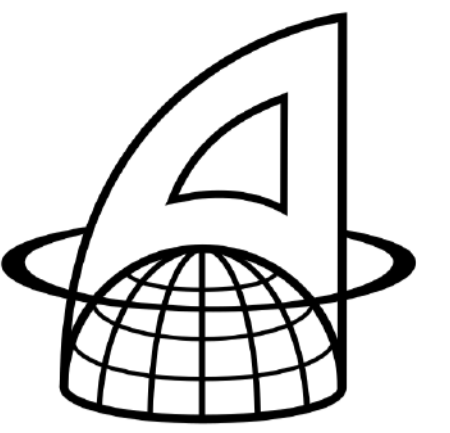


Wiry kwantowe w gwiazdach neutronowych

Maja Fijałkowska, Zofia Lamęcka, Maria Ryshkevich

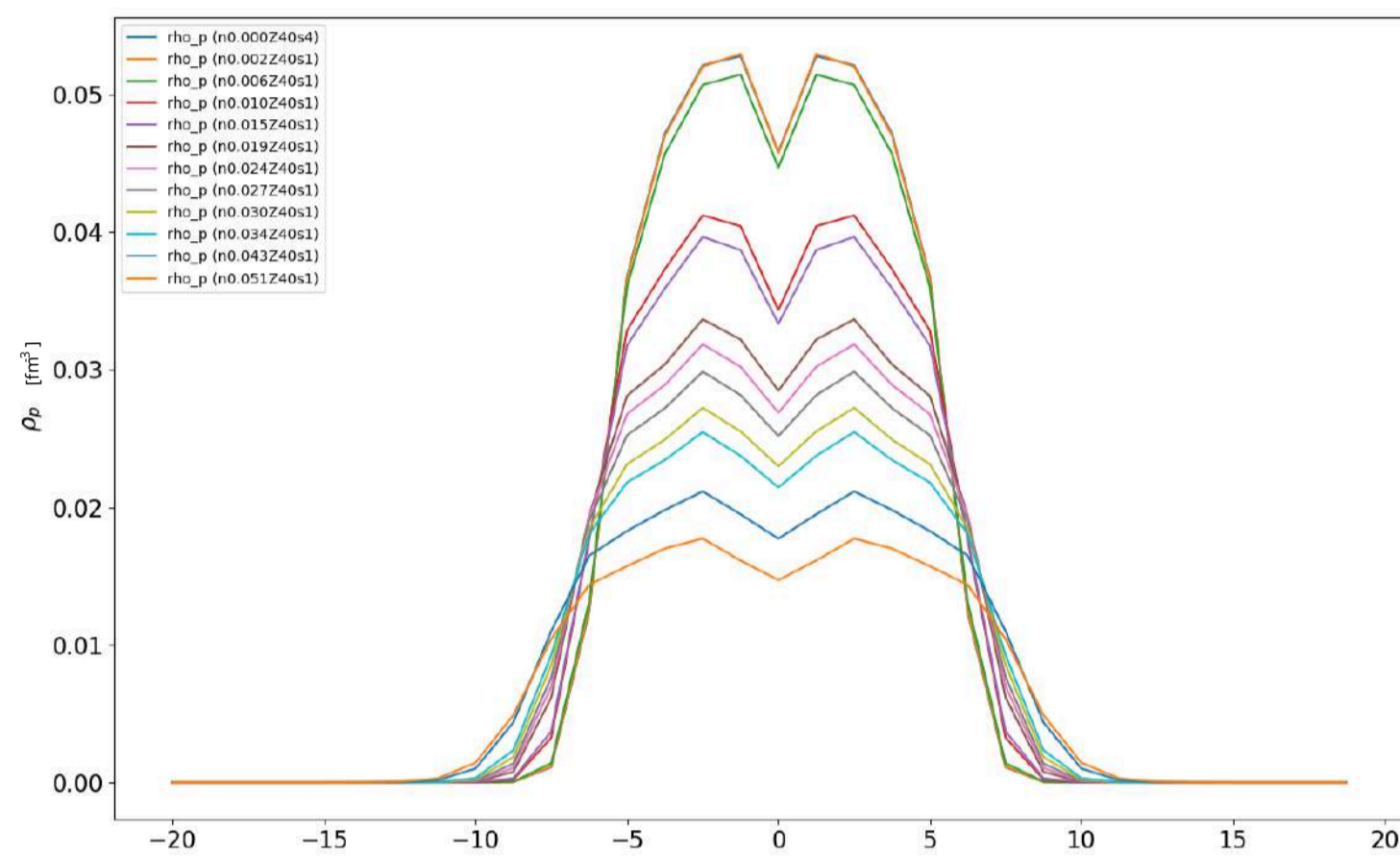
Pod opieką dr. Daniela Pęcaka



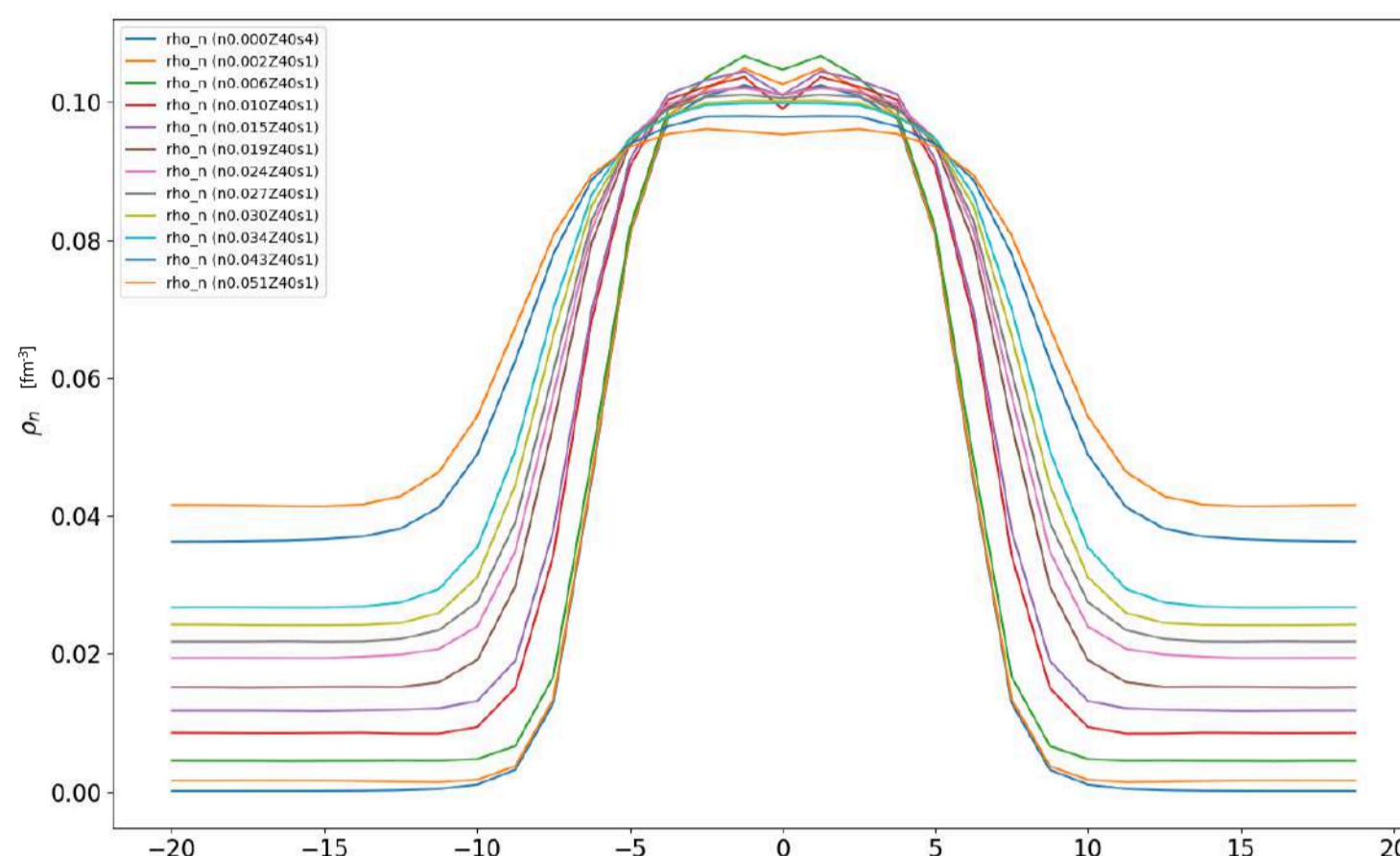
Gdy schłodzimy hel do bardzo niskich temperatur, dochodzi do przejścia fazowego, w wyniku którego otrzymamy nowy stan materii: stan nadciekły. Substancja nadciekła ma tę właściwość, że może poruszać się bez oporów ruchu. Podobne zjawisko występuje we wnętrzu gwiazd neutronowych i jest kluczowe do ich opisu. W temperaturach rzędu 10^9 K i ogromnych gęstościach musimy zastosować opis kwantowy. Jedną z wielkości, która jest skwantowana, jest moment pędu objawiający się w postaci wiru kwantowego.

Gwiazdy neutronowe

Gwiazda neutronowa to pozostałość po wybuchu supernowej. Przez zapadnięcie grawitacyjne materia w niej jest niezwykle gęsta, a im bliżej centrum gwiazdy się znajdujemy, tym ta gęstość jest większa, a ciśnienie sprawia, że protony łączą się z elektronami w neutrony. W modelu kropłowym jądro atomowe można opisać jako kroplę cieczy. Zmienia ona kształt, gdy dookoła jest dużo neutronów, ponieważ napięcie powierzchniowe zmniejsza swoją wartość. Oznacza to, że gęstość protonów w danym jądrze maleje, a samo jądro zwiększa swoje rozmiary.



Wykres gęstości ρ protonów w różnych warstwach skorupy.
Gęstość 0.05 fm^{-3} odpowiada gęstości $8.375 \cdot 10^{12} \text{ g/cm}^3$.

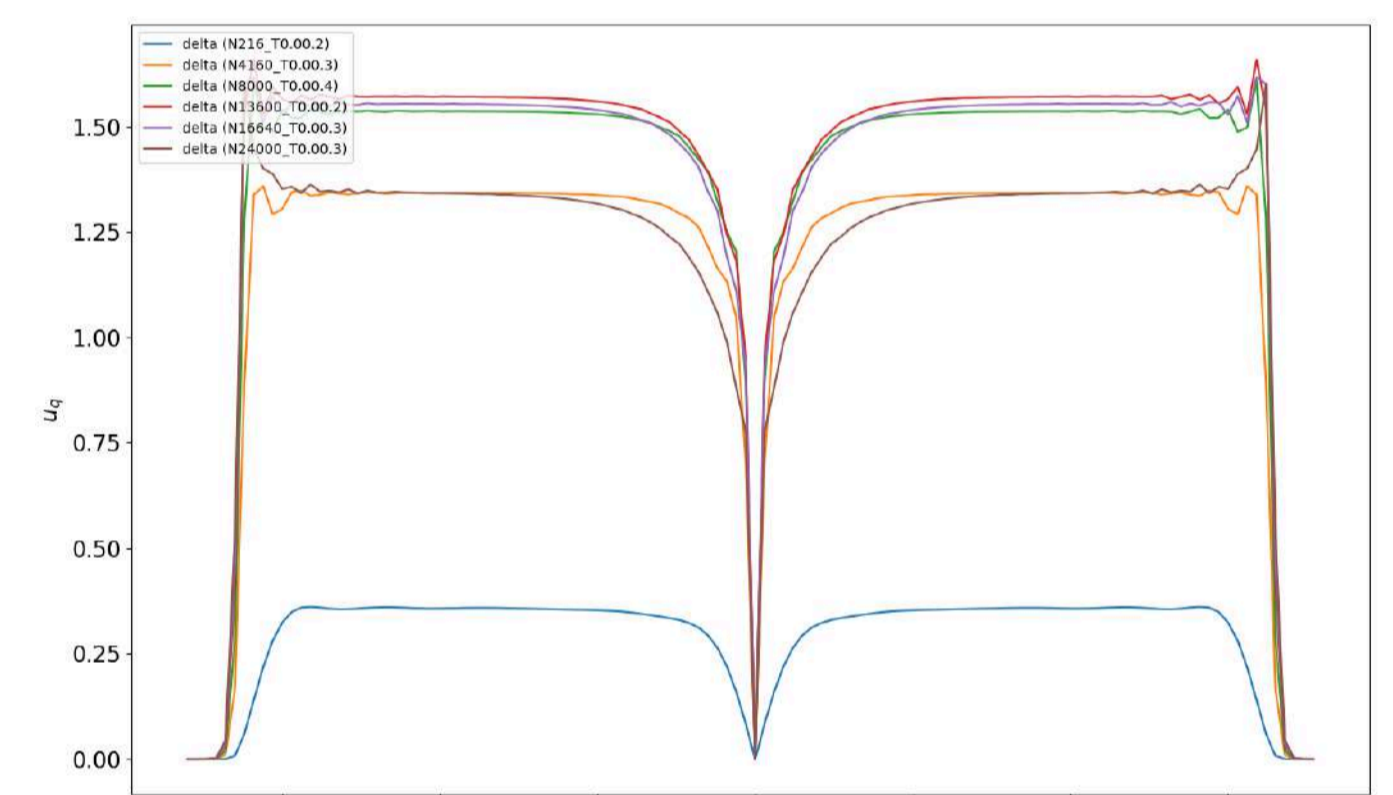


Wykres gęstości ρ neutronów w różnych warstwach skorupy.
Gęstość 0.01 fm^{-3} odpowiada gęstości $1.675 \cdot 10^{13} \text{ g/cm}^3$.

Gęstość 0.02 fm^{-3} , jaka występuje wewnątrz gwiazdy neutronowej, jest taka sama jak Pałac Kultury i Nauki ściśnięty do rozmiaru mrówki!

Pole parowania wewnątrz gwiazdy

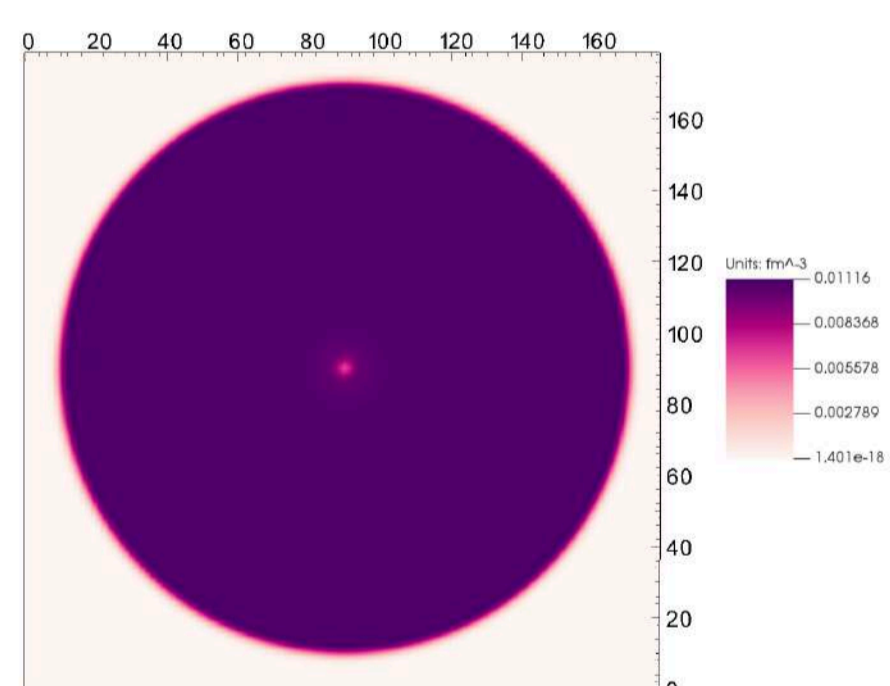
Pole parowania to parametr porządku opisujący stan nadciekłej materii, w którym ciecz przepływa bez oporu. Parametr porządku pozwala rozróżnić fazę normalną od nadciekłej. Gdy pole parowania wynosi zero, nadciekłość znika, a materia przechodzi do "zwykłego" stanu materii. Możemy to odnieść do zmiany fazy z ferromagnetycznej na paramagnetyczną, gdzie parametrem porządku jest namagnesowanie, które pokazuje uporządkowanie domen magnetycznych.



Wykres pola parowania występującego w różnych warstwach gwiazdy neutronowej.

Wiry kwantowe

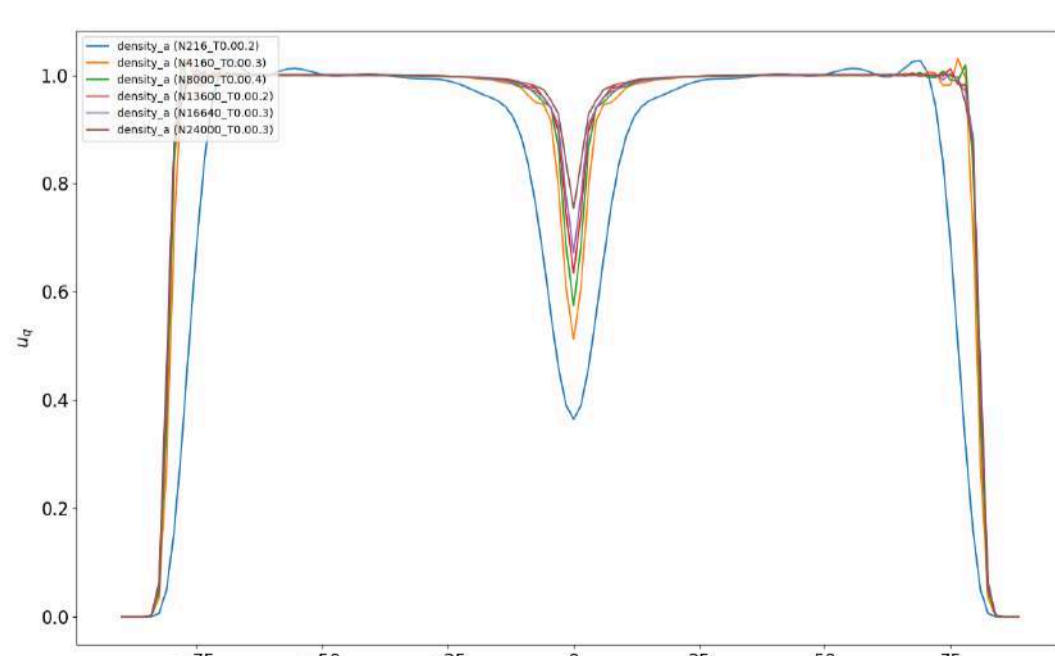
Wir to uporządkowany ruch płynu, którego pole prędkości ma pewne matematyczne własności (rotacja nie znika). Prędkość cieczy powinna być odwrotnie proporcjonalna do odległości od środka wiru. Wir kwantowy ma wiele cech klasycznego wiru np. takiego w kubku herbaty mieszanej łyżeczką.



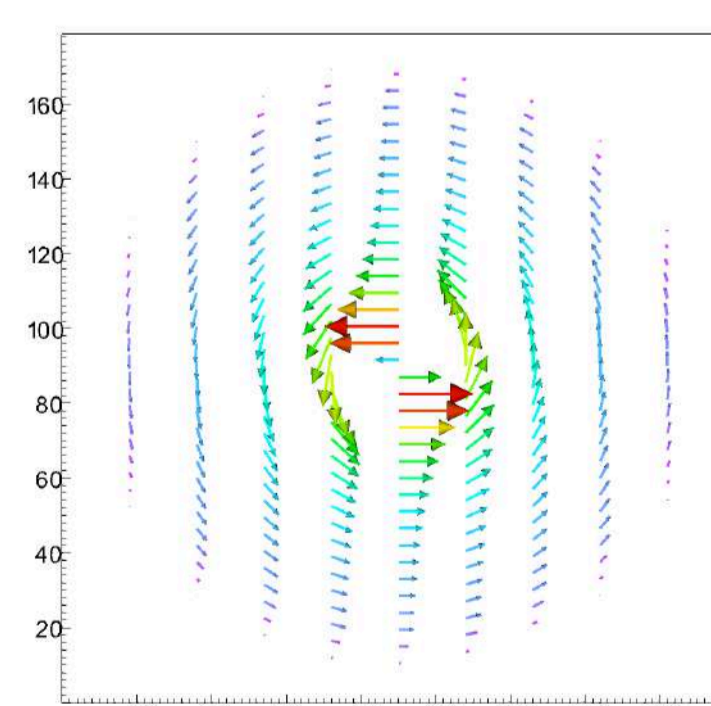
Przykład rozkładu gęstości w wirze.

Pole prędkości wiru

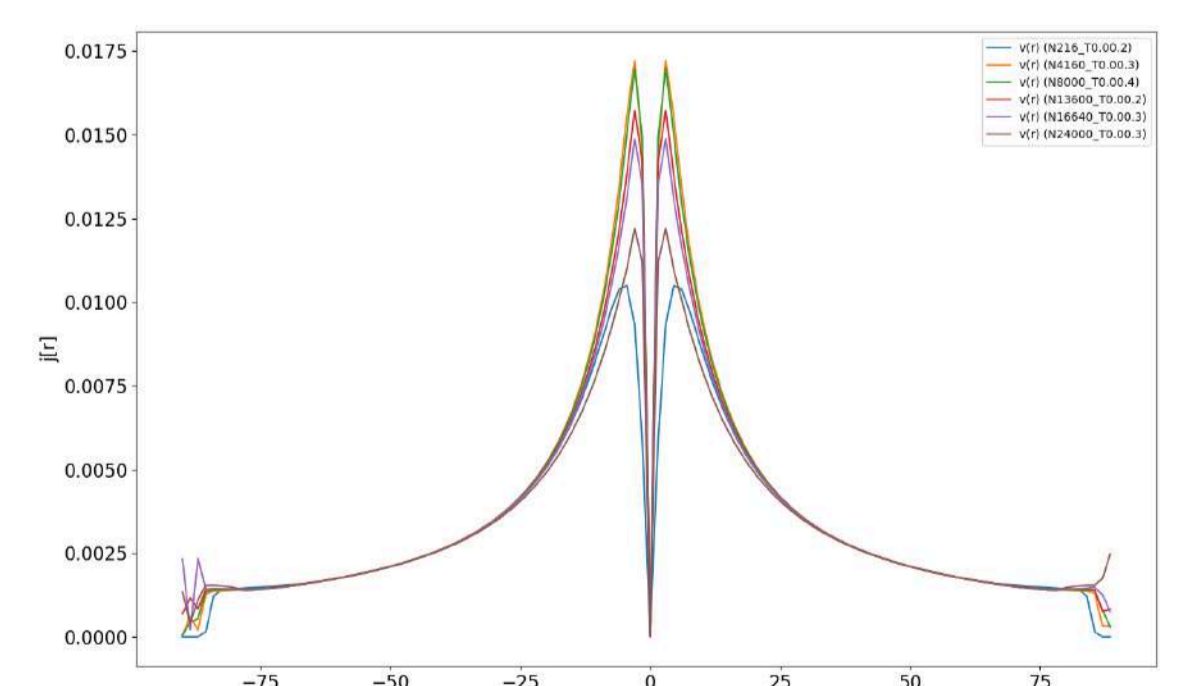
W pobliżu środka wiru prędkość w wirze jest niska lub nawet zerowa. W środku pole parowania jest zerowe czyli materia jest w stanie normalnym, a nie nadciekłym. Ruch wtedy powodowałby straty, a więc nie występuje i prędkość wynosi zero. W miarę oddalania się od środka wiru prędkości wzrastają, osiągając maksymalne wartości a następnie maleją.



Zależność gęstości wiru od jego odległości od środka wiru wyrażona w femtometrach.



Prąd związany z przepływem nadcieczy. Blisko środka wiru ma największą wartość, maleje ona wraz z odległością od środka.



Wykres pola prędkości $v(r)$ w jednostkach prędkości światła w wirze.

Podsumowanie

Przeanalizowaliśmy mikroskopowy kawałek materii jądrowej znajdujący się kilkaset metrów pod powierzchnią gwiazdy neutronowej, w którym układ w stanie nadciekłym zawiera pojedynczy wir kwantowy. Nasza analiza wykazała, że gęstość w środku wiru jest mniejsza, lecz zawsze $\rho > 0$. Również wykazaliśmy, że pole parowania w środku wiru spada do 0. Związku z tym materia w środku wiru nie jest nadciekła. Wykazaliśmy, że maksymalna prędkość przepływu cieczy występuje w okolicy 5 fm od centrum.

Źródło: Dane użyte do analizy zostały wygenerowane na superkomputerze Piz Daint znajdującym się w Szwajcarii.