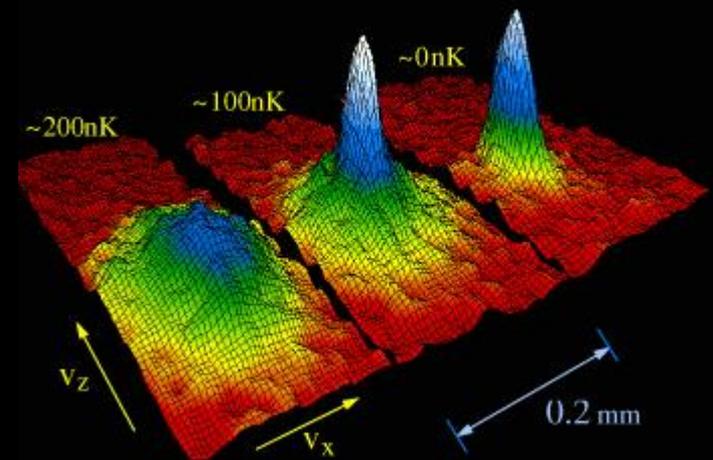
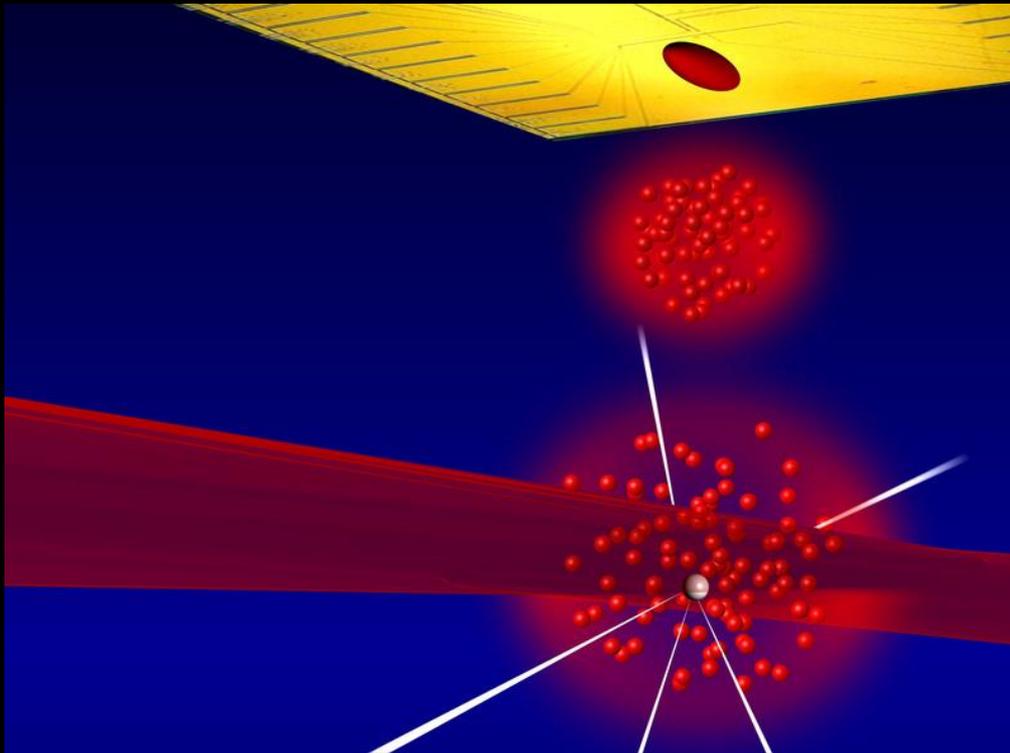
Zugrundeliegender quantenphysikalischer Effekt:

→ Bose – Einstein - Kondensation

1924 von S. N. Bose und A. Einstein (unabhängig voneinander) vorhergesagt

1995 zum ersten Mal von E. A. Cornell, W. Ketterle und C. E. Wieman hergestellt

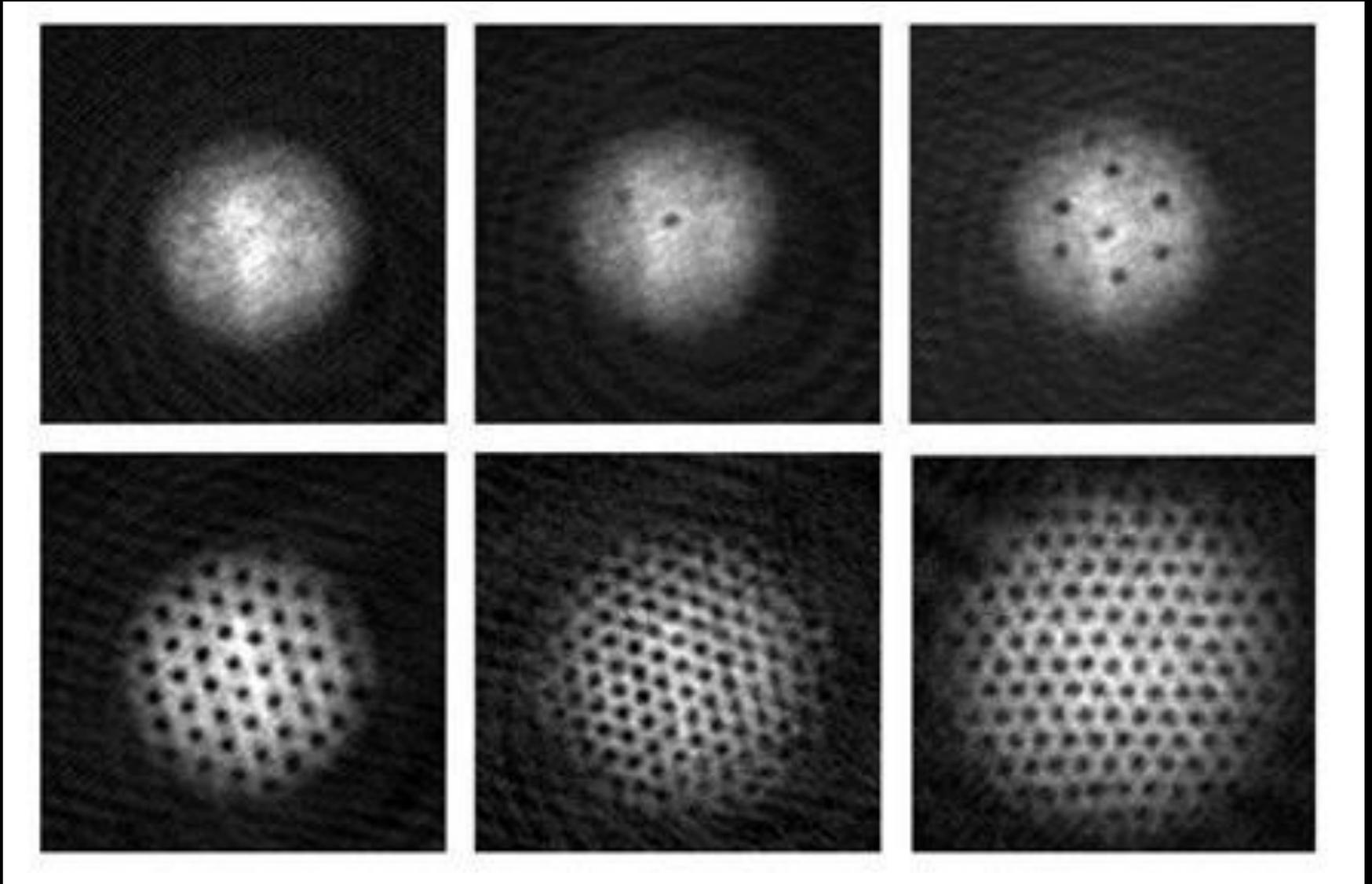
2001 Nobelpreis für den experimentellen Nachweis eines Bose-Einstein-Kondensats



Laser-Kühlung

(nK – Bereich)

Quantenwirbel in rotierenden suprafluiden Flüssigkeiten



Neutronen-Suprafluidität in Neutronensternen

Im Übergangsbereich zwischen innerer Kruste und Mantel geht die Materie in eine **Neutronenflüssigkeit** über, die außerdem noch Elektronen und zu einem geringen Prozentsatz Protonen enthält. Alle diese Teilchen befinden sich bei einem bestimmten Mischungsverhältnis (ca. 9:1 für n:p) im chemischen Gleichgewicht.

- Unterschreitet die Manteltemperatur ungefähr 10^9 K (dieser Wert ist noch sehr unsicher), dann bekommt die Neutronenflüssigkeit suprafluide und bei sehr hohem Druck die eingelagerten Protonen supraleitfähige Eigenschaften.



Arkadi Beinussowitsch Migdal (1911-1991)

Phasenübergang II - Art

Neutronen sind Fermionen und bilden deshalb ein Fermigas. Fällt die Temperatur jedoch bei nahezu Kerndichte unter einen kritischen Wert, dann beginnen die Kernkräfte zwischen den Neutronen zu wirken, wobei sich Cooper-Paare mit parallelen bzw. antiparallelen Spin ausbilden, die sich quantenmechanisch wie Bosonen verhalten.

Die thermodynamischen Eigenschaften des Neutronen- und Protonen-Superfluids haben natürlich Auswirkungen auf die **Abkühlungsgeschichte von Neutronensternen**. So führt die Bildung von Cooper-Paaren zur Emission von Neutrinos und Antineutrinos gemäß



wodurch thermische Energie in den Weltraum abgeführt wird. Dieser Prozess ist zu erwarten, sobald die Temperatur die kritische Temperatur T_c unterschreitet.

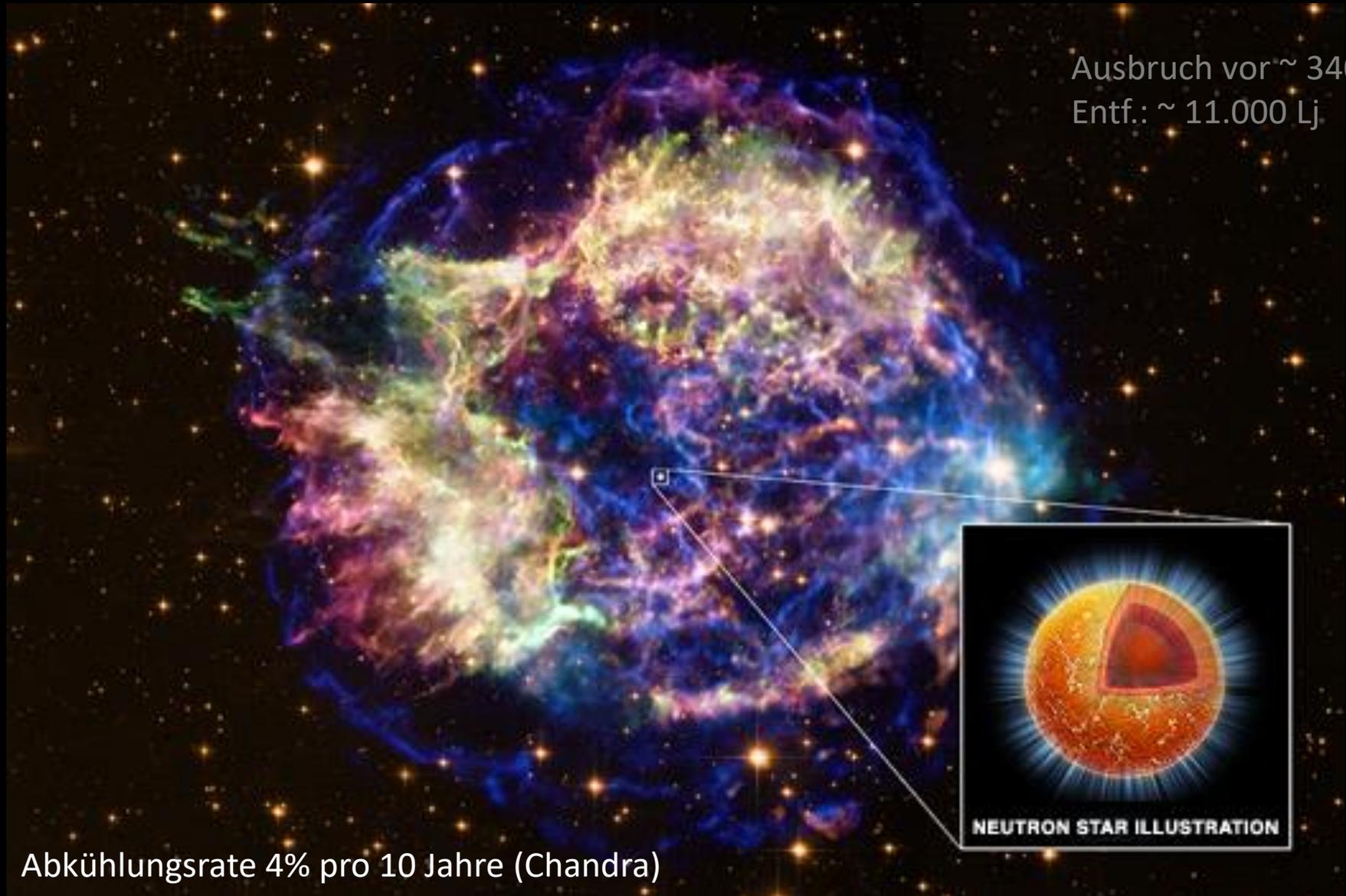
Er verstärkt eine zeitlang den Neutrinofluss eines Neutronensterns, während das Superfluid selbst wiederum andere Neutrino-freisetzende Prozesse eher hemmt.



Neutrinoemission führt zu einer besonders schnellen und starken Abkühlungsphase mit einer Zeitskala von ~ 100 Jahren, sobald die Manteltemperatur die kritische Temperatur für den Phasenübergang erreicht hat.

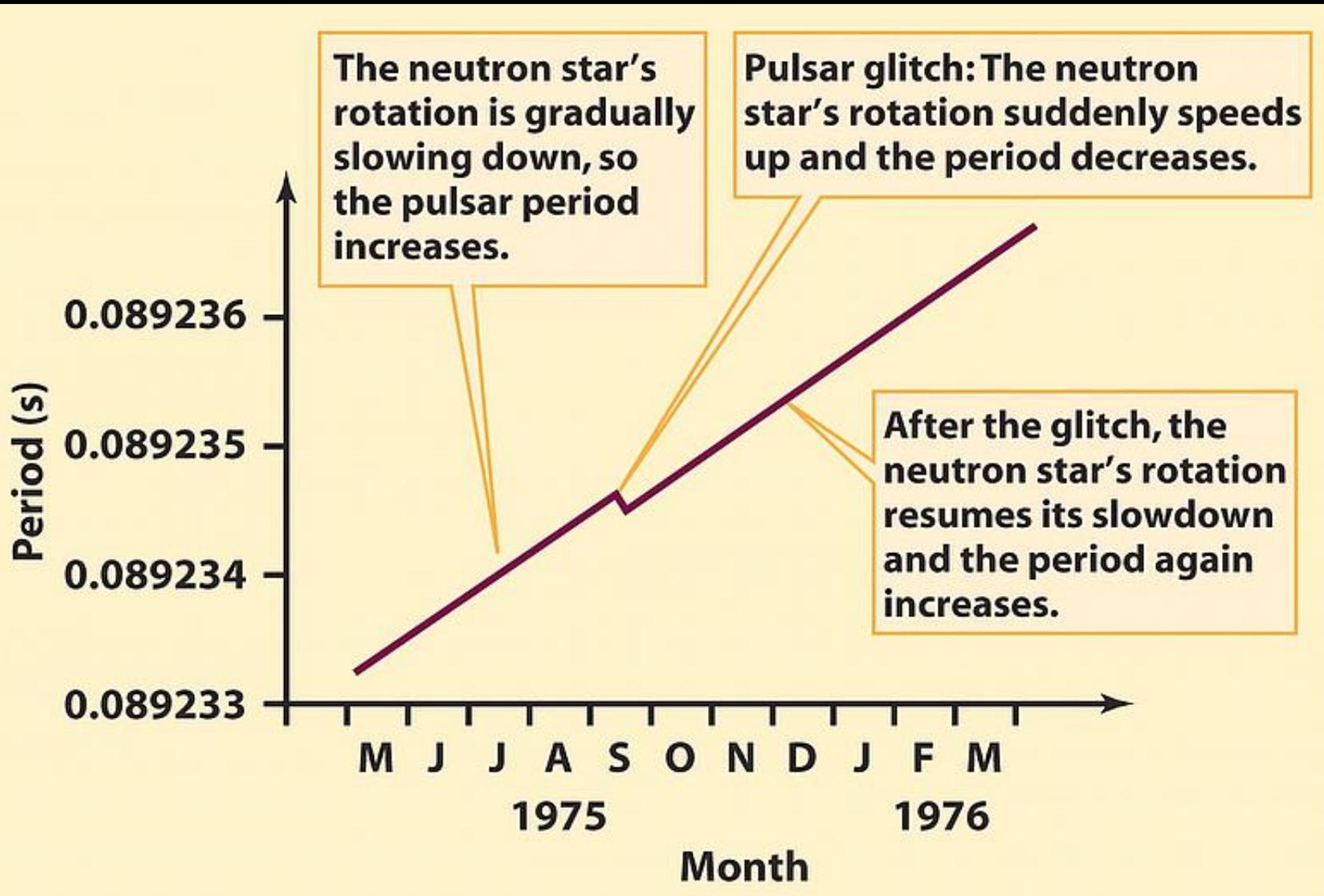
Beispiel: Neutronenstern im Zentrum des Supernova-Überrestes Cassiopeia A

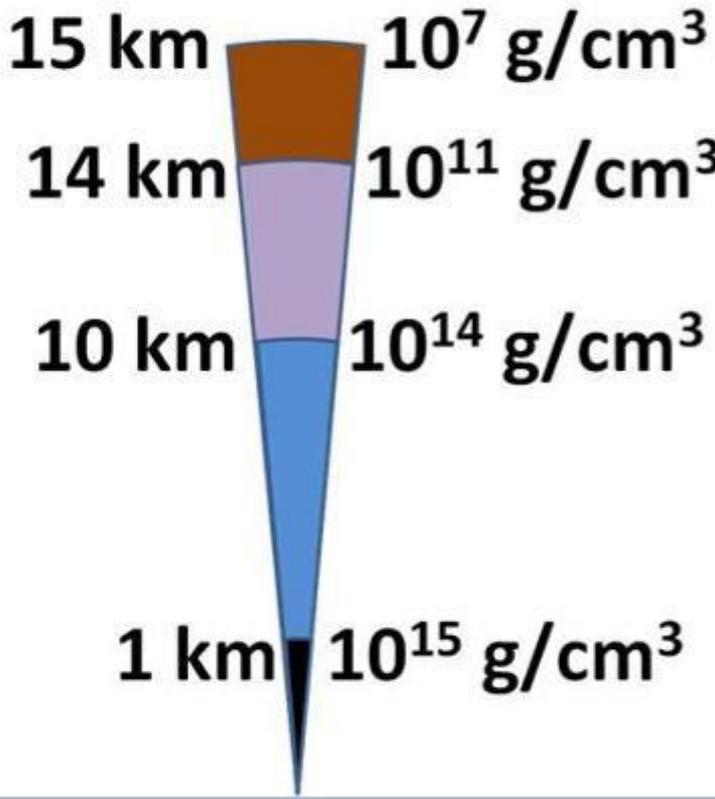
Ausbruch vor ~ 340 a
Entf.: ~ 11.000 Lj



Abkühlungsrate 4% pro 10 Jahre (Chandra)

Neutronensternbeben – „Glitches“

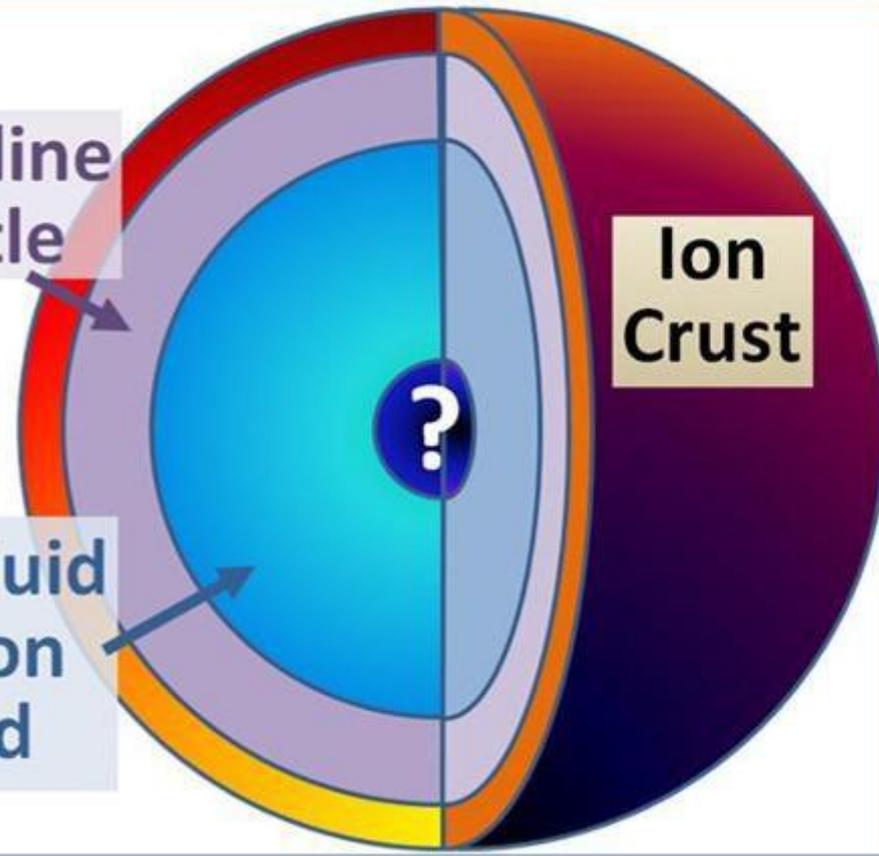




Crystalline
Mantle

Superfluid
Neutron
Liquid

Ion
Crust



Durch die schnelle Rotation entstehen im suprafluiden Inneren „Quantenwirbel“, deren Vortices aus normaler Neutronenflüssigkeit bestehen, Sie ragen in die starre Kruste hinein und koppeln damit die Rotation des Kernbereiches an die der Kruste

→ Drehmoment → Spannungen → Neutronensternbeben

Die Veränderung des Trägheitsmomentes führt zu einer Beschleunigung der Rotationsgeschwindigkeit, so wie sie auch beobachtet wird.