

Neutron Stars, Quark Stars and the QCD Phase Transition

Jürgen Schaffner-Bielich

Institute for Theoretical Physics and
Heidelberg Graduate School for Fundamental Physics



RUPRECHT-KARLS-
UNIVERSITÄT
HEIDELBERG



Particle and Astrophysics Colloquium
Heidelberg, Germany, January 27, 2009

UniSpiegel

UNIVERSITÄT
HEIDELBERG



Visionär

Harald zur Hausen
erhält Nobelpreis

■ Seite 3

Umstritten

Wie entstand das
Weihnachtsfest?

■ Seite 4

Fundamental

Porträt des Physikers
Jürgen Schaffner-Bielich

■ Seite 5



Dezember 5/2008

40. Jahrgang

ISSN 0171-4880

Zukunft. Seit 1386

UniSpiegel

UNIVERSITÄT
HEIDELBERG



Visionär

Harald zur Hausen
erhält Nobelpreis

■ Seite 3

Umstritten

Wie entstand das
Weihnachtsfest?

■ Seite 4

Fundamental

Porträt des Physikers
Jürgen Schaffner-Bielich

■ Seite 5



Dezember 5/2008

40. Jahrgang

ISSN 0171-4880

Zukunft. Seit 1386

Thanks for the warm welcome!

Ziemlich extrem

Jürgen Schaffner-Bielich erforscht Materie bei Ausnahmbedingungen

Von Oliver Fink

Wenn Jürgen Schaffner-Bielich, seit kurzem Professor für Theoretische Physik an der Universität Heidelberg, auf seine Forschungsinteressen zu sprechen kommt, ist er zum einen schnell an der Tafel, zum anderen versteht er es, mit hübschen Vergleichen aus dem Alltagsleben auch einem Nicht-Physiker auf anschauliche Weise die komplexe Materie nahezubringen. Und das im wahrsten Sinne des Wortes.

Denn die Materie ist nicht nur komplex, sie ist überhaupt einer der Hauptgegenstände, mit denen sich der neue Physikprofessor beschäftigt, genauer: „Was ich mir anschau, ist Materie unter extremen Bedingungen, und zwar unter so extremen Bedingungen, dass sie sich in ihre Einzelbestandteile auflöst“, erklärt er. Dann werden Quarks freigesetzt. Dabei lassen sich spannende Beobachtungen machen, gerade bei Phasenübergängen – „so wie man das beispielsweise ja auch vom Kochen von Wasser her kennt: fest, flüssig, gasförmig“.

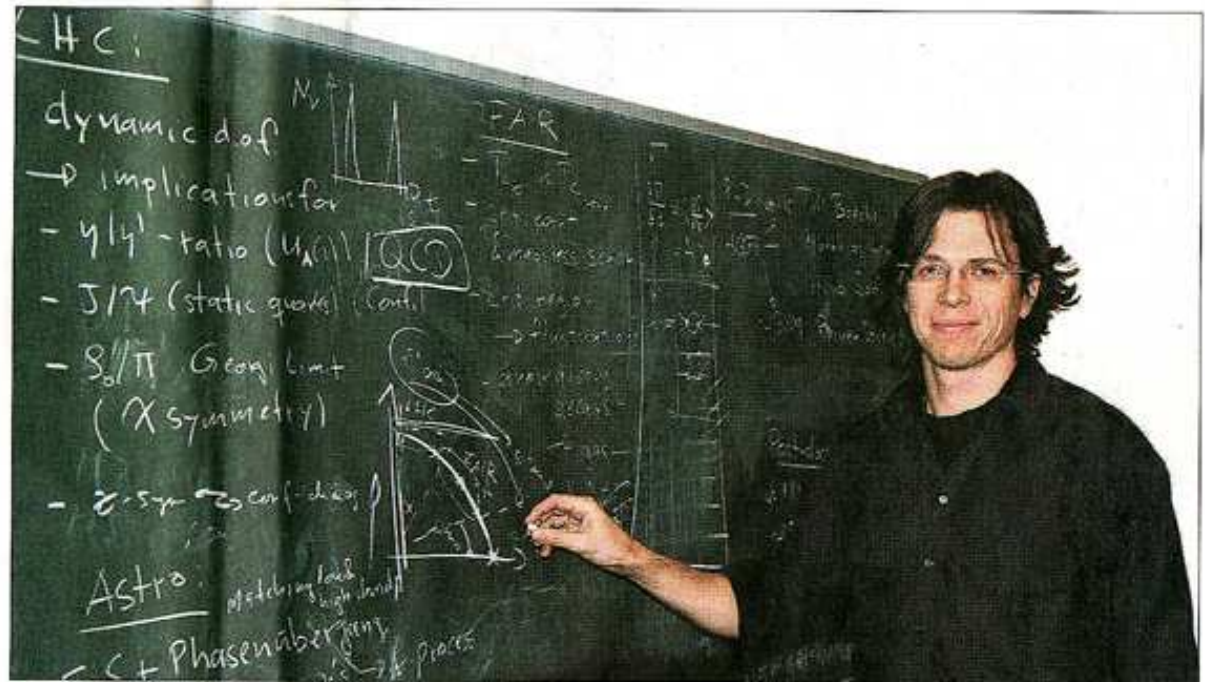
Gerade hat Schaffner-Bielich zusammen mit einer Gruppe um Matthias Liebendörfer an der Universität Basel Simu-

lationsrechnungen zum Phasenübergang bei der Supernova gemacht, also der Explosion eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit. Das Sensationelle sei gewesen, dass die Bildung von Quarkmaterie eine Supernova erfolgreich auf dem Computer explodieren lässt; das habe man bis vor kurzem gar nicht oder nur sehr schwer mit konventionellen Ansätzen hinkommen, erklärt der Physiker.

Experimentell werden Untersuchungen zur Materie vor allem auch mit Hilfe von Schwerionenkollisionen durchgeführt, wie beispielsweise am Large Hadron Collider (LHC) in Genf oder aber auch bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Am dortigen Teilchenbeschleuniger-Projekt FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) ist Schaffner-Bielich beteiligt.

Die Erkenntnisse, die man sich von solcher Grundlagenforschung erhofft, sind fundamentaler Natur: Einblicke in die Struktur der Materie und die Evolution des Universums sollen sie ermöglichen. Genau das steht auch auf dem Programm der im Rahmen der Exzellenzinitiative bewilligten Heidelberger Graduiertenschule „Fundamental Physics“, an der Jürgen Schaffner-Bielich mitwirkt.

Privat liest er Science Fiction



Für den theoretischen Physiker Jürgen Schaffner-Bielich sind mathematische Berechnungen ein wichtiger Teil seiner Arbeit. Foto: Oliver Fink

Die Ausbildungsbedingungen für Doktoranden dort nennt er „phantastisch“. Alles sei extrem gut durchorganisiert. Es gebe ein hochattraktives Begleitprogramm wie Graduiertentage oder Workshops. Hervorzuheben seien insbesondere auch die Vermittlung von Fähigkeiten wie Präsentation und Zeitmanagement. Selbst in den USA, in denen er viele Jahre an verschiedenen Universitäten geforscht hat, habe er solch hervorragende Bedingun-

gen für Doktoranden nicht erlebt. Wie ist eigentlich Jürgen Schaffner-Bielich, der an der Universität Frankfurt promoviert wurde und sich dort auch habilitiert hat, zur Physik gekommen? Die Entscheidung für das Studium stand für ihn frühzeitig fest. Bereits in der Schule gehörten Physik und Mathematik zu seinen Lieblingsfächern. In seiner Freizeit habe er sich, wie er berichtet, begeistert durch die Science Fiction-Literatur gelesen. Erst standen die Perry Rho-

dan-Hefte auf dem Programm, später kamen Klassiker wie der deutsche „Zukunftroman-Pionier“ Hans Dominik oder Isaac Asimov mit seiner berühmten Foundation-Trilogie dazu. Genießen kann der Physiker diese Geschichten auch heute noch, wenn auch die Zeit neben der Wissenschaft etwas knapp bemessen ist. Die verbringt der zweifache Vater am liebsten mit seiner Familie; manchmal reicht es auch noch zum Karate-Sport.

Ziemlich extrem

Jürgen Schaffner-Bielich erforscht Materie bei Ausnahmbedingungen

Von Oliver Fink

Wenn Jürgen Schaffner-Bielich, seit kurzem Professor für Theoretische Physik an der Universität Heidelberg, auf seine Forschungsinteressen zu sprechen kommt, ist er zum einen schnell an der Tafel, zum anderen versteht er es, mit hübschen Vergleichen aus dem Alltagsleben auch einem Nicht-Physiker auf anschauliche Weise die komplexe Materie nahezubringen. Und das im wahrsten Sinne des Wortes.

Denn die Materie ist nicht nur komplex, sie ist überhaupt einer der Hauptgegenstände, mit denen sich der neue Physikprofessor beschäftigt, genauer: „Was ich mir anschau, ist Materie unter extremen Bedingungen, und zwar unter so extremen Bedingungen, dass sie sich in ihre Einzelbestandteile auflöst“, erklärt er. Dann werden Quarks freigesetzt. Dabei lassen sich spannende Beobachtungen machen, gerade bei Phasenübergängen – „so wie man das beispielsweise ja auch vom Kochen von Wasser her kennt: fest, flüssig, gasförmig“.

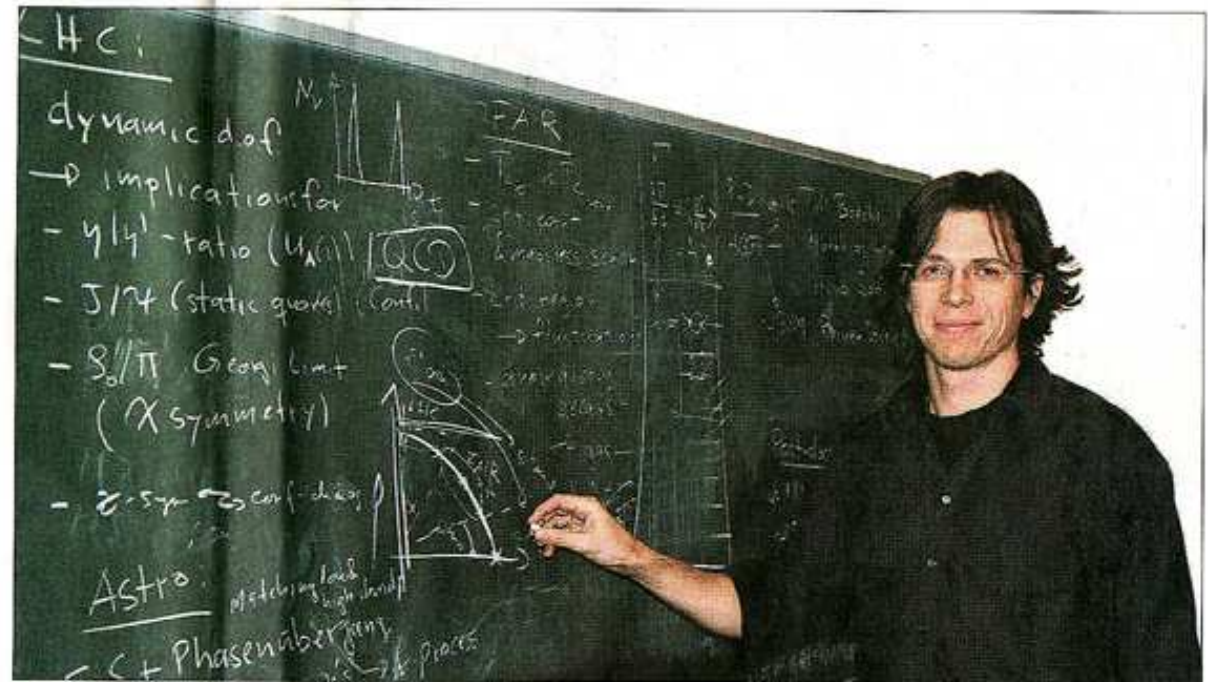
Gerade hat Schaffner-Bielich zusammen mit einer Gruppe um Matthias Liebendörfer an der Universität Basel Simu-

lationsrechnungen zum Phasenübergang bei der Supernova gemacht, also der Explosion eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit. Das Sensationelle sei gewesen, dass die Bildung von Quarkmaterie eine Supernova erfolgreich auf dem Computer explodieren lässt; das habe man bis vor kurzem gar nicht oder nur sehr schwer mit konventionellen Ansätzen hinkommen, erklärt der Physiker.

Experimentell werden Untersuchungen zur Materie vor allem auch mit Hilfe von Schwerionenkollisionen durchgeführt, wie beispielsweise am Large Hadron Collider (LHC) in Genf oder aber auch bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Am dortigen Teilchenbeschleuniger-Projekt FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) ist Schaffner-Bielich beteiligt.

Die Erkenntnisse, die man sich von solcher Grundlagenforschung erhofft, sind fundamentaler Natur: Einblicke in die Struktur der Materie und die Evolution des Universums sollen sie ermöglichen. Genau das steht auch auf dem Programm der im Rahmen der Exzellenzinitiative bewilligten Heidelberger Graduiertenschule „Fundamental Physics“, an der Jürgen Schaffner-Bielich mitwirkt.

Privat liest er Science Fiction



Für den theoretischen Physiker Jürgen Schaffner-Bielich sind mathematische Berechnungen ein wichtiger Teil seiner Arbeit. Foto: Oliver Fink

Die Ausbildungsbedingungen für Doktoranden dort nennt er „phantastisch“. Alles sei extrem gut durchorganisiert. Es gebe ein hochattraktives Begleitprogramm wie Graduiertentage oder Workshops. Hervorzuheben seien insbesondere auch die Vermittlung von Fähigkeiten wie Präsentation und Zeitmanagement. Selbst in den USA, in denen er viele Jahre an verschiedenen Universitäten geforscht hat, habe er solch hervorragende Bedingun-

gen für Doktoranden nicht erlebt. Wie ist eigentlich Jürgen Schaffner-Bielich, der an der Universität Frankfurt promoviert wurde und sich dort auch habilitiert hat, zur Physik gekommen? Die Entscheidung für das Studium stand für ihn frühzeitig fest. Bereits in der Schule gehörten Physik und Mathematik zu seinen Lieblingsfächern. In seiner Freizeit habe er sich, wie er berichtet, begeistert durch die Science Fiction-Literatur gelesen. Erst standen die Perry Rho-

dan-Hefte auf dem Programm, später kamen Klassiker wie der deutsche „Zukunftsroman-Pionier“ Hans Dominik oder Isaac Asimov mit seiner berühmten Foundation-Trilogie dazu. Genießen kann der Physiker diese Geschichten auch heute noch, wenn auch die Zeit neben der Wissenschaft etwas knapp bemessen ist. Die verbringt der zweifache Vater am liebsten mit seiner Familie; manchmal reicht es auch noch zum Karate-Sport.

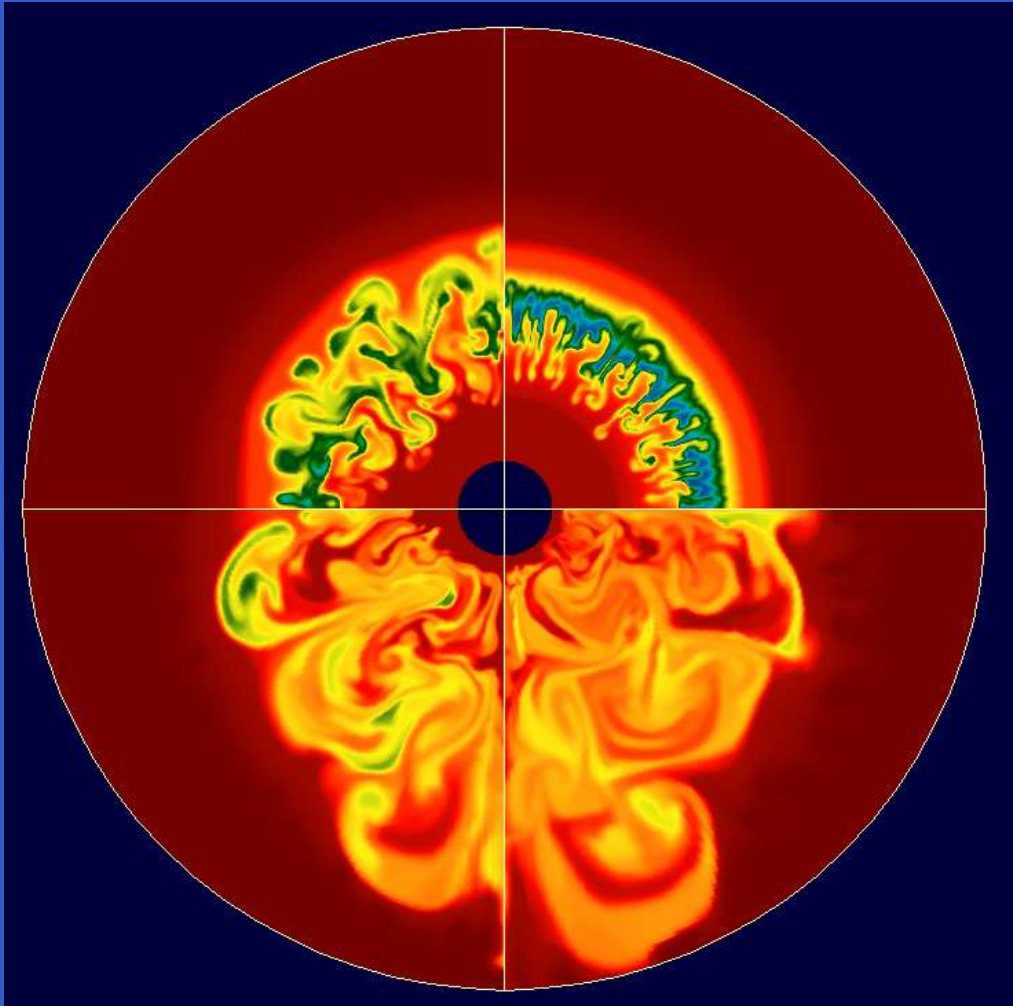
my blackboard notes are already in the local newspaper!

Outline

- Introduction: observational data on neutron stars
- Properties of neutron stars and quark stars
- QCD phase transition and supernovae

Observational Data on Neutron Stars

Supernova Explosions



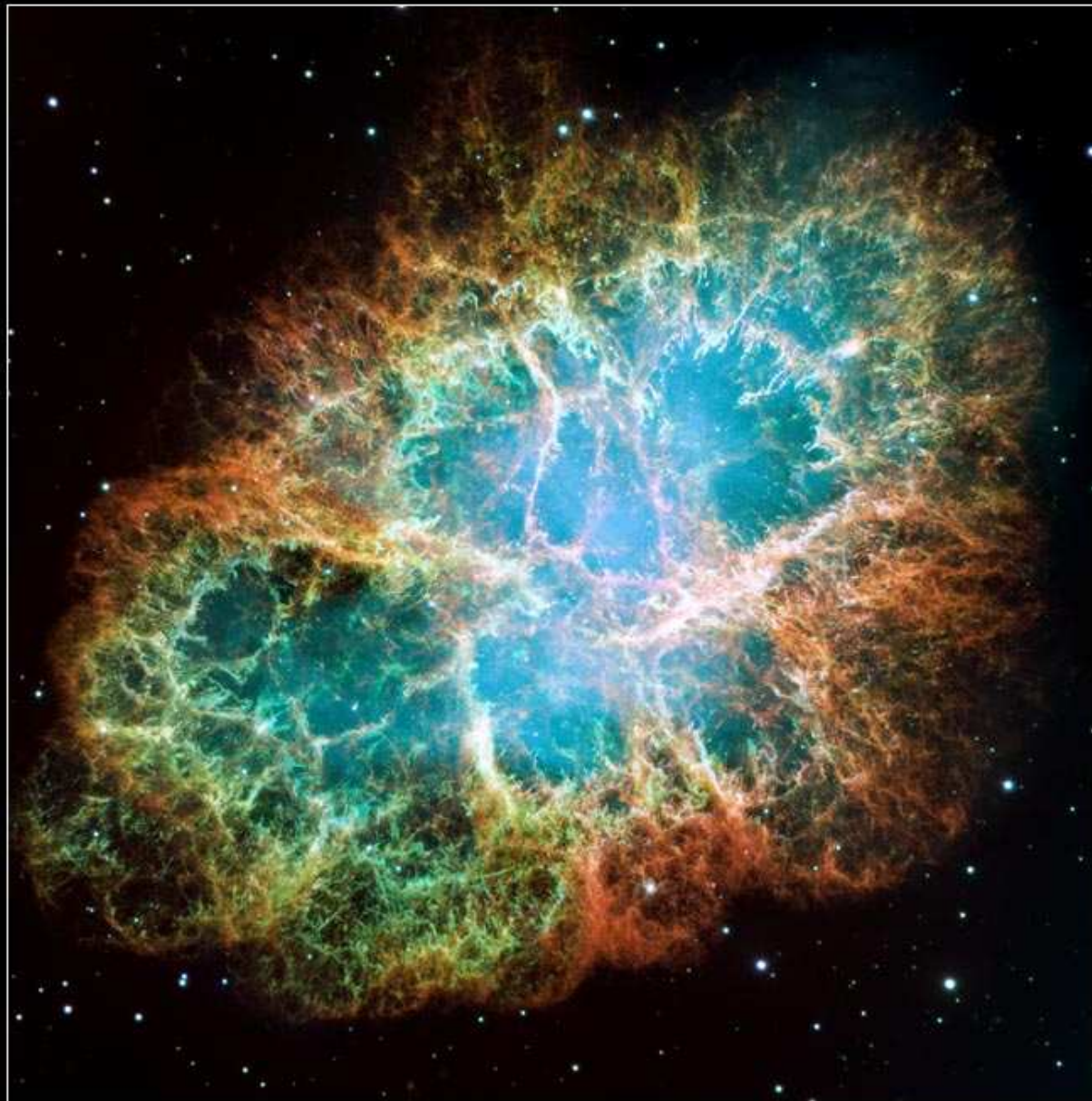
(supernova simulation by Janka et al.,
MPA Garching)

- stars with a mass of more than 8 solar masses end in a (core collapse) supernova (type II)
- Supernova of AD 1054 was visible for three weeks during daytime (crab nebula)!
- supernovae are several thousand times brighter than a whole galaxy!
- last supernova explosion for the last 400 years in our local group: SN1987A
- most prominent candidate in the universe for producing the heavy elements (r-process)

Neutron Stars

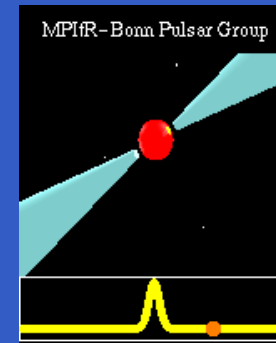
Crab Nebula ■ M1

HST ■ WFPC2



NASA, ESA, and J. Hester (Arizona State University)

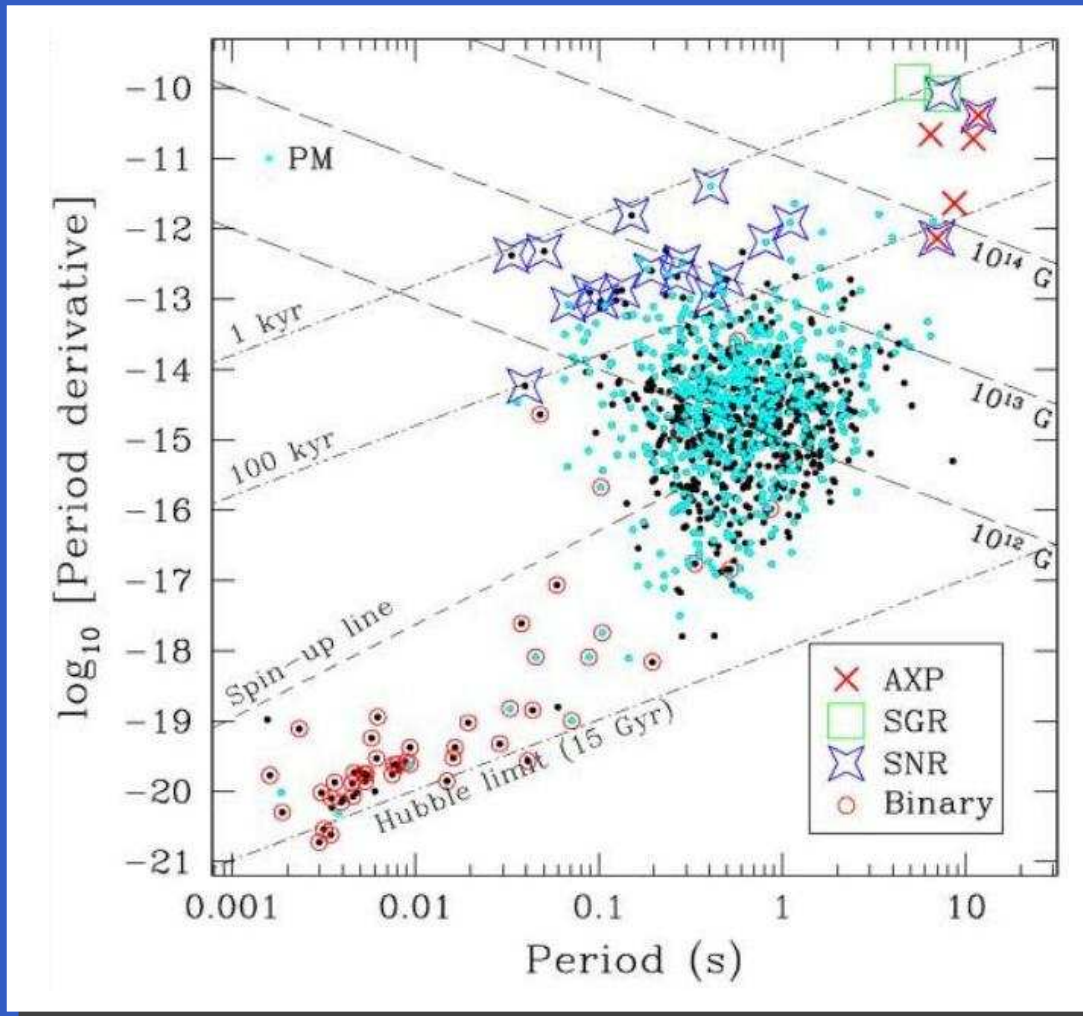
STScI-PRC05-37



- produced in core collapse supernova explosions
- compact, massive objects: radius ≈ 10 km, mass $1 - 2M_{\odot}$
- extreme densities, several times nuclear density: $n \gg n_0 = 3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$
- in the middle of the crab nebula: a pulsar, a rotating neutron star!

Movie (seven still images in 11/2000–04/2001)

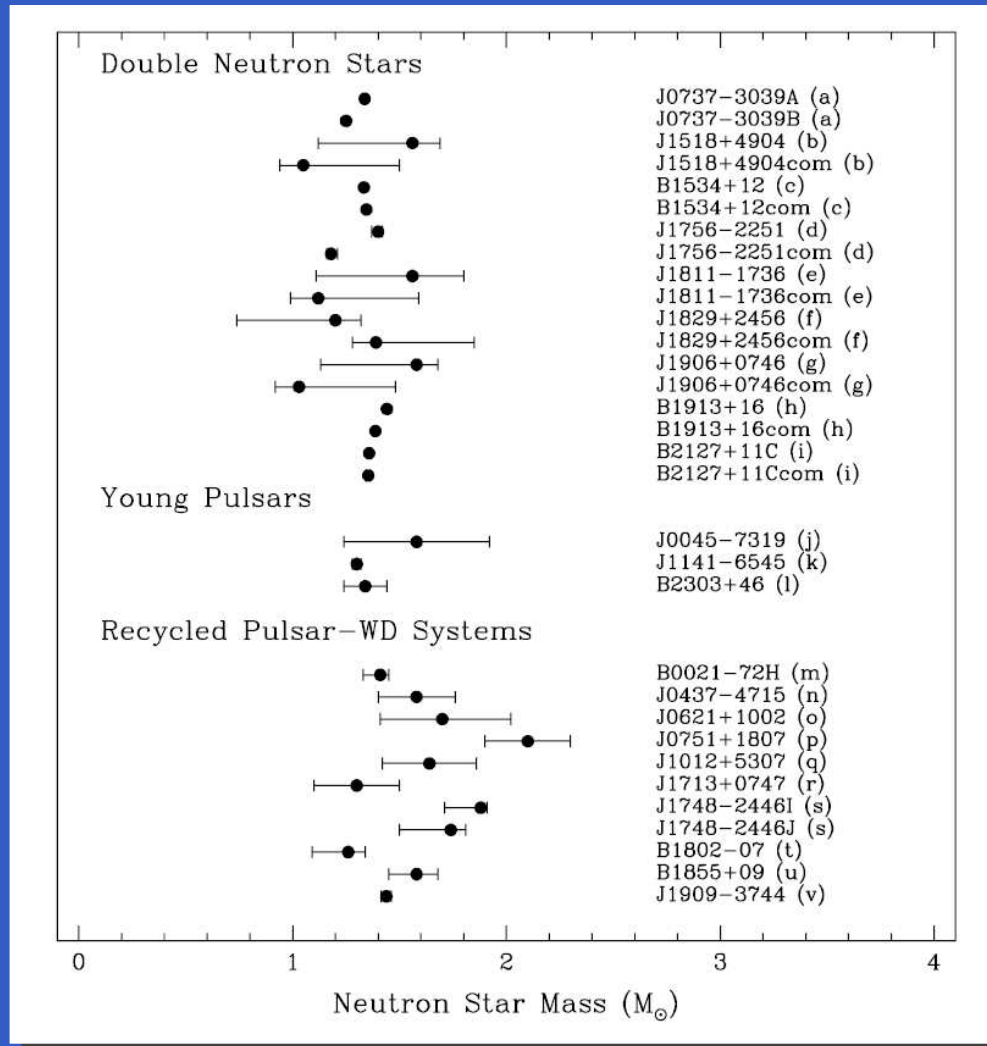
The Pulsar Diagram



(ATNF pulsar catalog)

- the diagram for pulsars: period versus period change ($P-\dot{P}$)
- dipole model for pulsars:
characteristic age: $\tau = P/(2\dot{P})$
and magnetic field
 $B = 2 \cdot 10^{19} (P \cdot \dot{P})^{1/2}$ Gauss
- anomalous x-ray pulsars: AXP,
soft-gamma ray repeaters:
SGR, young pulsars in
supernova remnants: SNR
- rapidly rotating pulsars (millisecond pulsars): mostly in binary systems (old recycled pulsars!)

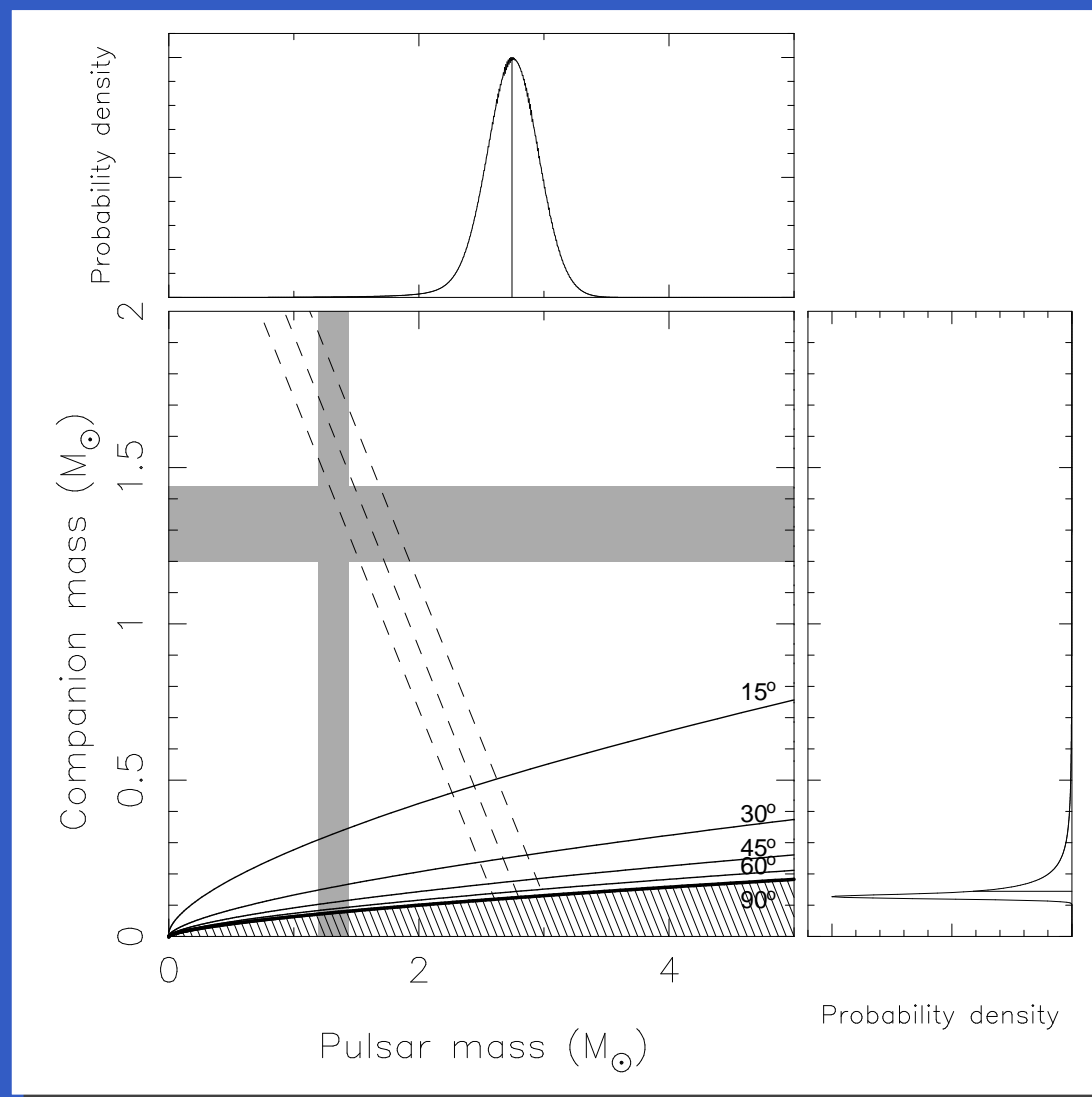
Masses of Pulsars (Stairs, 2006)



- more than 1600 pulsars known
- best determined mass:
 $M = (1.4414 \pm 0.0002)M_{\odot}$
 for the Hulse-Taylor pulsar
 (Weisberg and Taylor, 2004)
- smallest known mass:
 $M = (1.18 \pm 0.02)M_{\odot}$ for
 pulsar J1756-2251 (Faulkner
 et al., 2005)
- PSR J0751+1807 corrected
 from $M = 2.1 \pm 0.2M_{\odot}$ to
 $M = 1.14 - 1.40M_{\odot}$ (Nice et
 al. 2008)

Supermassive Pulsar in Globular Cluster?

(Freire et al., arXiv:0711.0925v2 (2007))



- measurement of periastron advance of the pulsar PSR J1748-2021B
- inclination angle i of orbital plane unknown
- statistical analysis (for angle i):
 $M = 2.74 \pm 0.21 M_{\odot}$ (1σ) and
 $M > 2.0 M_{\odot}$ (99% c.l.)
- two neutron stars with
 $M \sim 1.4 M_{\odot}$ 'unlikely' but
possible for $i = 4 - 5$ degrees
- measurement of a second GR effect needed to draw a firm conclusions!

How To Measure Masses AND Radii of Compact Stars

- mass from binary systems (pulsar with a companion star)
- radius and mass from thermal emission, for a blackbody:

$$F_{\infty} = \frac{L_{\infty}}{4\pi d^2} = \sigma_{\text{SB}} T_{\text{eff},\infty}^4 \left(\frac{R_{\infty}}{d} \right)^2$$

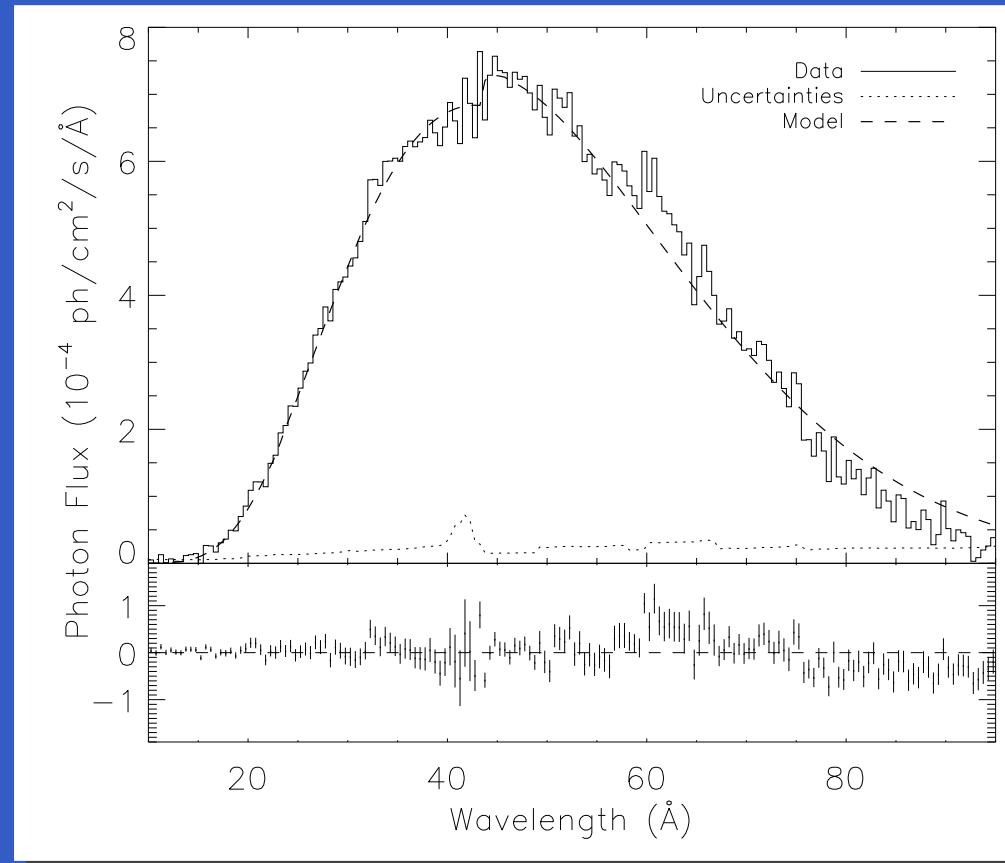
with $T_{\text{eff},\infty} = T_{\text{eff}}/(1+z)$ and $R_{\infty} = R/(1+z)$

- redshift:

$$1+z = \left(1 - \frac{2GM}{R} \right)^{-1/2}$$

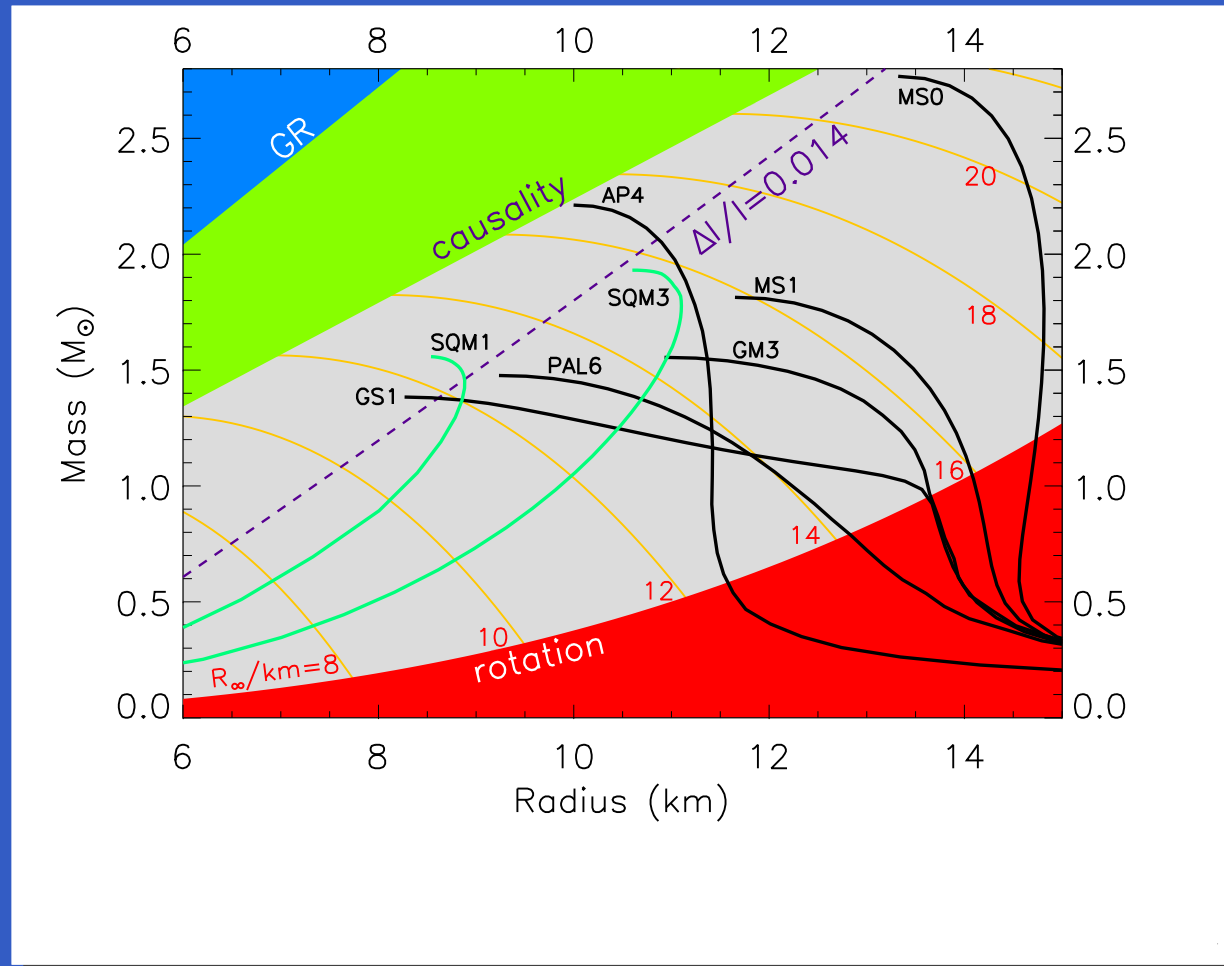
- need to know distance and effective temperature to get R_{∞}
- radius measured depends on true mass and radius of the star
- additional constraint from redshift measurement from e.g. redshifted spectral lines fixes mass and radius uniquely

Isolated Neutron Star RX J1856 (Drake et al. (2002))



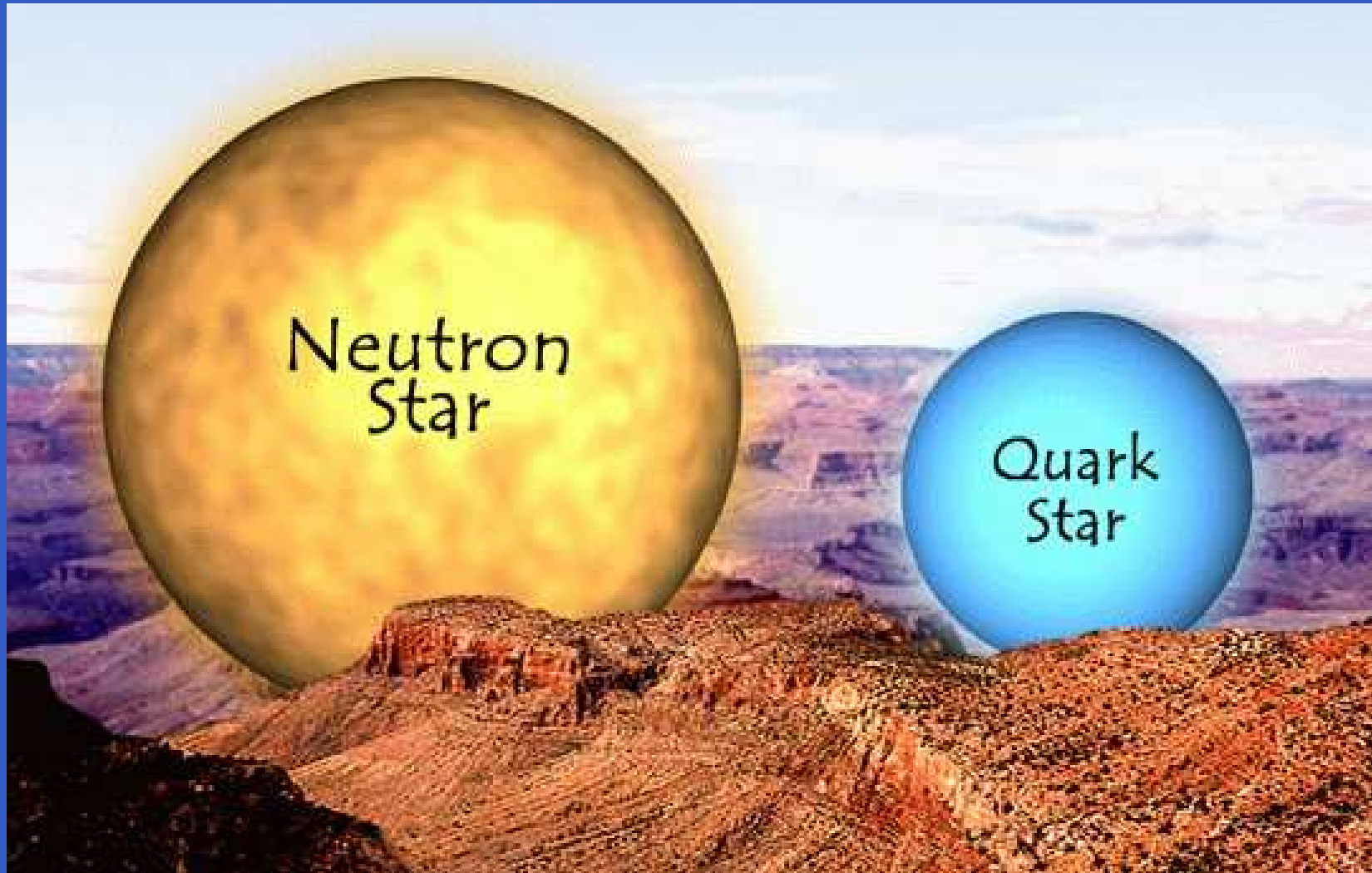
- closest known neutron star, parallax measurement with HST:
 $D = 117 \pm 12$ pc (Lattimer and Wolter 2002), $D = 140 \pm 40$ pc (van Kerkwijk and Kaplan 2004), $D = 161 \pm 18$ pc (Kaplan 2007)
- perfect black-body spectrum, no spectral lines!
- for black-body emission (x-ray part only): $T = 60$ eV and $R_\infty = 4 - 8$ km!

Constraints on the Mass–Radius Relation (Lattimer and Prakash (2004))



- spin rate from PSR B1937+21 of 641 Hz: $R < 15.5$ km for $M = 1.4M_{\odot}$
- Schwarzschild limit (GR): $R > 2GM = R_s$
- causality limit for EoS: $R > 3GM$
- only quark stars can have small radii!

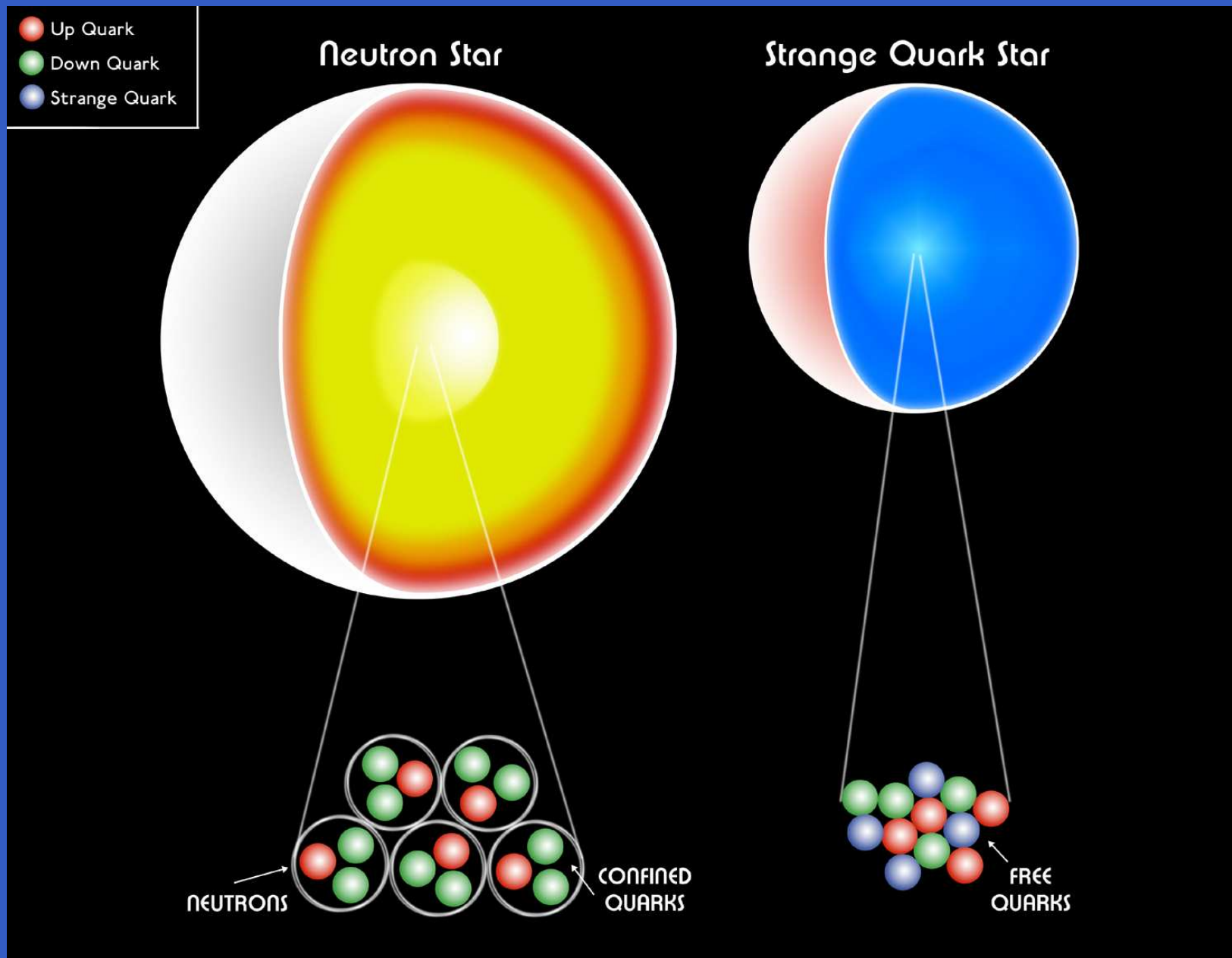
A Quark Star? (NASA press release 2002)



NASA news release 02-082:

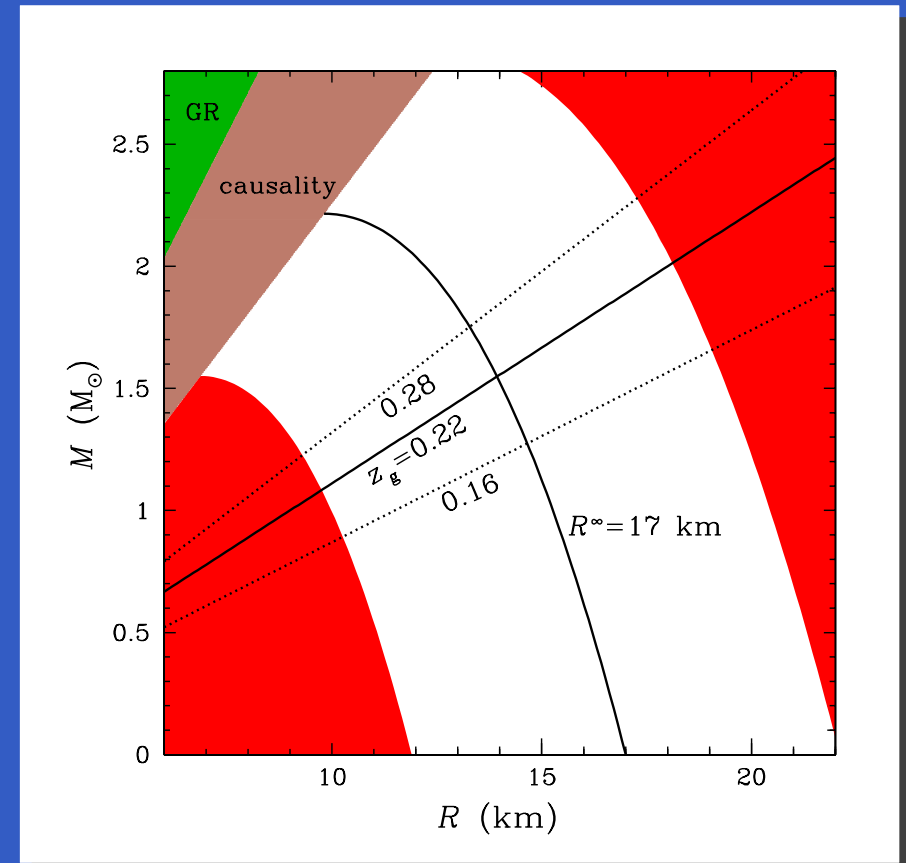
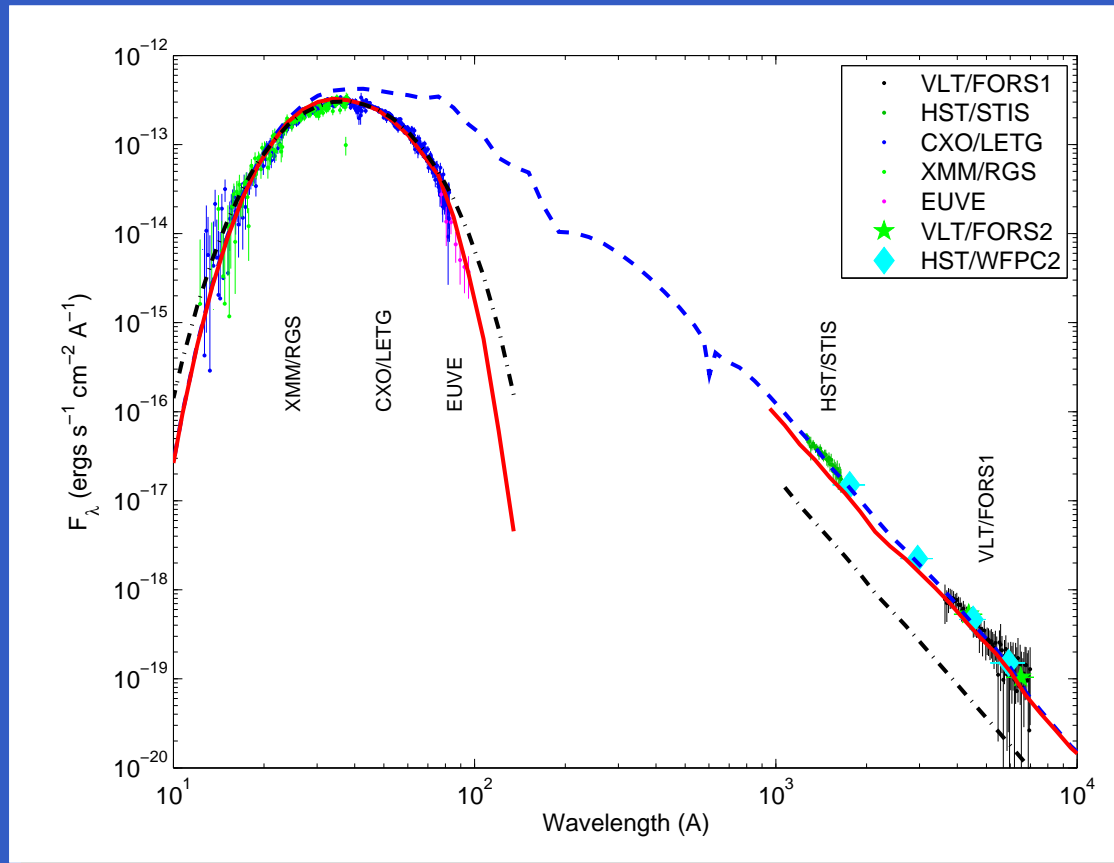
“Cosmic X-rays reveal evidence for new form of matter”
— a quark star?

Neutron Star versus Strange Quark Star



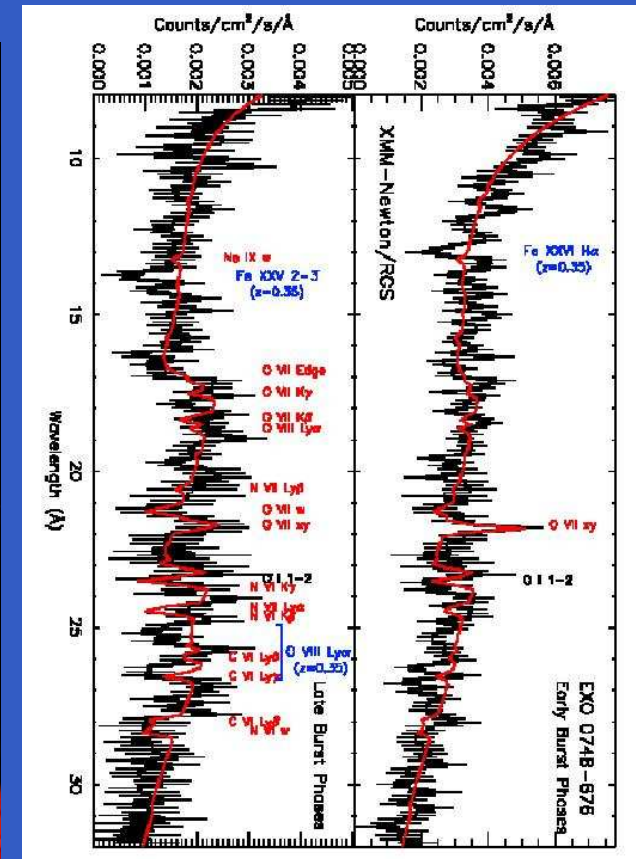
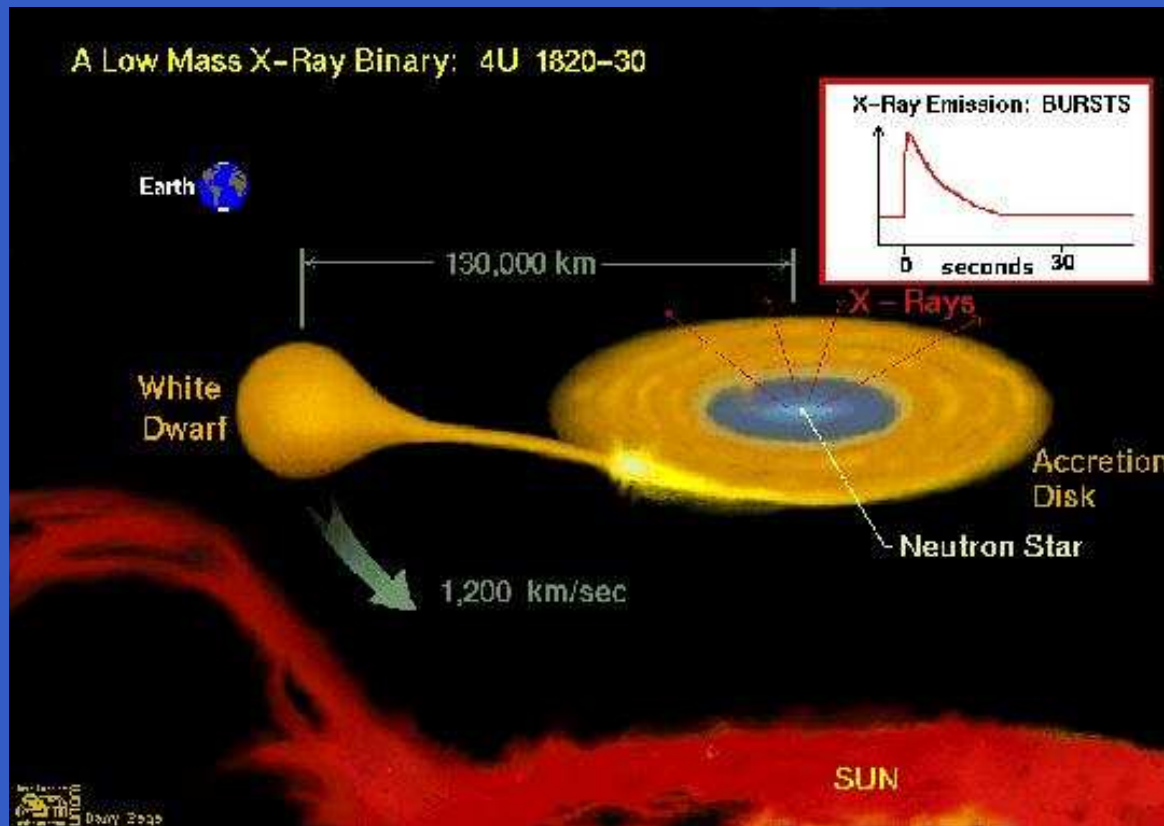
(Chandra X-Ray Center, 2002)

RXJ 1856: Neutron Star or Quark Star? (Ho et al. (2007))



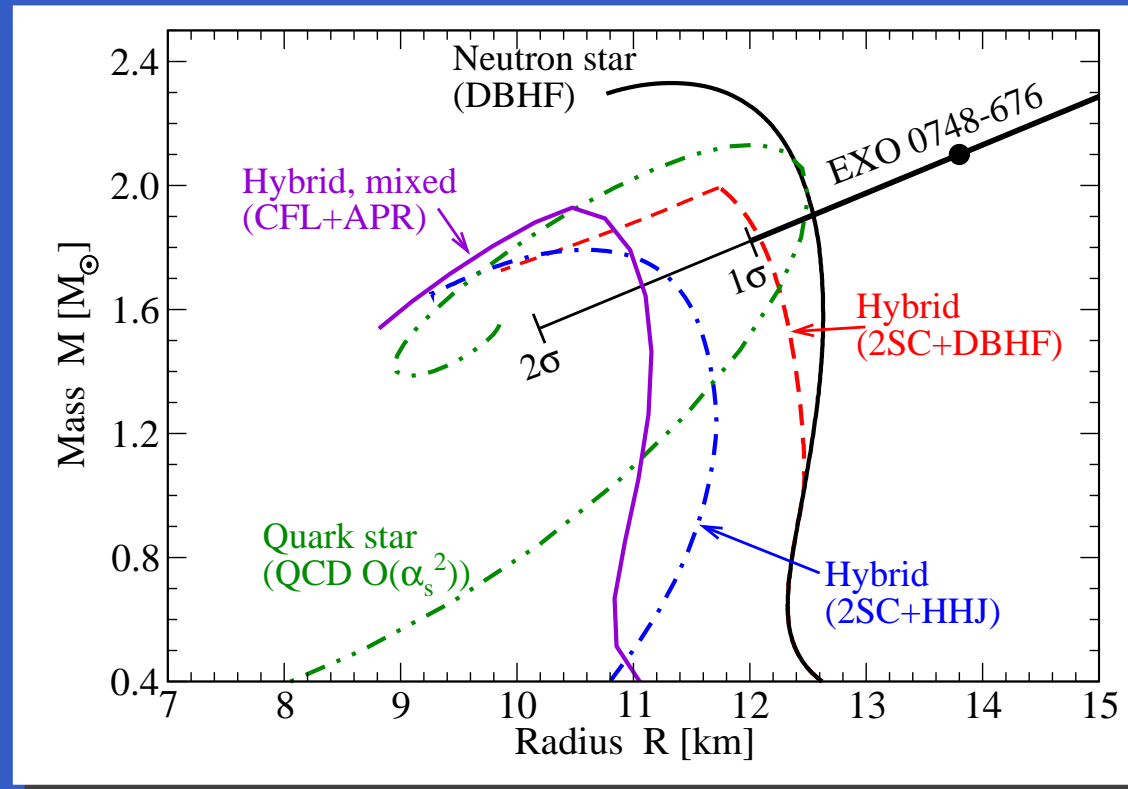
- two-temperature black-body fit implies a lower limit for radiation radius:
 $R_\infty = R / \sqrt{1 - 2GM/R} \approx 17 \text{ km (d/140 pc)}$
- thin magnetized H-atmosphere on condensed iron core (Ho et al.):
redshift $z_g \approx 0.22$: $R \approx 14 \text{ km}$ and $M \approx 1.55 M_\odot$
- not necessarily a quark star!

X-Ray burster



- binary systems of a neutron star with an ordinary star
- accreting material on the neutron star ignites nuclear burning
- explosion on the surface of the neutron star: x-ray burst
- red shifted spectral lines measured!
($z = 0.35 \rightarrow M/M_{\odot} = 1.5$ (R/10 km)) (Cottam, Paerels, Mendez (2002))

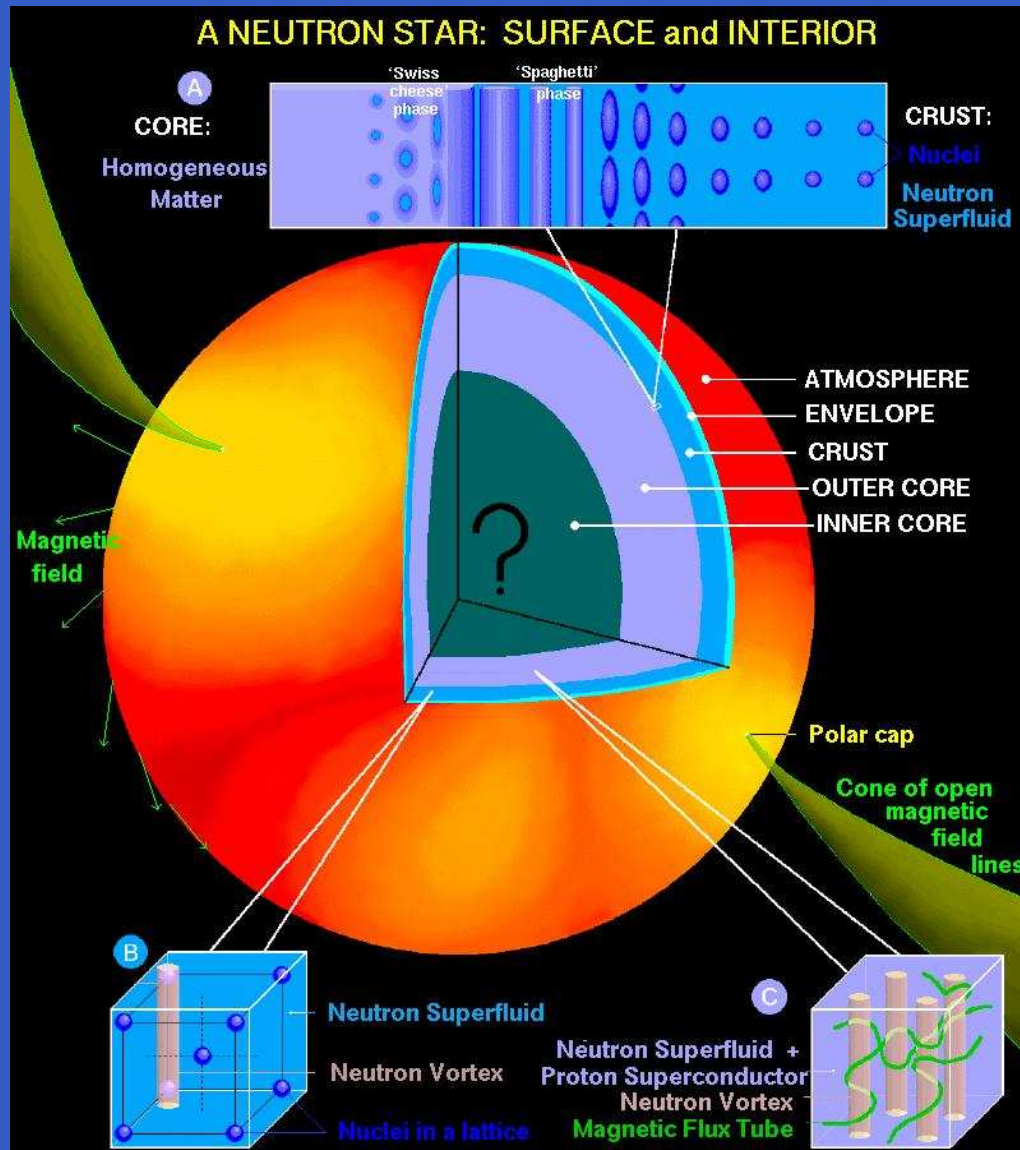
X-Ray burster EXO 0748–676: the EoS is hard!



- analysis of Özel (Nature 2006): $M \geq 2.10 \pm 0.28M_{\odot}$ and $R \geq 13.8 \pm 1.8$ km, claims: 'unconfined quarks do not exist at the center of neutron stars'!
- reply by Alford, Blaschke, Drago, Klähn, Pagliara, JSB (Nature 445, E7 (2007)): limits rule out soft equations of state, not quark stars or hybrid stars!
- multiwavelength analysis of Pearson et al. (2006): data more consistent with $M = 1.35M_{\odot}$ than with $M = 2.1M_{\odot}$

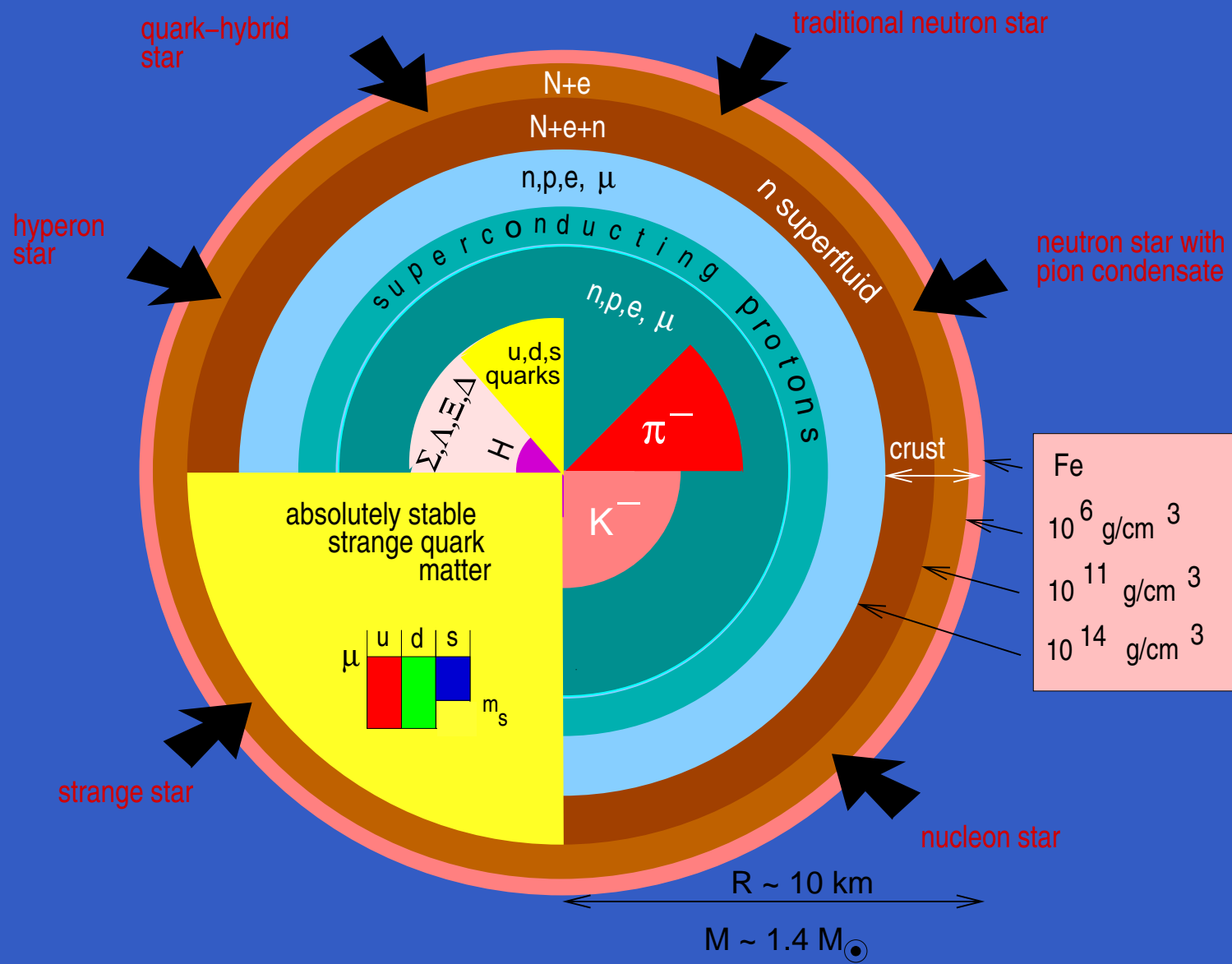
Properties of Neutron Stars and Quarks Stars

Structure of Neutron Stars — the Crust (Dany Page)

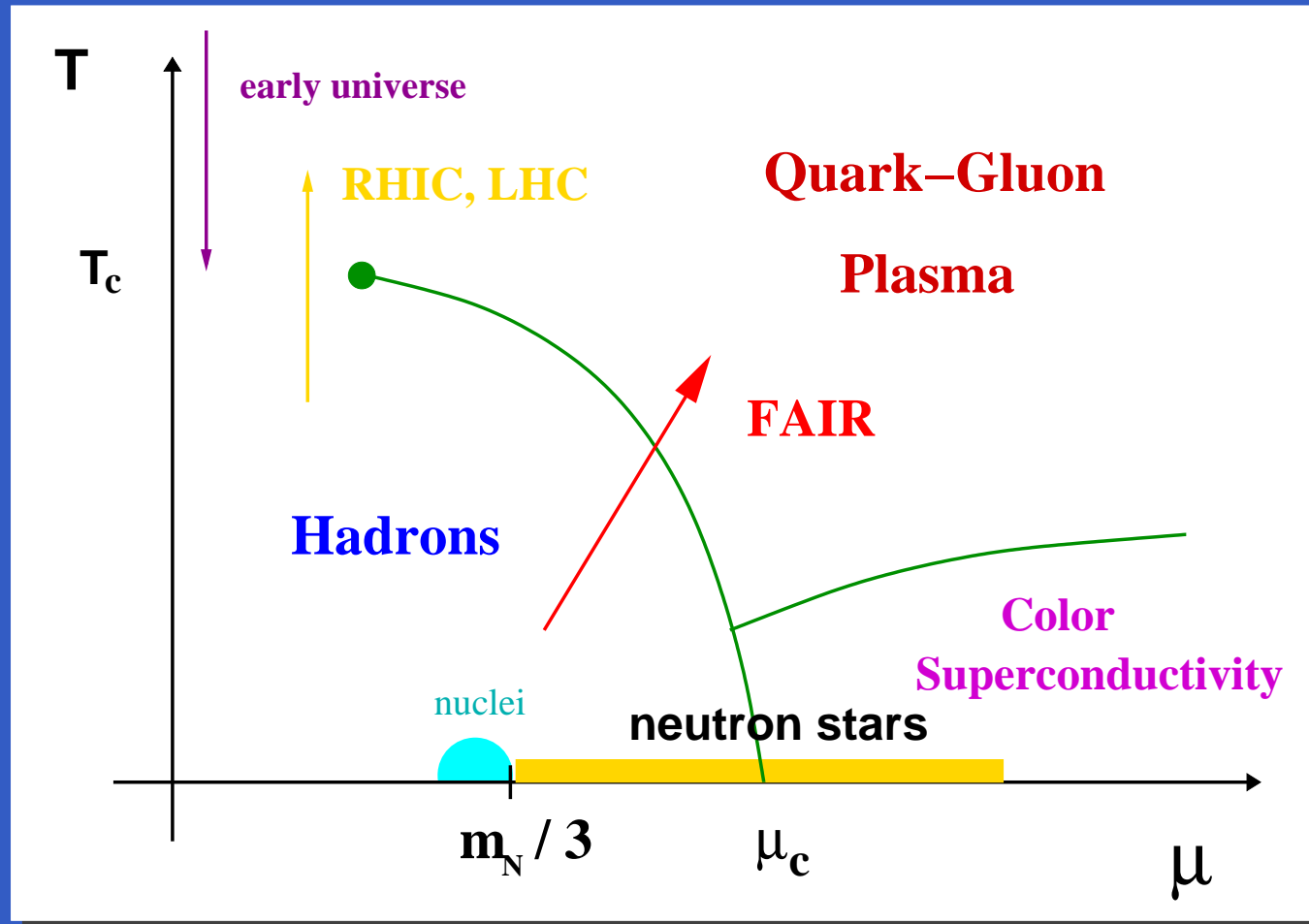


- $n \leq 10^4 \text{ g/cm}^3$:
atmosphere
(atoms)
- $n = 10^4 - 4 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$:
outer crust or envelope
(free e^- , lattice of nuclei)
- $n = 4 \cdot 10^{11} - 10^{14} \text{ g/cm}^3$:
Inner crust
(lattice of nuclei with free
neutrons and e^-)

Structure of a Neutron Star — the Core (Fridolin Weber)



Phase Transitions in Quantum Chromodynamics QCD



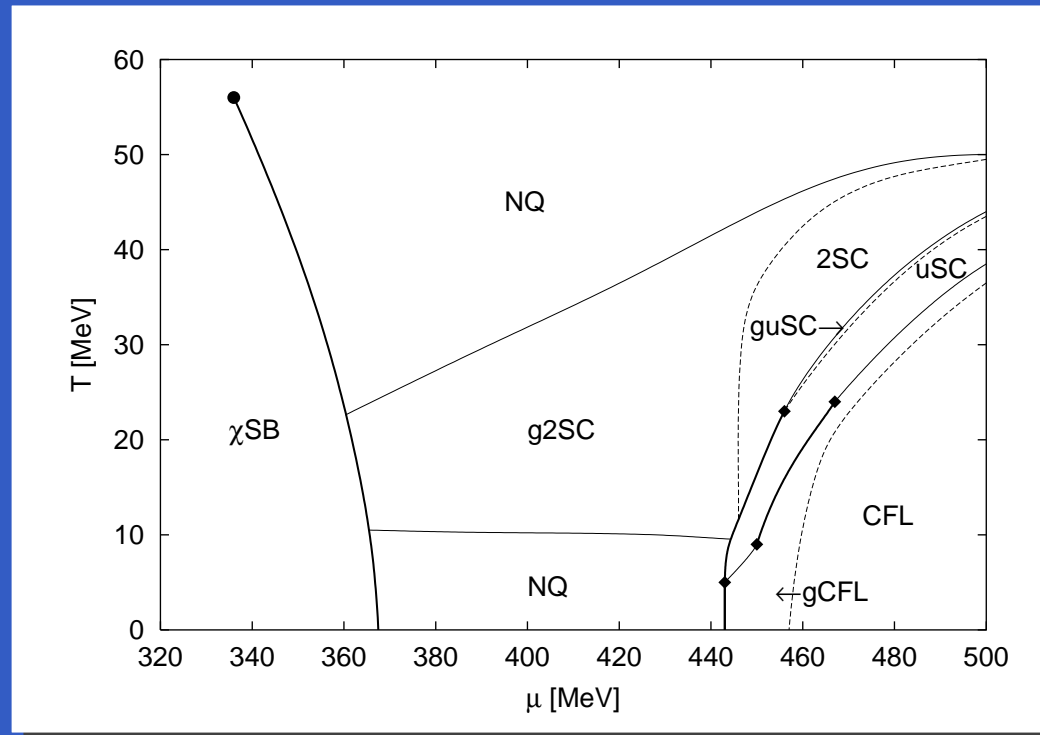
- Early universe at zero density and high temperature
- neutron star matter at small temperature and high density
- first order phase transition at high density (not deconfinement)!
- probed by heavy-ion collisions at GSI, Darmstadt (FAIR!)

Quark matter in the NJL model

$$p = \frac{1}{2\pi^2} \sum_{i=1}^{18} \int_0^\Lambda dk k^2 |\epsilon_i| + 4K \sigma_u \sigma_d \sigma_s - \frac{1}{4G_D} \sum_{c=1}^3 |\Delta_c|^2 - 2G_S \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_\alpha^2 + \frac{1}{4G_V} \omega_0^2 + p_e$$

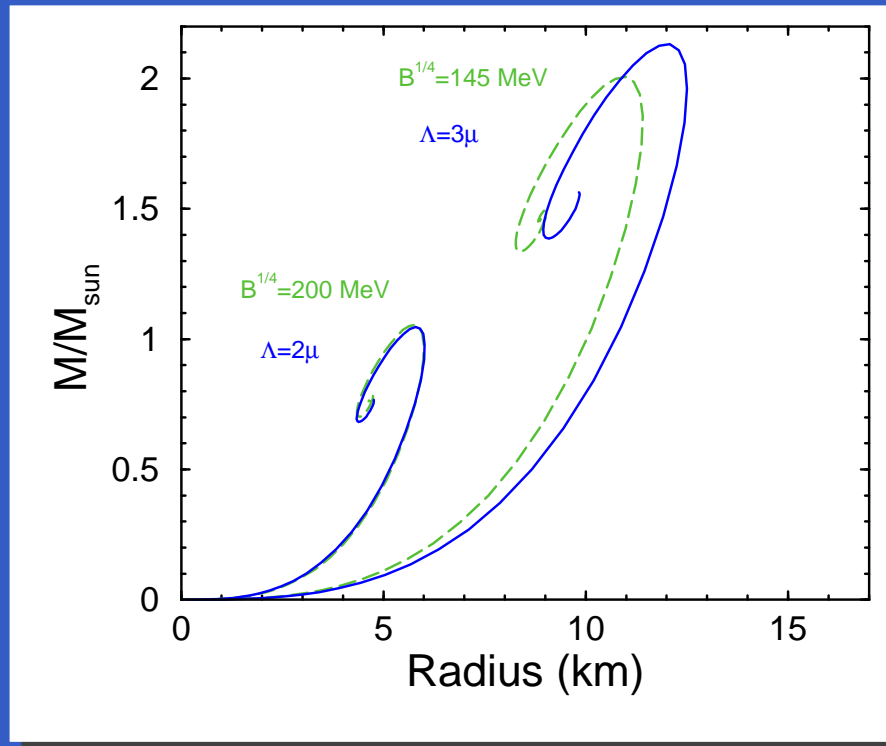
- use Nambu–Jona-Lasinio model for describing quark matter
- describes both dynamical quark masses (quark condensates σ) and the color-superconducting gaps Δ (Rüster et al. (2005))
- parameters: cutoff, scalar and vector coupling constants G_S , G_V , diquark coupling G_D , 't Hooft term coupling K
- fixed to hadron masses, pion decay constant, free: G_D and G_V

Phases in Quark Matter (Rüster et al. (2005))



- first order phase transition based on symmetry arguments!
- phases of color superconducting quark matter in β equilibrium:
- normal (unpaired) quark matter (NQ), two-flavor color superconducting phase (2SC), gapless 2SC phase, color-flavor locked phase (CFL), gapless CFL phase, metallic CFL phase
- (Alford, Rajagopal, Wilczek, Reddy, Buballa, Blaschke, Shovkovy, Drago, Rüster, Rischke, Aguilera, Banik, Bandyopadhyay, Pagliara, ...)

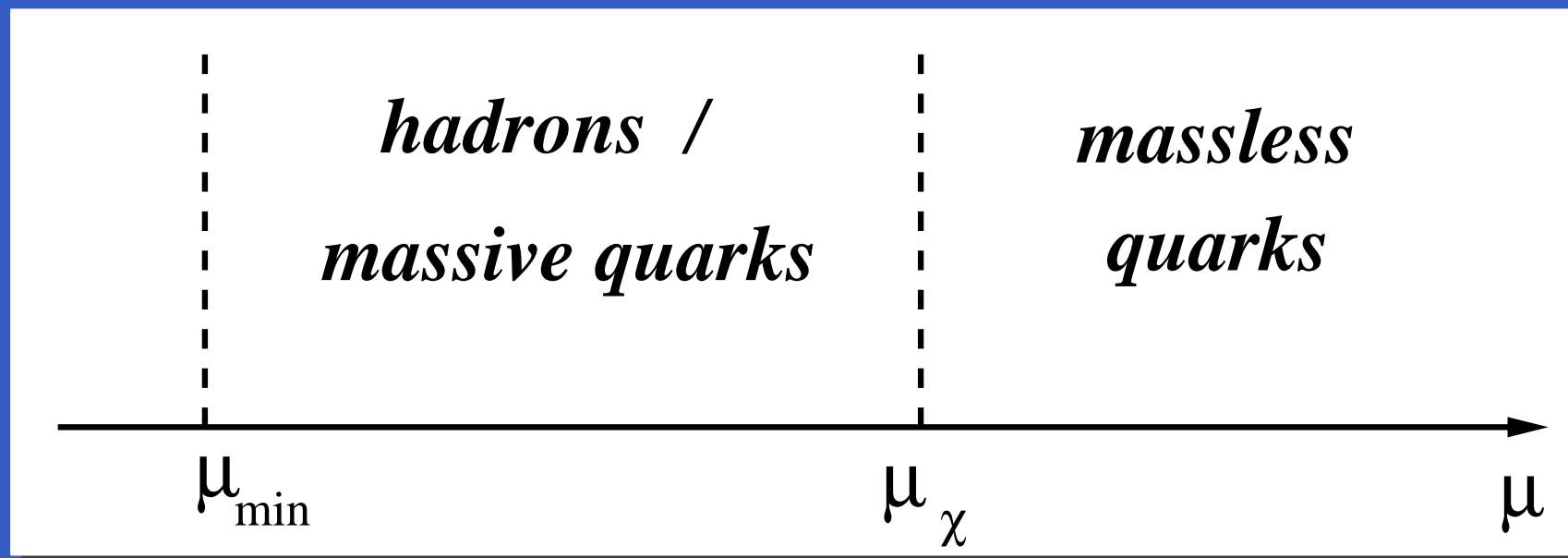
Mass-radius and maximum density of pure quark stars



- green curves: MIT bag model
- blue curves: perturbative QCD calculations
(Fraga, JSB, Pisarski 2001)

- case $\Lambda = 2\mu$: $M_{\max} = 1.05 M_{\odot}$, $R_{\max} = 5.8 \text{ km}$, $n_{\max} = 15 n_0$
- case $\Lambda = 3\mu$: $M_{\max} = 2.14 M_{\odot}$, $R_{\max} = 12 \text{ km}$, $n_{\max} = 5.1 n_0$
- other nonperturbative approaches: Schwinger–Dyson model (Blaschke et al.), massive quasiparticles (Peshier, Kämpfer, Soff), NJL model (Hanauske et al.), HDL (Andersen and Strickland), . . .
- note: pure quark stars can be very similar to ordinary neutron stars!

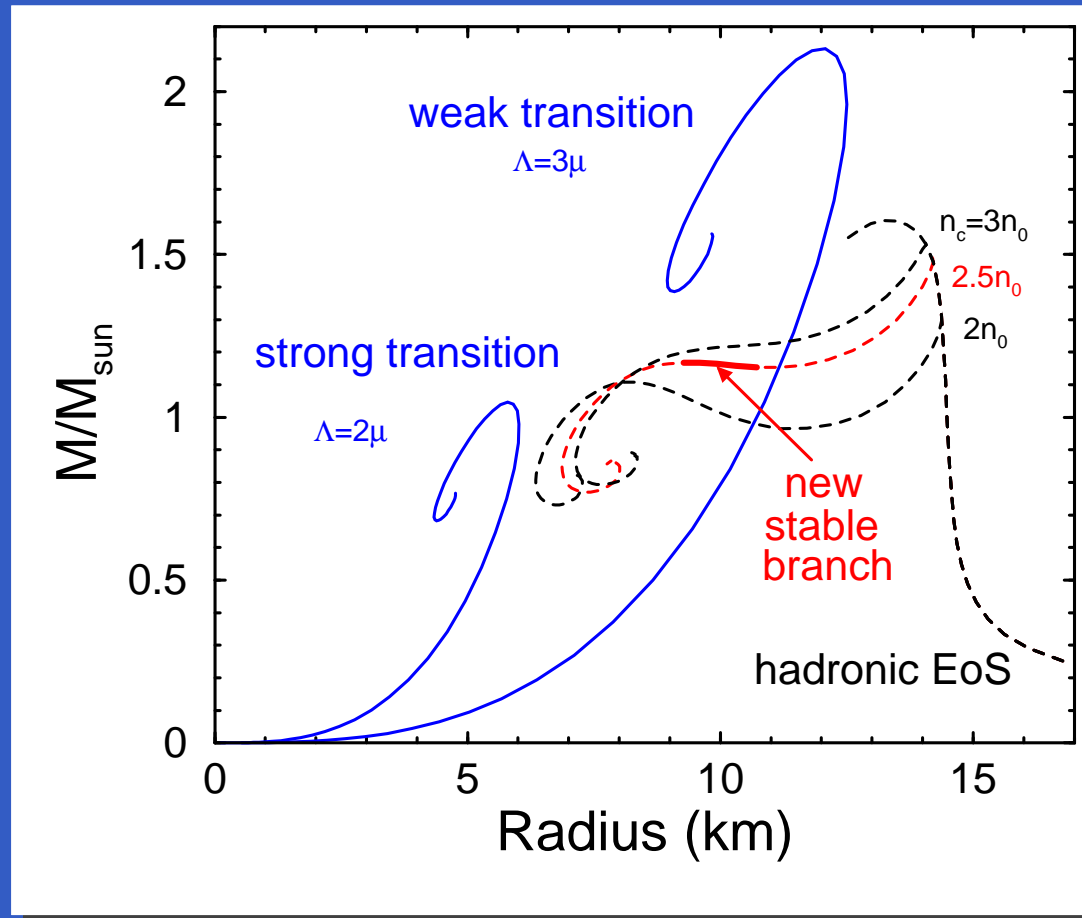
Matching to low density EoS



Two possibilities for a first-order chiral phase transition:

- A weakly first-order chiral transition (or no true phase transition),
⇒ one type of compact star (neutron star)
- A strongly first-order chiral transition
⇒ two types of compact stars:
a new stable solution with smaller masses and radii

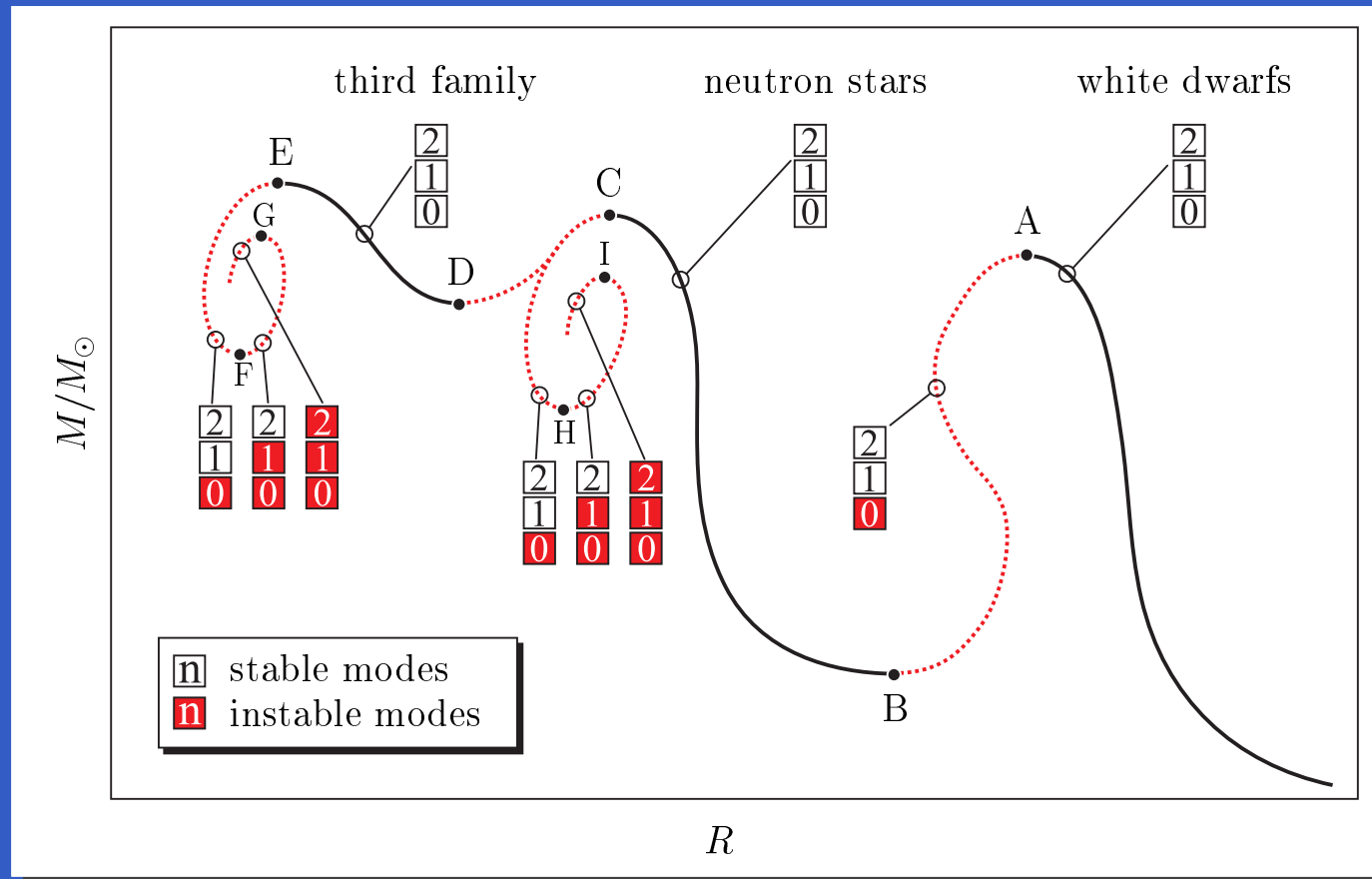
Quark star twins? (Fraga, JSB, Pisarski (2001))



- Weak transition: ordinary neutron star with quark core (hybrid star)
- Strong transition: third class of compact stars possible with maximum masses $M \sim 1 M_{\odot}$ and radii $R \sim 6$ km
- Quark phase dominates ($n \sim 15 n_0$ at the center), small hadronic mantle

Third Family of Compact Stars (Gerlach 1968)

(Glendenning, Kettner 2000; Schertler, Greiner, JSB, Thoma 2000)



- third solution to the TOV equations besides white dwarfs and neutron stars, solution is stable!
- generates stars more compact than neutron stars!
- possible for any first order phase transition!

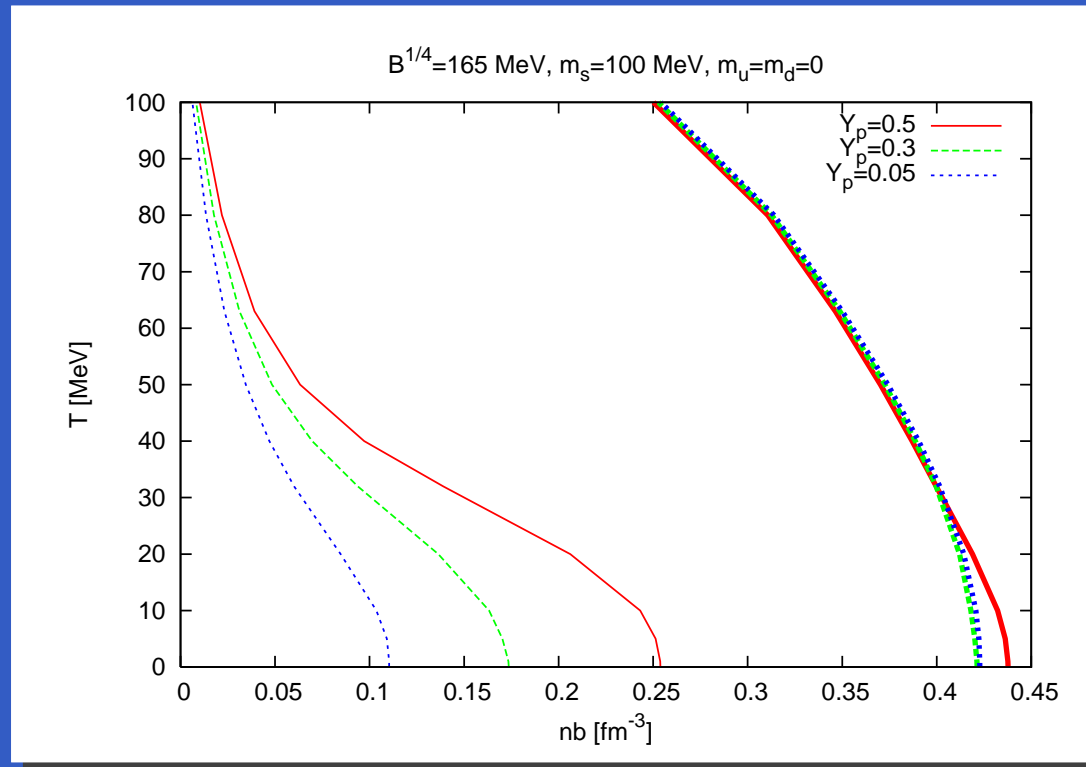
Signals for the QCD Phase Transition?

- mass-radius relation: rising twins (Schertler et al., 2000)
- spontaneous spin-up of pulsars (Glendenning, Pei, Weber, 1997)
- delayed collapse of a proto-neutron star to a black hole (Thorsson, Prakash, Lattimer, 1994)
- bimodal distribution of pulsar kick velocities (Bombaci and Popov, 2004)
- collapse of a neutron star to the third family? (gravitational waves, γ -rays, neutrinos)
- gravitational waves from colliding neutron stars?
- secondary shock wave in supernova explosions?

QCD phase transition in supernovae

Irina Sagert, Matthias Hempel, Giuseppe Pagliara, JSB, Tobias Fischer, Anthony Mezzacappa, Friedel Thielemann, Matthias Liebendörfer, arXive:0809.4225, submitted to PRL

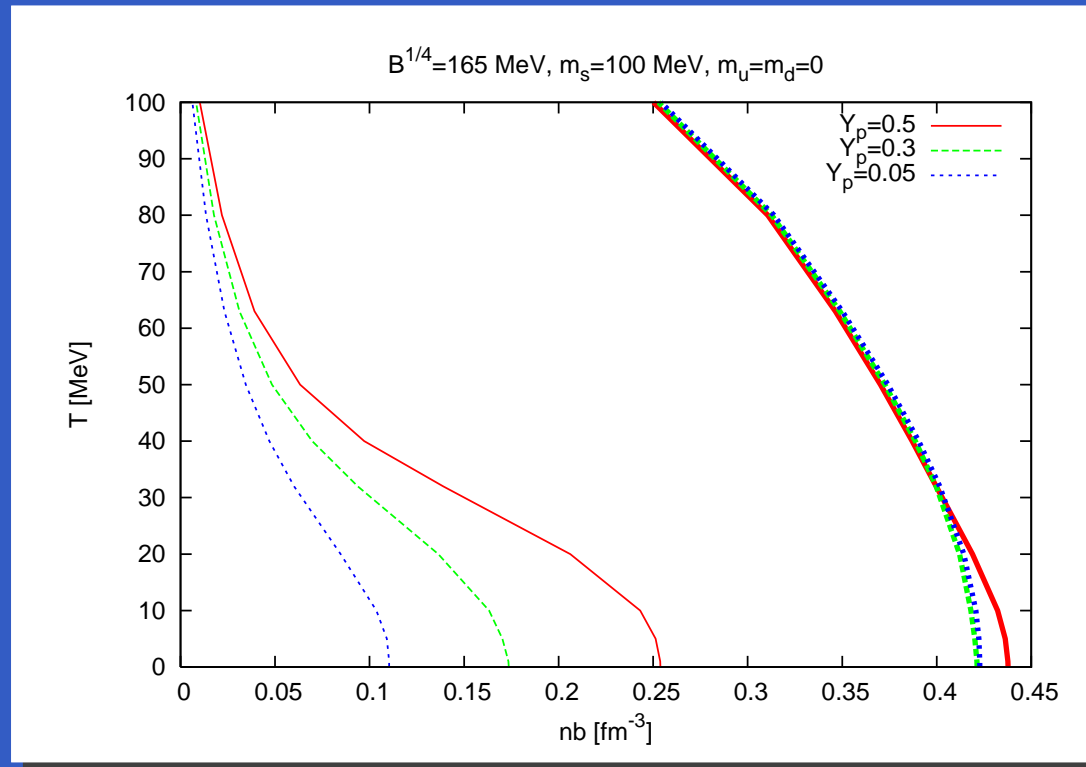
Phase Transition to Quark Matter for Astros



(Irina Sagert and Giuseppe Pagliara)

- quark matter appears at low density due to β -equilibrium
- low critical density for low Y_p due to nuclear asymmetry energy
- quark matter favoured at finite temperature
- supernova matter at bounce: $T = 20 - 30 \text{ MeV}$, $Y_p = 0.2 - 0.3$, $\epsilon \sim (1 - 1.5)\epsilon_0$

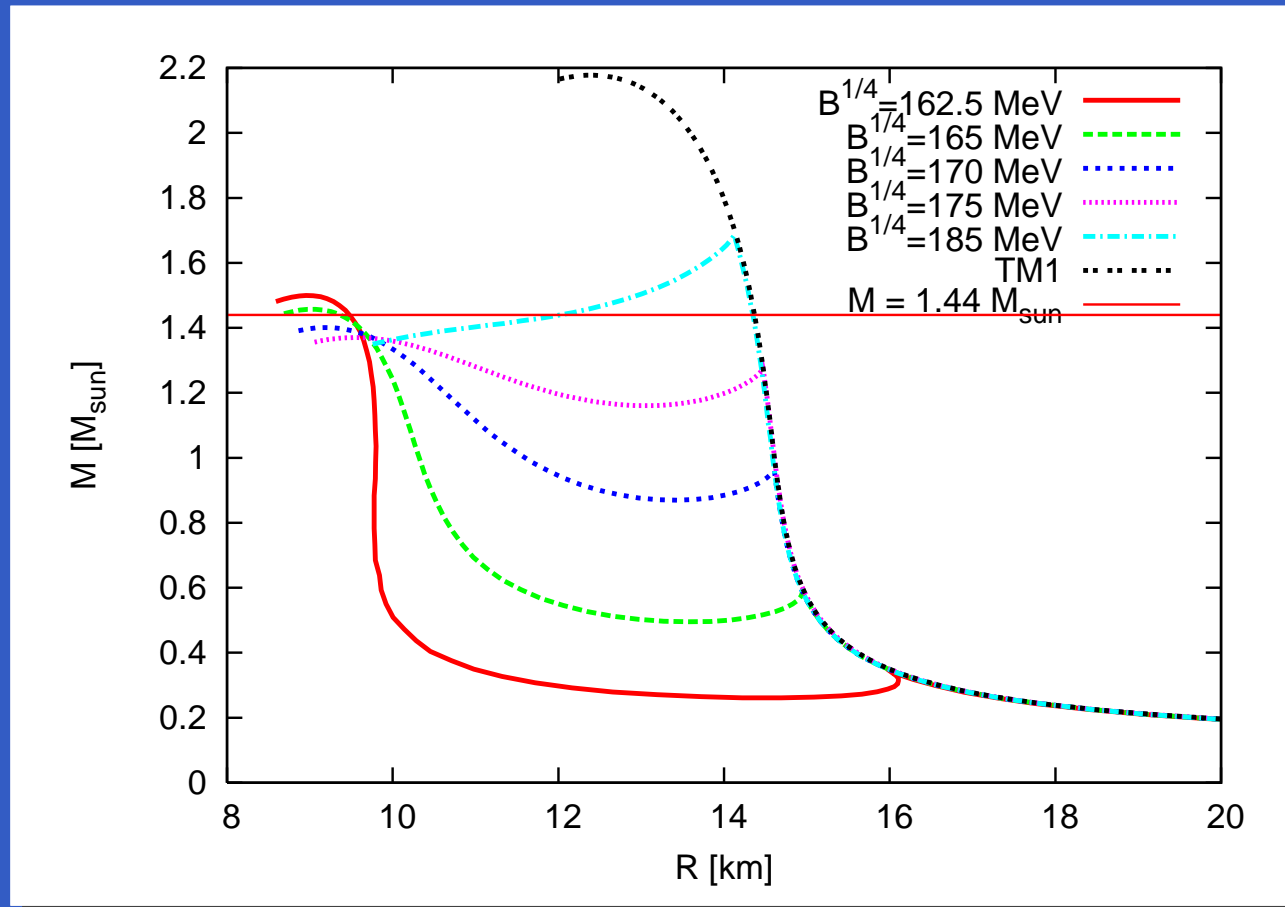
Phase Transition to Quark Matter for Astros



(Irina Sagert and Giuseppe Pagliara)

- quark matter appears at low density due to β -equilibrium
- low critical density for low Y_p due to nuclear asymmetry energy
- quark matter favoured at finite temperature
- supernova matter at bounce: $T = 20 - 30$ MeV, $Y_p = 0.2 - 0.3$, $\epsilon \sim (1 - 1.5)\epsilon_0$
- production of quark matter in supernovae at bounce possible!

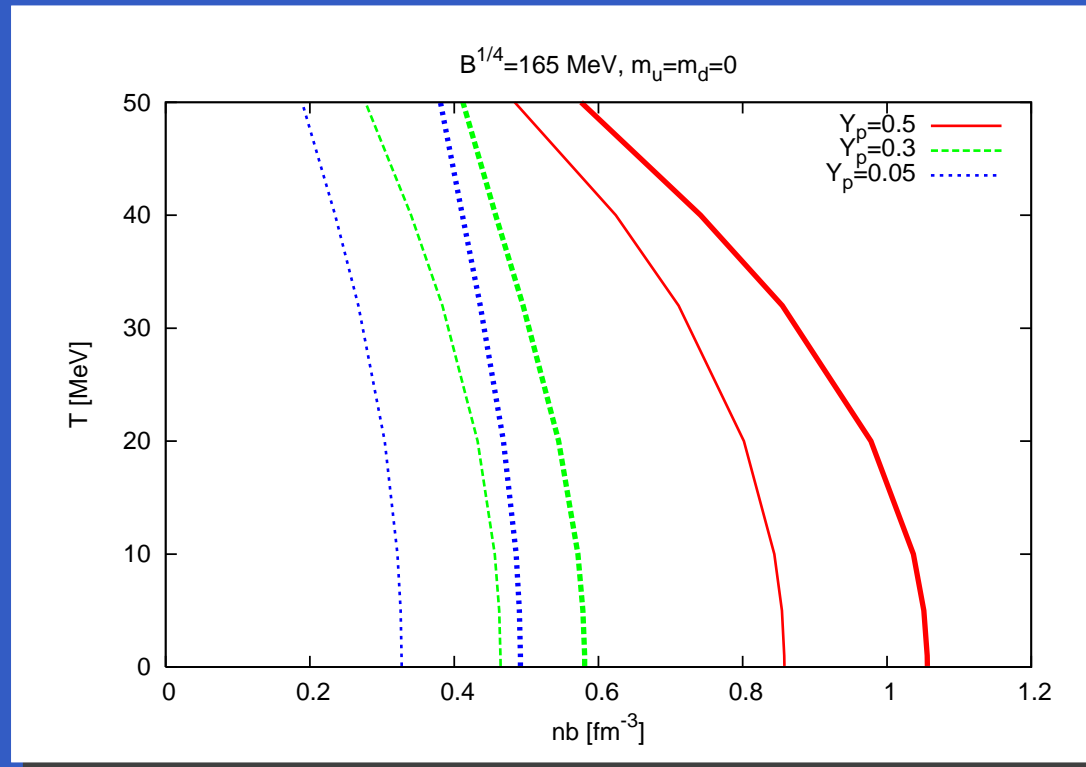
Check: Mass-Radius Diagram of Cold Neutron Stars



(Irina Sagert and Giuseppe Pagliara)

- presence of quark matter can change drastically the mass-radius diagram
- third family of solution for certain bag constants
- maximum mass: $1.56 M_{\odot}$ ($B^{1/4} = 162$ MeV), $1.5 M_{\odot}$ ($B^{1/4} = 165$ MeV)

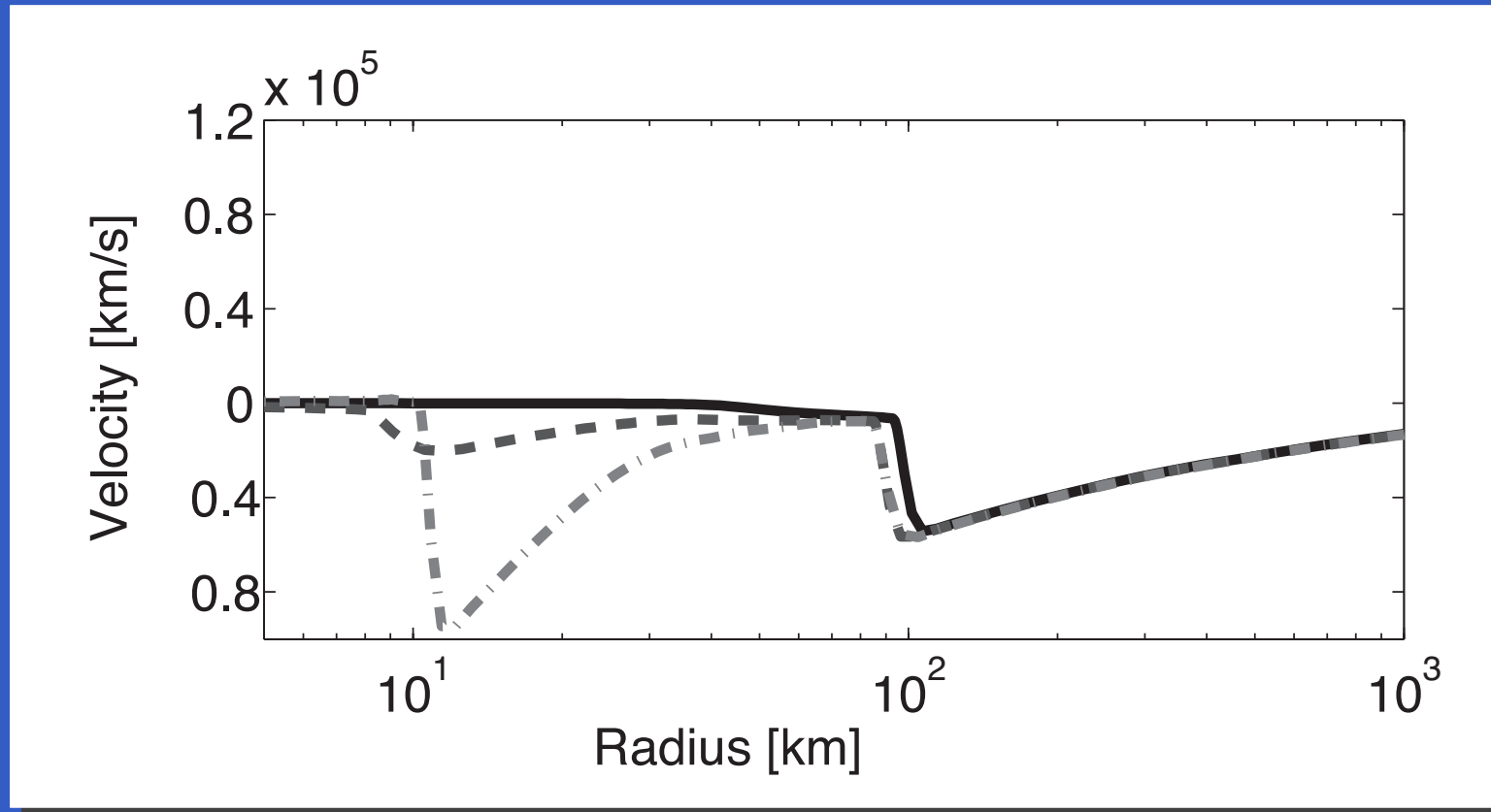
Check: Phase Transition for Heavy-Ion Collisions



(Irina Sagert and Giuseppe Pagliara)

- no β -equilibrium (just up-/down-quark matter)
- large critical densities in particular for isospin-symmetric matter (proton fraction $Y_p = 0.5$)
- production of ud-quark matter unfavoured for HICs at small T and high density
- no contradiction with heavy-ion data!

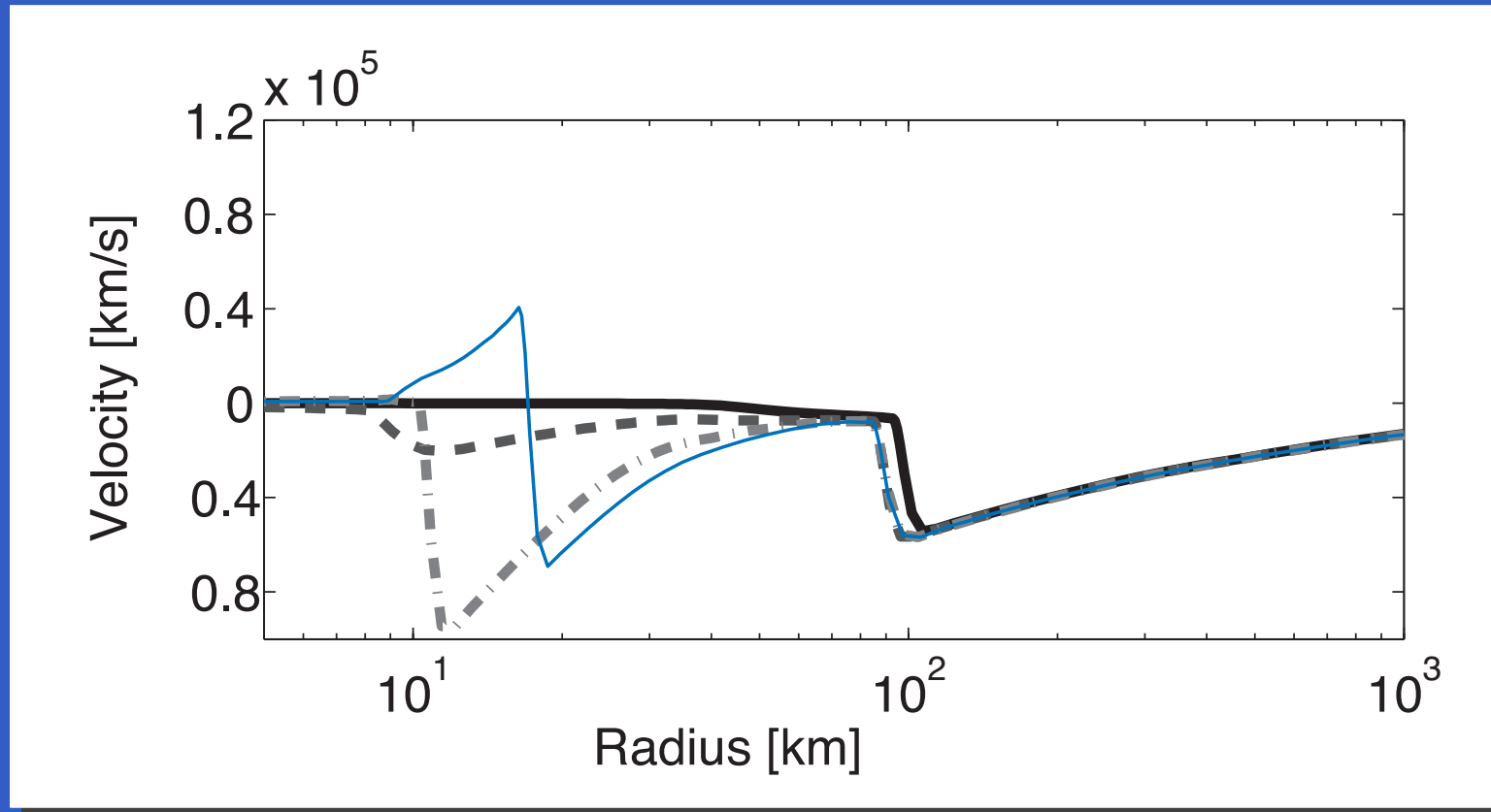
Implications for Supernovae – Explosion!



(Sagert, Hempel, Pagliara, JSB, Fischer, Mezzacappa, Thielemann, Liebendörfer, 2008)

- velocity profile of a supernova for different times (around 250ms)
- formation of a core of pure quark matter produces a second shock wave

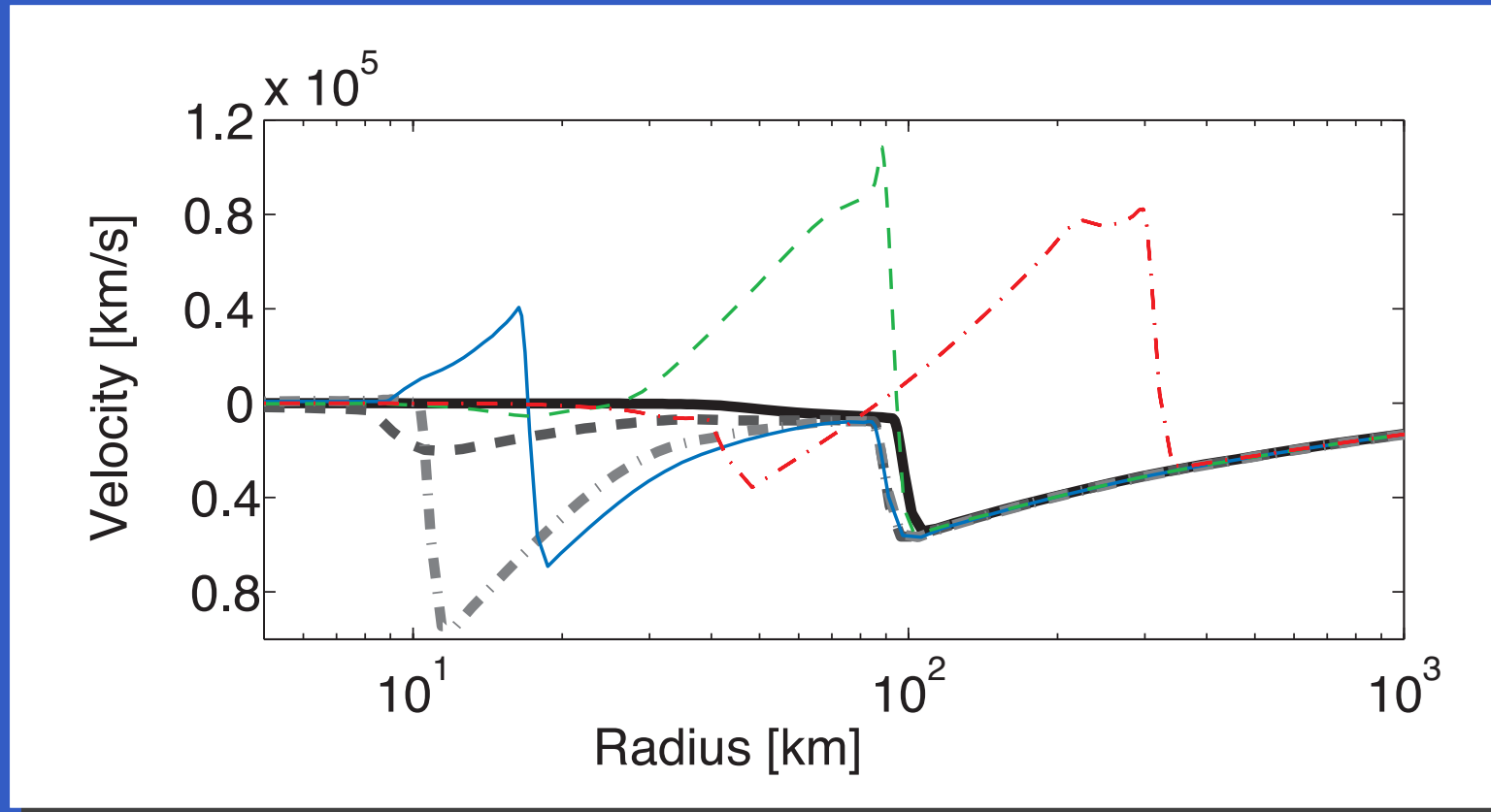
Implications for Supernovae – Explosion!



(Sagert, Hempel, Pagliara, JSB, Fischer, Mezzacappa, Thielemann, Liebendörfer, 2008)

- velocity profile of a supernova for different times (around 250ms)
- formation of a core of pure quark matter produces a second shock wave

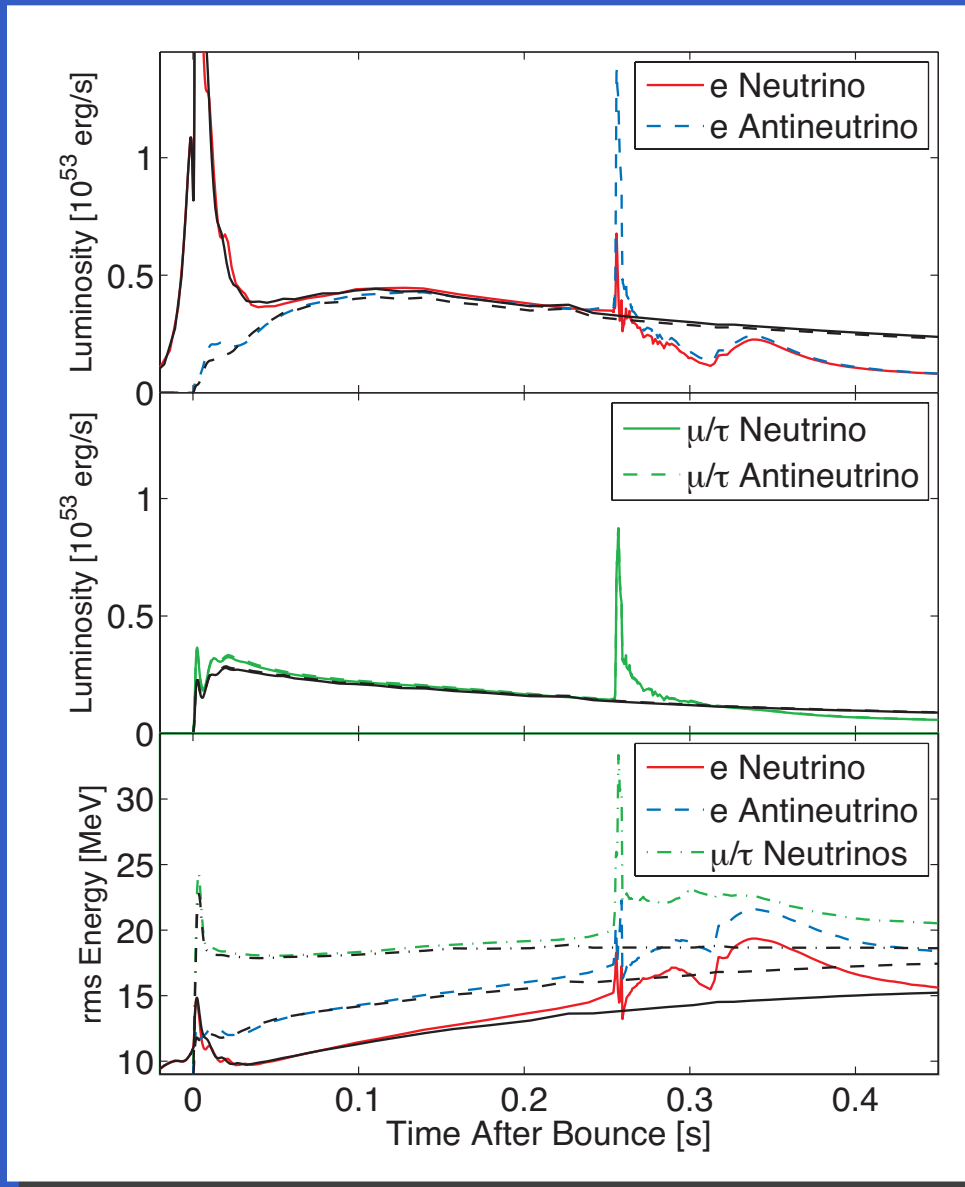
Implications for Supernovae – Explosion!



(Sagert, Hempel, Pagliara, JSB, Fischer, Mezzacappa, Thielemann, Liebendörfer, 2008)

- velocity profile of a supernova for different times (around 250ms)
- formation of a core of pure quark matter produces a second shock wave
- leads to a successful explosion!

Implications for Supernova – Neutrino-Signal!



- temporal profile of the emitted neutrinos out of the supernova
- thick lines: without, thin lines: with a phase transition
- pronounced second peak of anti-neutrinos due to the formation of quark matter
- peak location and height determined by the critical density and strength of the QCD phase transition!!

(Sagert, Hempel, Pagliara, JSB, Fischer, Mezzacappa, Thielemann, Liebendörfer, 2008)

Summary

- quark matter can be present in the core of neutron stars
- QCD phase transition can lead to a new family of compact stars
- quark matter can be formed in supernovae, even shortly after the first bounce
 - leads to a successful explosion (with enough explosion energy in the shock)
 - forms a second peak in the (anti-)neutrino signal
 - implications for gravitational wave signal?
 - and r-process nucleosynthesis?

Thanks to:

my research group in Heidelberg:

- Dr. Giuseppe Pagliara
(gamma-ray bursts, SN EoS, CFL quark stars)
- Dr. Basil Sa'd
(r-mode instability, gravitational wave emission, csc phases)
- Dipl.-Phys. Till Boeckel
(QCD phase transition and structure formation)
- Dipl.-Phys. Matthias Hempel
(full supernova equation of state)
- Dipl.-Phys. Irina Sagert
(EoS from heavy ion physics, SN EoS, proto-neutron stars)
- Rainer Stiele (starts his PhD 03/2009 in HD)
(interacting dark matter in the early universe)