Neutronensterne als Labor für Dichte Materie

Christian Ecker

Tag der Naturwissenschaften 2022
6 Oktober 2022

$M = 1\,M_\odot \approx 2 \cdot 10^{30}$ kg
$R \approx 700.000\,\mathrm{km}$
$H + \mathrm{Gravitation}$
$\Downarrow$
$He + \mathrm{Wärme}$

5 Milliarden Jahre Später

$$M = 8 - 25\, M_\odot$$

$H \rightarrow He$
$He \rightarrow C$
$C \rightarrow O$
$O \rightarrow Si$
$Si \rightarrow Fe$
Fe

PSR B0531 + 21

$\Omega \approx 716\,\mathrm{Hz}$
$v \approx \frac{1}{4}\,c$

EM – Radiation
$\Omega \approx 716\,\mathrm{Hz}$
$v \approx \frac{1}{4}\,c$
Magnetic Field

Gravity
Pressure
$R \approx 12\,\mathrm{km}$
$M \approx 1.4\,M_\odot$

Outer Crust
Iron Lattice + e$^-$
Atmosphere (μm)
H, He, C
Inner Crust
Neutronrich
Nuclei,
Neutron−
liquid
Surface $\approx 10^{11}$ g
($\Delta r \approx$ mm)
Outer Core
n, p, e$^-$,μ
?
Electron Capture
$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
Nuclear Density
$n_s = 0.16$ fm^{-3}
Neutron
Proton
Inner Core (Density $\approx 2 - 5\,\mathrm{n_s}$)
Quark Matter, Strange Matter, . . .?

Mehr Neutronen
?
Electron Capture
$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

Neutron

Proton

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	≃2.2 MeV/c²	≃1.28 GeV/c²	≃173.1 GeV/c²	0	≃124.97 GeV/c²
charge	⅔	⅔	⅔	0	0
spin	½	½	½	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	≃4.7 MeV/c², −⅓, ½, d down	≃96 MeV/c², −⅓, ½, s strange	≃4.18 GeV/c², −⅓, ½, b bottom	0, 0, 1, γ photon	
LEPTONS	≃0.511 MeV/c², −1, ½, e electron	≃105.66 MeV/c², −1, ½, μ muon	≃1.7768 GeV/c², −1, ½, τ tau	≃91.19 GeV/c², 0, 1, Z Z boson	
	<1.0 eV/c², 0, ½, ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c², 0, ½, ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV/c², 0, ½, ν_τ tau neutrino	≃80.39 GeV/c², ±1, 1, W W boson	

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

Das QCD Phasen Diagram

Theorie der Starken Wechselwirkung: Quantenchromodynamik (QCD)
Abstoßung/Anziehung durch Gluonenaustausch farbgeladener Quarks.

Das QCD Phasen Diagram

Theorie der Starken Wechselwirkung: Quantenchromodynamik (QCD)
Abstoßung/Anziehung durch Gluonenaustausch farbgeladener Quarks.

Newton's Gravitation (1687)

$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (1915)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} \, .$$

Verteilung von Materie bestimmt wie sich Raumzeit krümmt, Krümmung der Raumzeit bestimmt wie sich Materie verteilt.

Schwarze Löcher

Karl Schwarzschild

Event Horizon Telescope

Gravitationswellen

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

Gravitationswellen

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

GW150914

Hanford, Washington (H1)
Livingston, Louisiana (L1)
Strain (10^{-21})
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
H1 observed
L1 observed
H1 observed (shifted, inverted)
Numerical relativity
Reconstructed (wavelet)
Reconstructed (template)
Residual
Frequency (Hz)
512
256
128
64
32
0.30
0.35
0.40
0.45
Time (s)
Normalized amplitude
8
6
4
2
0

GW170817

Normalized amplitude
0
2
4
6
LIGO-Hanford
LIGO-Livingston
Virgo
Frequency (Hz)
500
100
50
-30
-20
-10
0
Time (seconds)

The Astrophysical Journal Letters, 848:L12 (59pp), 2017 October 20
Abbott et al.
LIGO - Virgo
frequency (Hz)
Fermi/GBM
INTEGRAL/SPI-ACS
counts/s (arb. scale)
t-t_c (s)
normalized F_ν
SALT
ESO-NTT
SOAR
ESO-VLT
wavelength (nm)
GW
γ-ray
X-ray
UV
Optical
IR
Radio
t-t_c (days)
1M2H Swope
DLT40
VISTA
Chandra
10.86h
11.08h
11.24h
9d
X-ray
MASTER
DECam
Las Cumbres
J VLA
11.31h
11.40h
11.57h
16.4d
Radio

Neutronenstern Simulationen mit dem Computer

Picture: Baiotti, Rezzola 1607.03540 (Rept.Prog.Phys.)

High-Performance Computing Center Stuttgart

Picture Copyright: Ben Derzian for HLRS

Soft_q0.7
$t - t_{\rm mer} = -16.5$ ms
XY
XZ
y [km]
z [km]
x [km]
n_b/n_s
h_+^{22} [40Mpc]
$\times 10^{-22}$
$t - t_{\rm mer}$ [ms]

Heiße, Warme and Kalte Quarkmaterie

Tootle, CE, Topolski, Demircik, Järvinen, Rezzolla 2205.05691 (SciPost)

Wie wird man theoretische Astrophysikerin?

Nützliche Voraussetzungen:

- Wichtig: Interesse an Mathematik+Physik.
- Furchtloser Umgang mit dem Computer.
- Studium der Physik, z.B. an Goethe Universität.

Themenspezifische Vorlesungen,Übungen und Seminare:

- Einführung in die Astronomie
- Allgemeine Relativitätstheorie
- Einführung in die Quantenfeldtheorie
- Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik
- Numerische Methoden der Physik
- Astrophysikalisches Proseminar
- ...