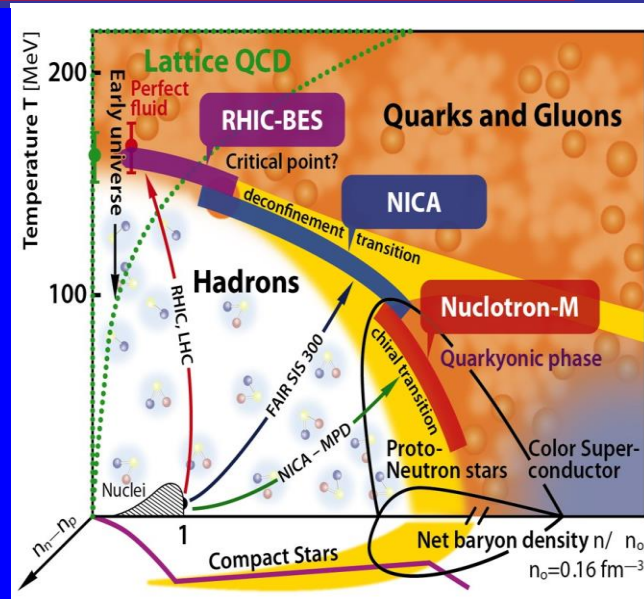
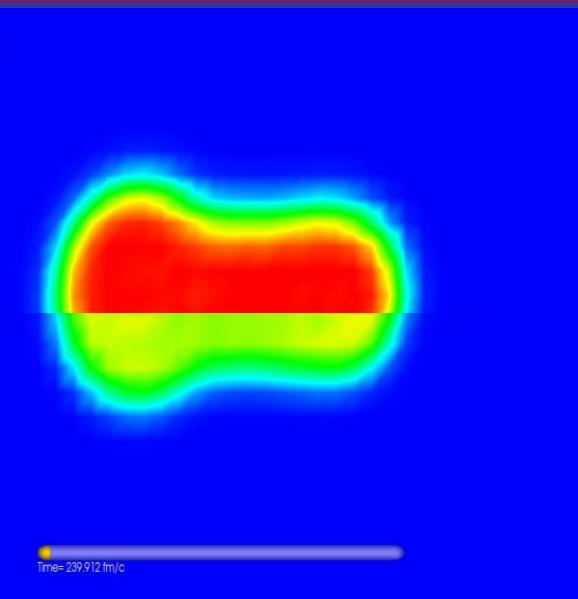
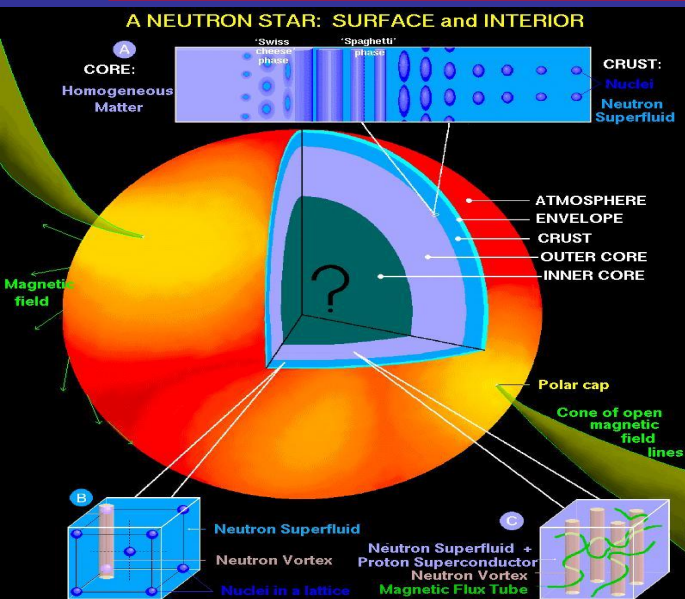
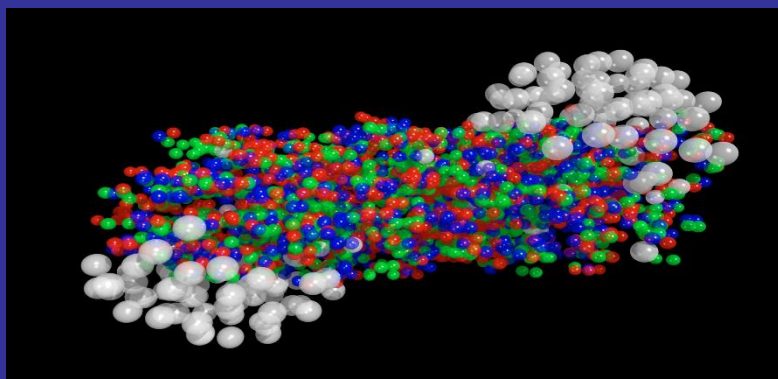


Rozbijać czy łączyć - fizyka jądrowa w XXI wieku

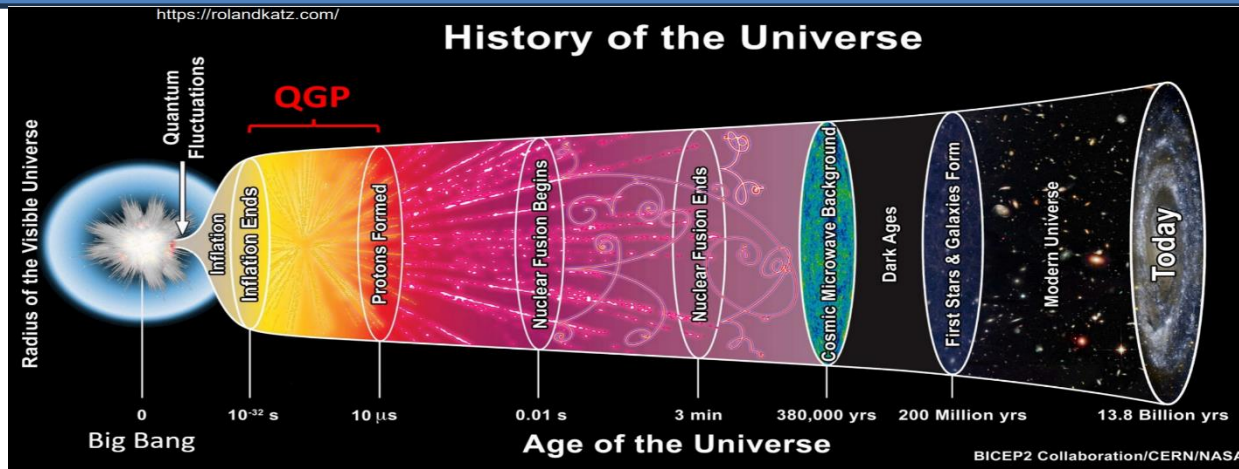


Piotr Magierski
(Politechnika Warszawska)



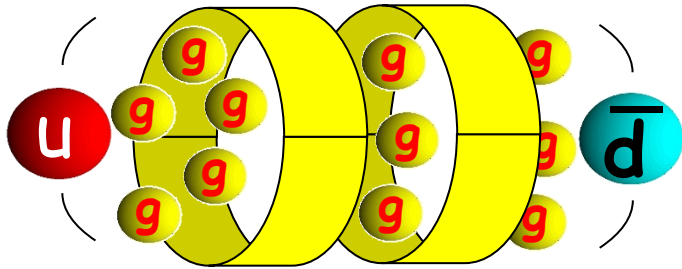
Dlaczego zajmujemy się fizyką jądrową?

Aby wyjaśnić pochodzenie, ewolucję i strukturę materii barionowej Wszechświata - materii, z której zbudowane są gwiazdy, planety i my sami.



Skale energii w fizyce jądrowej

Kwarki i gluony



Skala QCD

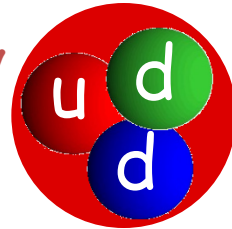


1000 MeV

kwarki

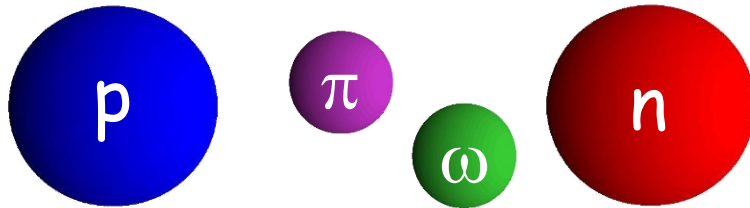


pion π^+
 ~ 140 MeV



neutron

Bariony i mezony

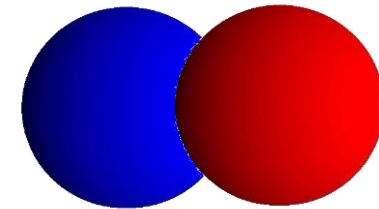


Skala: masa pionu

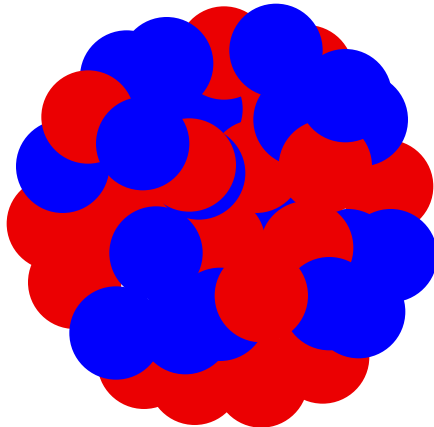


100 MeV

Protony i neutrony



Jądro atomowe

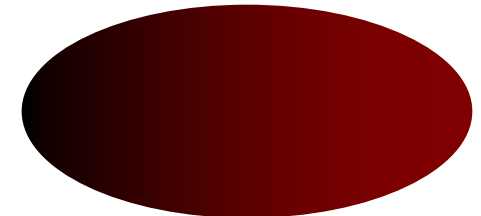


Skala energii wiązania
nukleonu w jądrze



10 MeV

Współrzędne kolektywne
opisujące ciecź jądrową



Tablica jąder atomowych

Liczba protonów

Jądra znane

Jądra stabilne

114-126?

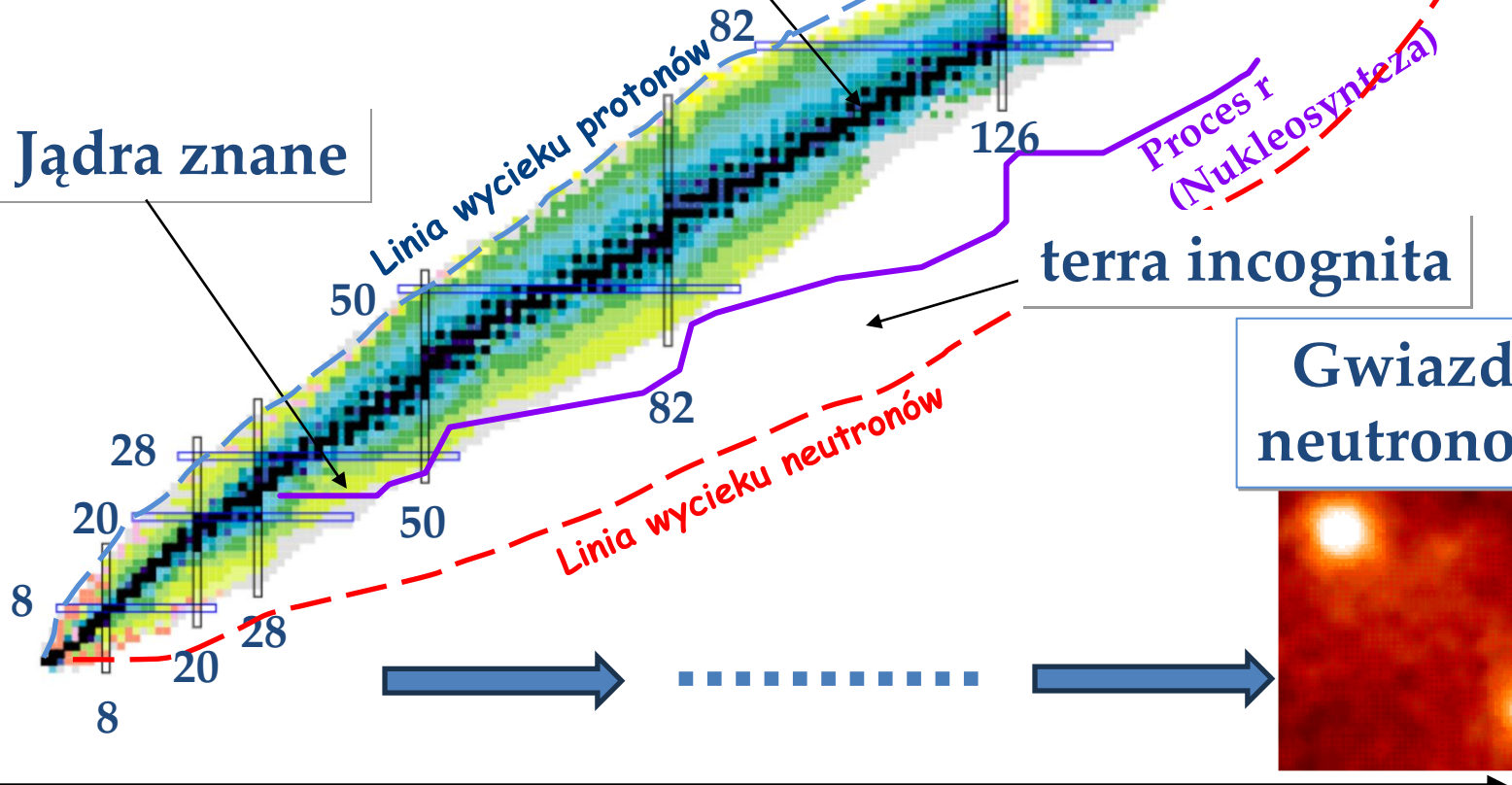
Jądra superciężkie

184?

Proces r
(Nukleosynteza)

terra incognita

Gwiazdy neutronowe



Liczba neutronów

Pierwsze próby konstrukcji teorii oddziaływań jądrowych: teoria Yukawy



Potencjał Yukawy (1930)

$$V(r) = g \frac{\hbar c}{r} \exp(-r/r_0) .$$

$$r_0 = \frac{\hbar}{m_\pi c} \approx 1.4 \text{ fm}$$

$$m_\pi \approx 140 \text{ MeV} \quad \text{Masa mezonu } \pi$$

$$g \approx 15.5 \quad \text{Stała sprzężenia w oddziaływaniu nukleon-pion}$$

Do opisu oddziaływań potrzeba więcej mezonów

Problem I: część przyciągająca oddziaływania N-N wymaga włączenia większej ilości mezonów (i nowych stałych sprzężenia): π, ρ, ω, \dots

Problem II: teoria jest nierenormalizowalna.

Przyczyna trudności:

wybrano nieodpowiednie stopnie swobody do opisu układu!

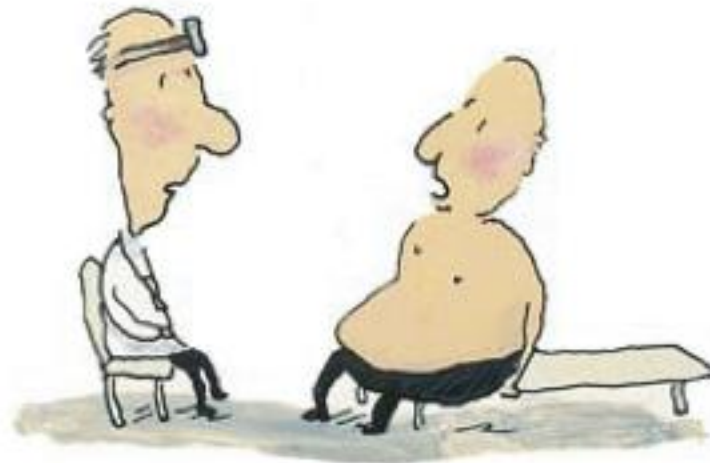
Weinberg's Laws of Progress in Theoretical Physics

From: "Asymptotic Realms of Physics" (ed. by Guth, Huang, Jaffe, MIT Press, 1983)

First Law: "The conservation of Information" (*You will get nowhere by churning equations*)

Second Law: "Do not trust arguments based on the lowest order of perturbation theory"

Third Law: "You may use any degrees of freedom you like to describe a physical system, but if you use the wrong ones, you'll be sorry!"



Patient: Doctor, doctor, it hurts when I do this!

Doctor: Then don't do that.

Hierarchia opisu układów jądrowych

Różne stopnie swobody

Konstrukcja efektywnych teorii pola (EFT) w oparciu o QCD

Konstrukcja funkcjonałów gęstości w oparciu o oddz. NN

Kwarki i gluony

Jądra lekkie

Jądra średnie i ciężkie

Chromodynamika Kwantowa (QCD) - Teoria oddziaływań silnych

Lekkie jądra - układy kilku, kilkunastu nukleonów
Efektywne oddziaływanie nukleon-nukleon

Ciężkie i średnie jądra - układy ponad 100 nukleonów
Fenomenologiczne oddziaływanie NN + Teoria funkcjonału gęstości energii



Diagram fazowy wody

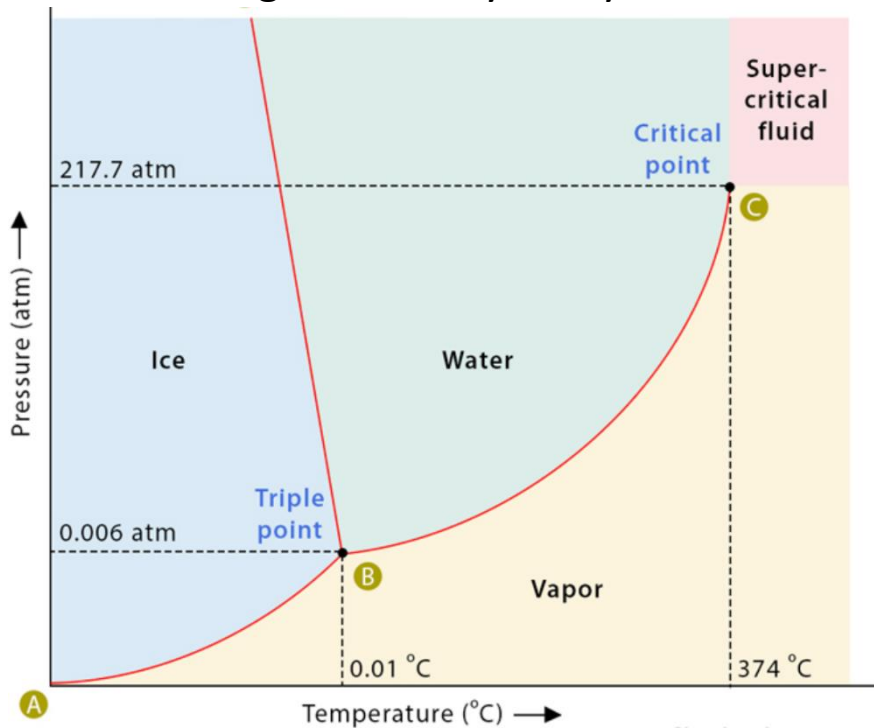
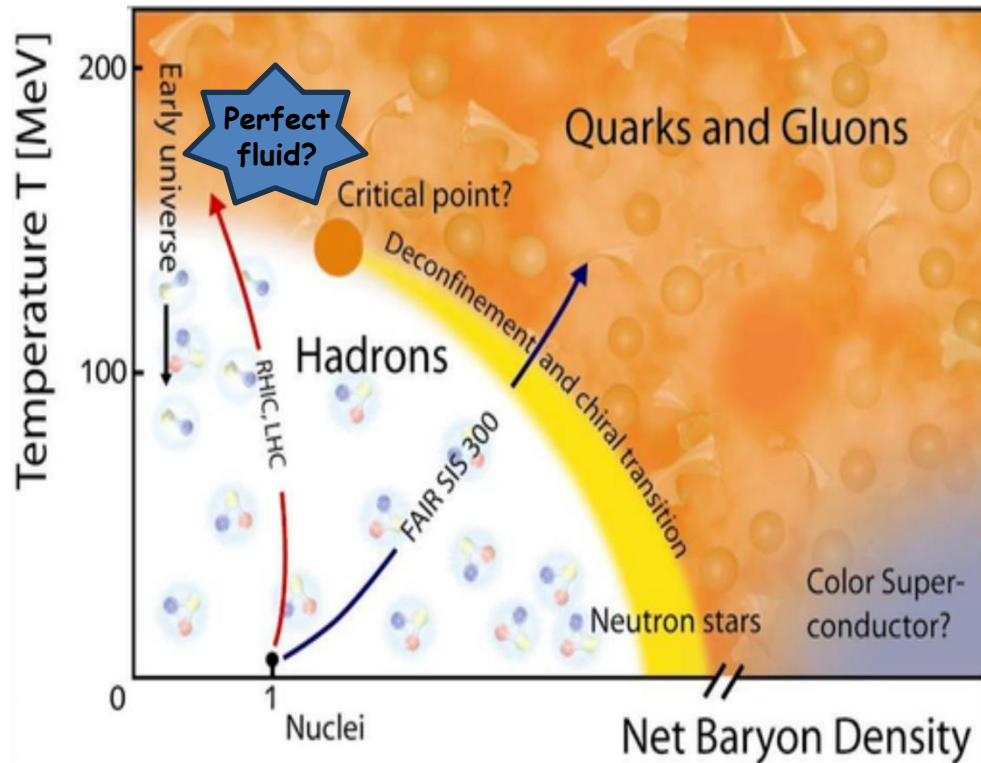


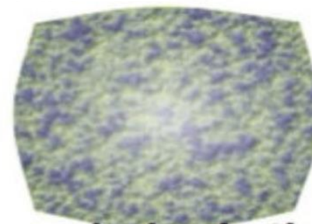
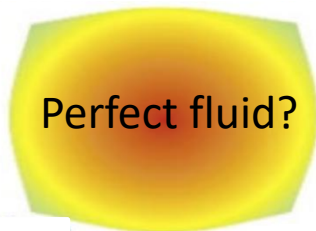
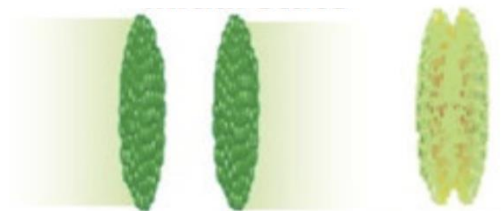
Diagram fazowy materii jądrowej



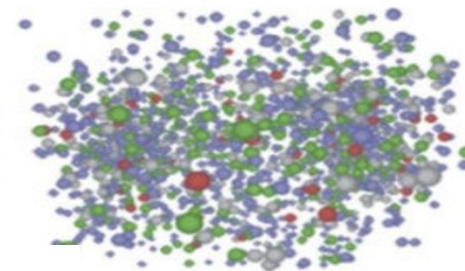
Stadia zderzeń jąder ciężkich (Au, Pb) przy ultrarelatywistycznych energiach

Zderzenie jąder ciężkich

Plazma kwarkowo-gluonowa



Hadronizacja



Gaz hadronów

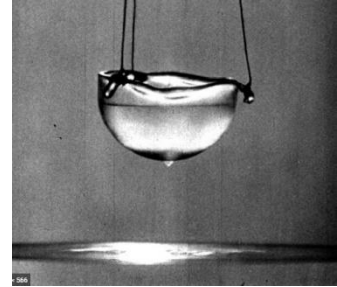
Co to jest ciecz doskonała (perfect fluid)?



Lepkość można zmniejszyć do zera w płynie nadciekłym.

Jednak wtedy entropia płynu też spada do zera.

Nadciekły hel



Przepływ wody i miodu odbywa się w różnym tempie z uwagi na różną lepkość

Stosunek lepkości do gęstości entropii nie może być dowolnie mały!

$$\frac{\eta}{S} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

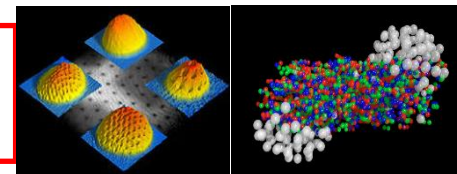
Nierówność jest spełniona dla wszystkich znanych płynów w przyrodzie!

Kovtun, Son, Starinets, (2005)

Czy istnieje ciecz doskonała: $\frac{\eta}{S} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$?

Ciecz złożona z bardzo silnie oddziałujących cząstek = bardzo krótka droga swobodna

**Kandydaci: Gaz atomów fermionowych w reżimie unitarnym,
Plazma kwarkowo-gluonowa**



Temperatury krytyczne dla nadprzewodników

- ✓ Ultrazimne gazy atomowe:
- ✓ Ciecz ^3He :
- ✓ Metale i stopy:
- ✓ Jądra atomowe i gwiazdy neutronowe:
- **Nadprzewodnictwo materii kwarkowej (nadprzewodnictwo kolorowe) :**

$$T_c \approx 10^{-12} - 10^{-9} \text{ eV}$$

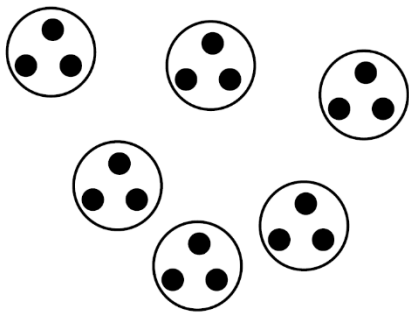
$$T_c \approx 10^{-7} \text{ eV}$$

$$T_c \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ eV}$$

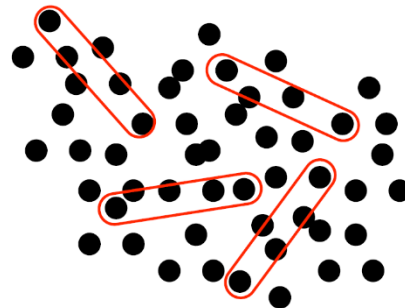
$$T_c \approx 10^5 - 10^6 \text{ eV}$$

$$T_c \approx 10^7 - 10^8 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ eV} \approx 10^4 \text{ K})$$



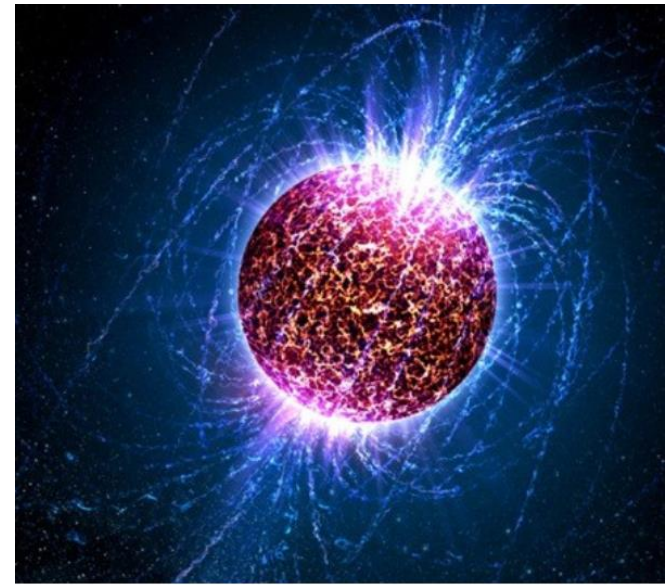
Ciecz neutronowa



Ciecz kwarkowa

Kondensat kwarkowych par Coopera

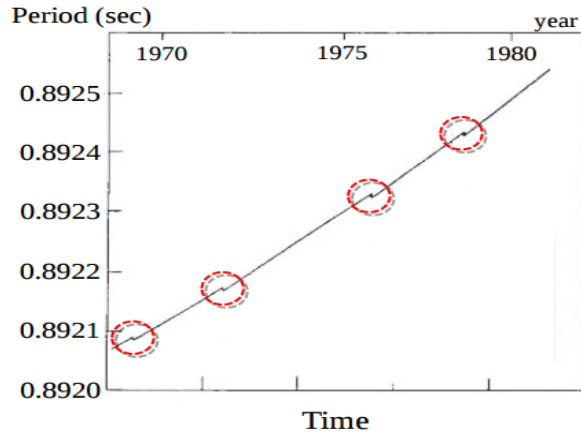
Czy kolorowe nadprzewodniki istnieją w gwiazdach zwartych (compact stars)?



Gwiazda neutronowa – gigantyczny nadprzewodnik

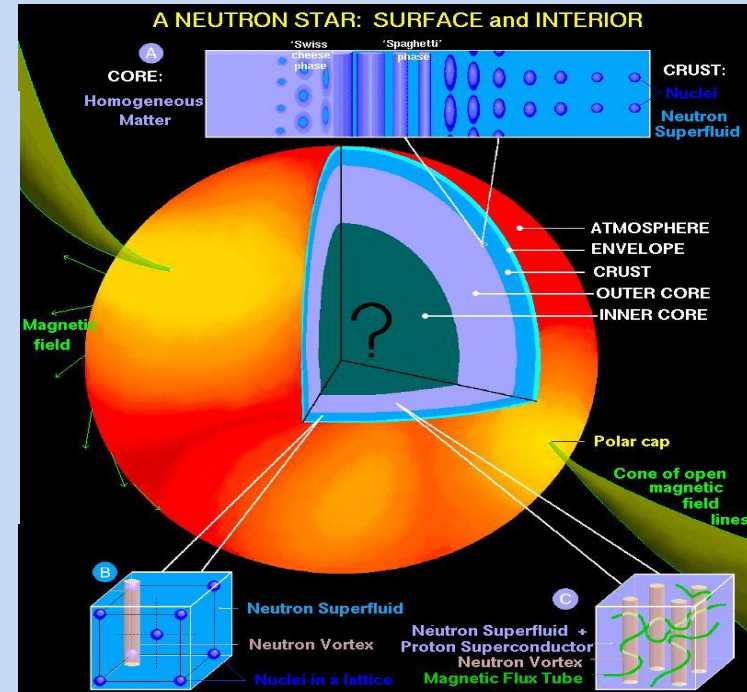
Glitch: Nagłe przyspieszenie rotacji gwiazdy

Glitches in the Vela pulsar



V.B. Bhatia, A Textbook of Astronomy and Astrophysics with Elements of Cosmology, Alpha Science, 2001.

Nagłe przyspieszenia rotacji gwiazdy neutronowej – zmiana struktury gwiazdy wywołana przemieszczeniem wielkiej ilości wirów kwantowych



H. Tamura, JPS Conf. Proc., 011003 (2014)

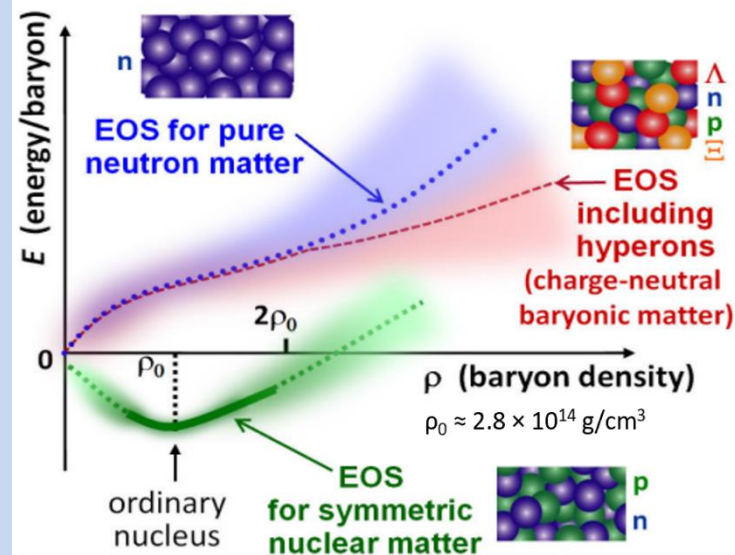
Stosunek masa/promień, rozkład gęstości we wnętrzu i szybkość chłodzenia gwiazdy zależy od równania stanu materii jądrowej.

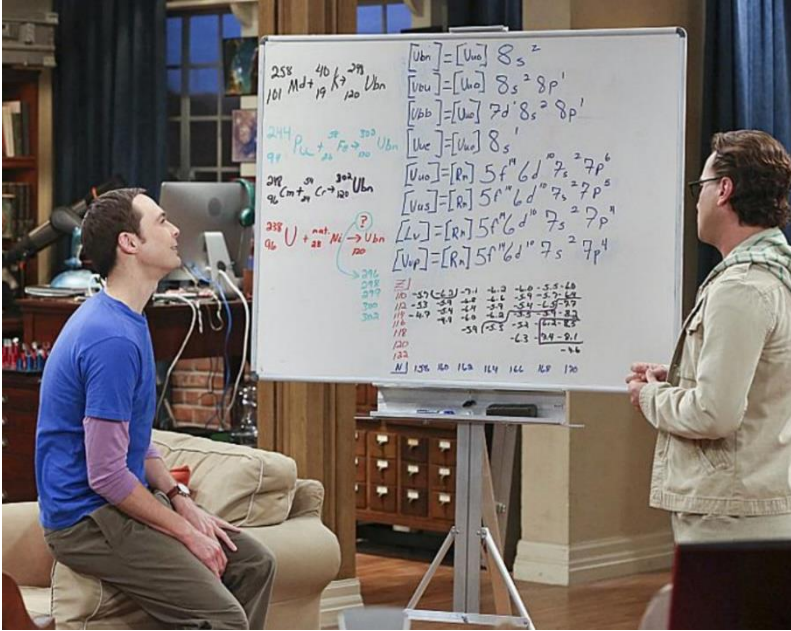
Czy wewnątrz gwiazdy są tylko neutrony, protony i elektrony?

Czy obecne są hiperony/hiperjadra -> modyfikacja równania stanu.

Czy wewnątrz gwiazdy istnieje nadprzewodnik kolorowy?

Czy wewnątrz gwiazdy neutronowej istnieje stan turbulencji kwantowej?





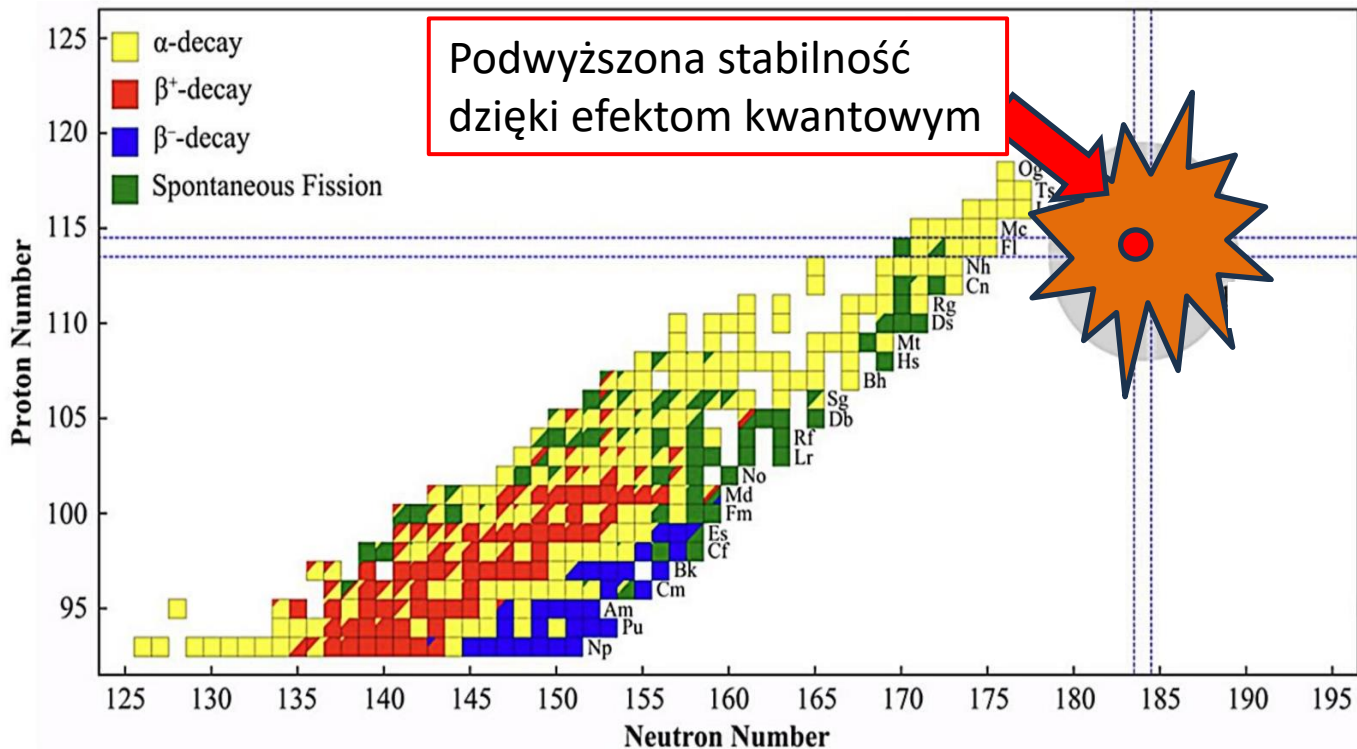
Poszukiwanie wyspy (podwyższonej) stabilności

Trudności: przekrój czynny na produkcję szybko maleje przy zbliżaniu do wyspy.

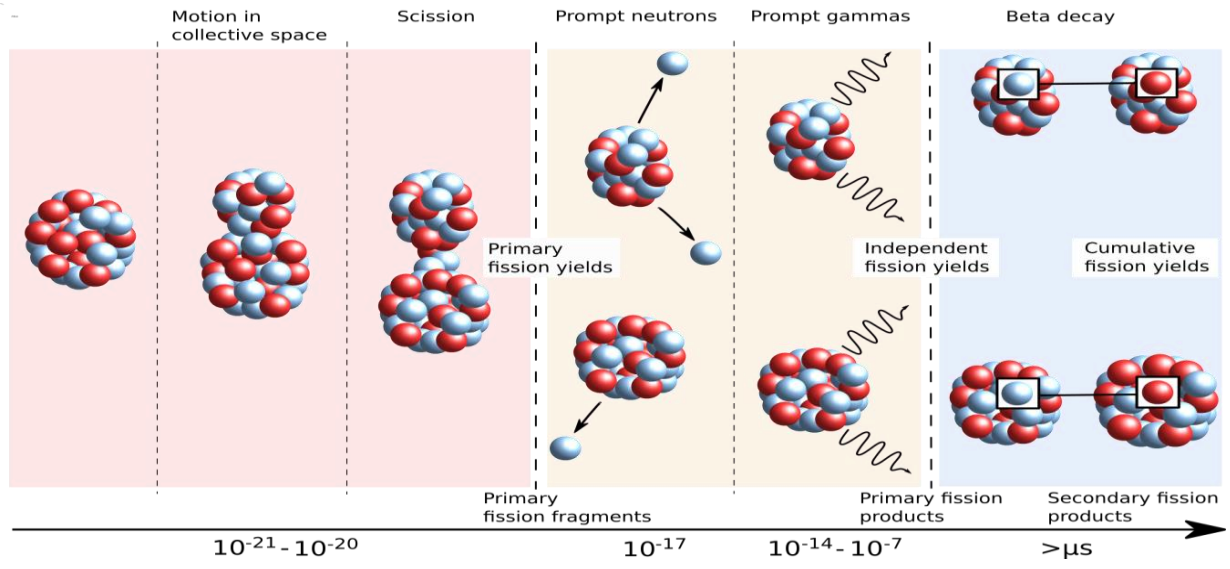
Jaki jest najlepszy układ pocisk-tarcza?

Jak zminimalizować niepożądane efekty, utrudniające syntezę np. kwaziroszczerzenie?

- Laboratoria:**
- Berkeley (USA)
 - Dubna (Rosja)
 - Darmstadt (Niemcy)
 - Tokyo (Japonia)
 - ...



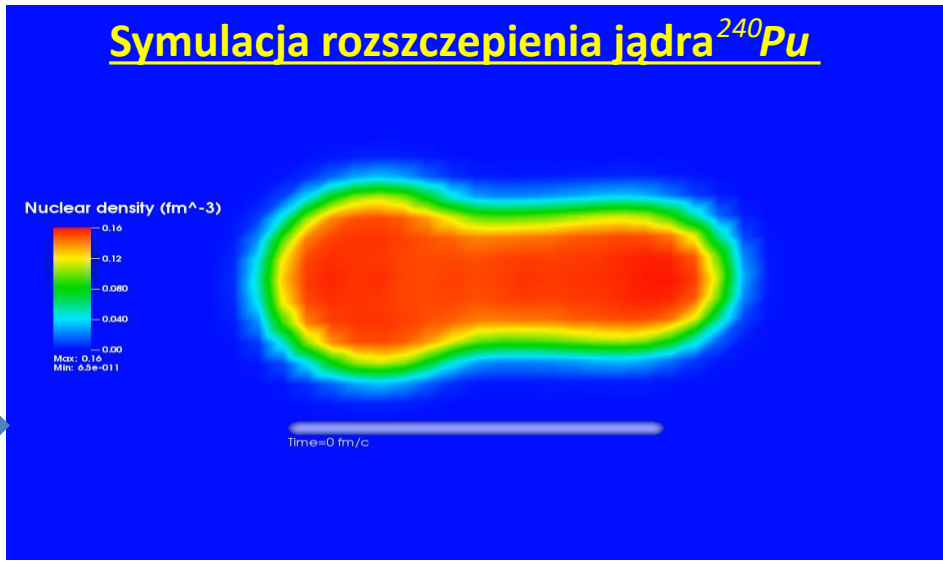
Rozszczepienie jądra atomowego: Nierównowagowy proces z udziałem kilkuset silnie oddziałujących nukleonów



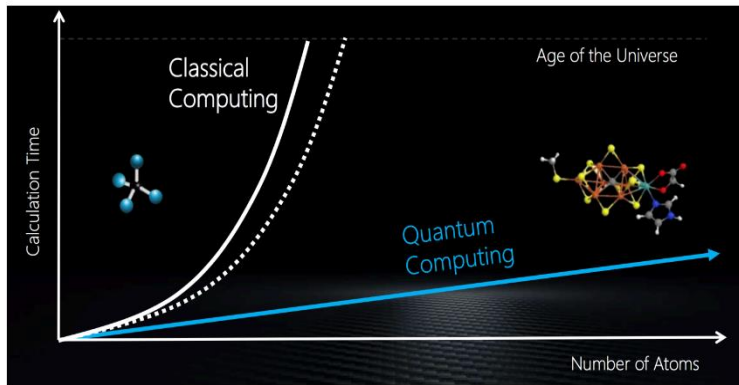
From LLNL-PRES-758023

Charakterystyczne skale czasowe związane z procesem rozszczepienia (przy energiach $< 10\text{MeV}$):

- Stan podst. - pkt. siodłowy (saddle): 1 000 000 zs
 - Pkt. siodłowy - pkt. podziału (scission): 10-100 zs
 - Przyspieszenie fragmentów do 90% ich końcowej prędkości: 10 zs
 - Emisja neutronów: 1 000 zs
- $1\text{zs} = 10^{-21}\text{s}$



Fizyka jądrowa i obliczenia kwantowe



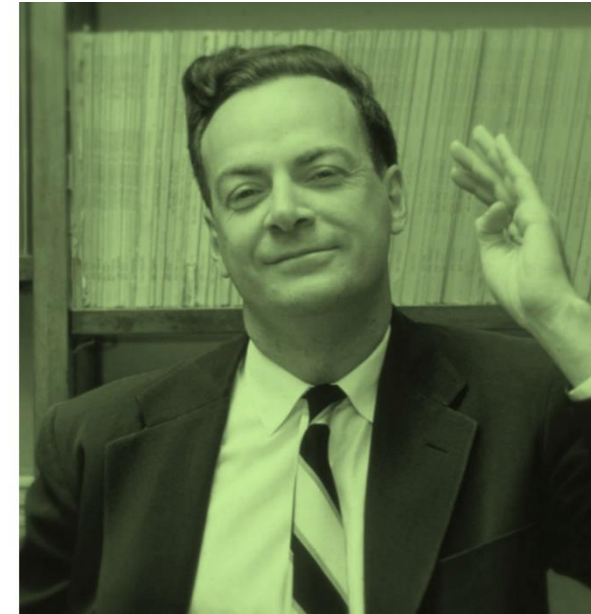
Schematyczne skalowanie wydajności obliczeniowej **klasycznego i kwantowego komputera** w funkcji ilości symulowanych cząstek.

So what about using quantum computers to study quantum systems?

"Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy"

– Richard Feynman

A simple, yet powerful idea.



„Szybki postęp w obliczeniach kwantowych umożliwia dokonanie selekcji kluczowych zagadnień w badaniach fizyki jądrowej, dla których symulacje na komputerze kwantowym wygenerowałyby wyniki znacznie wykraczające poza możliwości konwencjonalnych obliczeń.”

Najważniejsze zagadnienia:

Chromodynamika kwantowa na sieci: **dynamika i nierównowagowe własności nukleonów.**

Jądrowe zagadnienie wielu ciał: **reakcje jądrowe.**

Kierownicy Zakładu (od roku 1999):



Prof. dr hab. Stefan Cwiok
1999 – 2003+
Fizyka jąder superciężkich



Prof. dr hab. Jan Pluta
2003 – 2015
Fizyka zderzeń ciężkich jonów

Liderzy grup badawczych



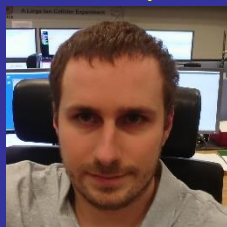
Prof. dr hab. Katarzyna Grebieszko



Dr hab. Daniel Kikoła, prof. PW



Prof. dr hab. Adam Kisiel



Dr hab. Łukasz Graczykowski, prof. PW

Zakład Fizyki Jądrowej Wydziału Fizyki PW



Prof. dr hab. Hanna Zbrozczyk



Dr hab. Gabriel Wlazłowski, prof. PW



Dr hab. Małgorzata Janik, prof. PW



Dr hab. Georgy Kornakov, prof. PW

Prace badawcze:

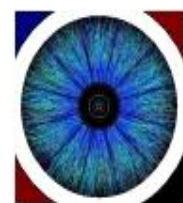
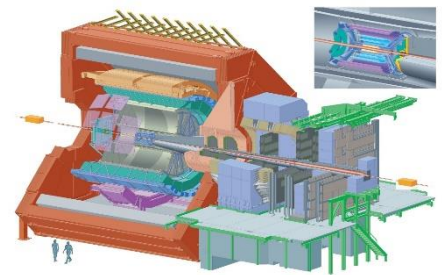
Zderzenia ciężkich jonów: *Eksperymenty: NA61/SHINE, ALICE, STAR, HADES, CBM, AEGIS*

Badania aplikacyjne: *Dozymetria i ochrona radiologiczna, fizyka jądrowa w medycynie i przemyśle*

Teoria jądra: *Reakcje jądrowe, modelowanie gwiazd neutronowych, kwantowe gazy atomowe*

A Large Ion Collider Experiment (CERN)

Badanie plazmy kwarkowo-gluonowej przy b. wysokich energiach.
Wykorzystanie detektora FIT



The STAR experiment

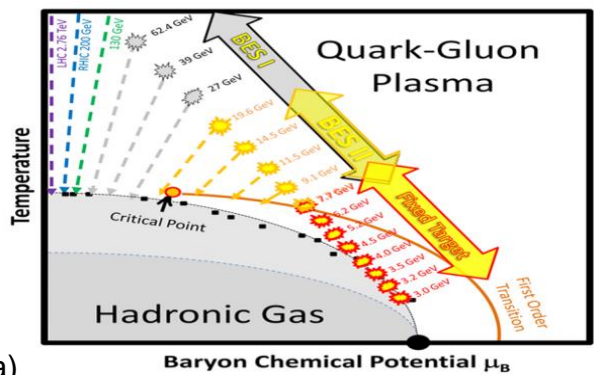
at the Relativistic Heavy Ion Collider, Brookhaven National Laboratory



- Badanie diagramu fazowego QCD dla dużych i średnich barionowych potencjałów chemicznych (zderzenia Au+Au).
- Badanie własności plazmy kwarkowo-gluonowej
- Badanie sygnatur przejścia fazowego pomiędzy QGP i gazem hadronowym

NA61/SHINE eksperyment

- Fizyka **oddziaływań silnych**:
 - Badanie **własności uwolnienia** (przejścia hadrony ↔ plazma kwarkowo-gluonowa)
 - Poszukiwanie **punktu krytycznego** na diagramie fazowym silnie oddziałującej materii
 - Badanie i zrozumienie mechanizmów **produkcji cząstek powabnych** (z kwarkiem 'c')



High Acceptance DiElectron Spectrometer (HADES) GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

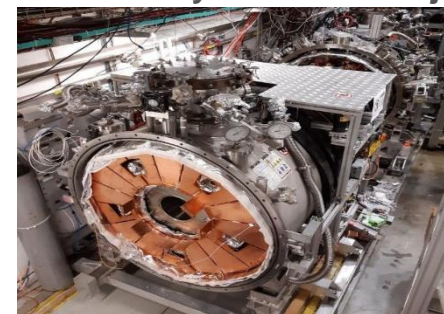
Compressed Baryonic Matter eksperyment Facility for Antiproton and Ion Research

Niecentralne zderzenie Au+Au dla energii

$$\sqrt{s_{NN}} = 2.42 \text{ GeV}$$

Odtwarzamy warunki istniejące we wnętrzu gwiazd neutronowych

CBM i HADES będą się wzajemnie uzupełniały, Rozruch eksperymentu planowany na 2028.



AEGIS: Antymateria w laboratorium

Eksperyment AEGIS zlokalizowany jest w jedynym niskoenergetycznym źródle antyprotonów istniejącym na świecie.

Pomiar oddziaływania grawitacyjnego antymaterii – test *słabej zasady równoważności*
Pomiar przyspieszenia atomu antywodoru w ziemskim polu grawitacyjnym.

Metody i techniki jądrowe

Fizyka medyczna (dozymetria i ochrona radiologiczna)

Szeroko pojęta energetyka jądrowa

Tomografia z wykorzystaniem promieniowania kosmicznego

Teoria jądra

Nierównowagowe zjawiska w układach nadciekłych

Ultradźwiękowe gazy atomowe.

Modelowanie wnętrza gwiazd neutronowych

Reakcje jądrowe jąder ciężkich



Clean Energy Training Center



Wrzesień 2023: **Ministerstwo Klimatu i Środowiska (MKiŚ)** oraz **Department of Energy (USA)** podpisują porozumienie o utworzenia **Clean Energy Training Center** zlokalizowanego w Warszawie.

3-5 Kwiecień 2024, Politechnika Warszawska: **Uroczyste Otwarcie Clean Energy Training Center**

Zadania **Clean Energy Training Center**:

- **Centrum kształcenia dla energetyki jądrowej** w regionie Europy Środkowej i Wschodniej
- Przygotowanie kadr dla budowy, rozruchu, obsługi i utrzymania reaktorów jądrowych w Polsce i w regionie (zarówno reaktorów tradycyjnych – „dużych”, jak i rozwiązań SMR)
- Transfer wiedzy, kompetencji oraz doświadczenia ekspertów z USA do polskich Uczelni, przedsiębiorstw, organów nadzorczych oraz operatorów w energetyce jądrowej i niskoemisyjnej
- Doradztwo w przygotowaniu infrastruktury niezbędnej w procesie szkolenia dla sektora jądrowego (laboratoria specjalistyczne, zestawy podkrytyczne, reaktory szkoleniowe i badawcze, itp.)
- Doradztwo co do roli i zadań interesariuszy (Uczelnie, Instytuty Naukowe, Władze i organy nadzorcze, operatorzy, przedsiębiorstwa sektora jądrowego) w procesie kształcenia
- Doradztwo w sprawie struktury finansowej i organizacyjnej programów nauczania w sektorze energetyki jądrowej i pokrewnych na polskich uczelniach



Fizyka Jądrowa - Wydział Fizyki



Wydział
Fizyki

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

1. Stopień studiów

Kierunek Fizyka Techniczna

Możliwość specjalizacji w tematyce obejmującej fizykę jądrową, fizykę wysokich energii oraz fizykę cząstek elementarnych

Szeroki wybór przedmiotów „narzędziowych” związanych z programowaniem (wysokopoziomowym oraz sprzętowym), detektorami promieniowania, elektroniką odczytową oraz modelowaniem procesów fizycznych

2. stopień studiów

Specjalność **Fizyka i Technika Jądrowa** na Kierunku Fizyka Techniczna

Obszary tematyczne:

- Zaawansowana fizyka jądrowa, fizyka wysokich energii, fizyka cząstek elementarnych, fizyka kwantowa
- Programowanie
- Elektronika, w tym systemy kontrolne i systemy akwizycji danych
- Komputerowa Analiza Danych i Modelowanie

Wybrane kompetencje z obszaru fizyki i techniki jądrowej:

- Detekcja promieniowania jądrowego, modelowanie Monte Carlo,
- Systemy sterowania detektorami w instalacjach jądrowych
- Energetyka jądrowa, neutronika, chemia jądrowa, fizyka reaktorów jądrowych
- Dozymetria i ochrona przed promieniowaniem