

QCD2QGP

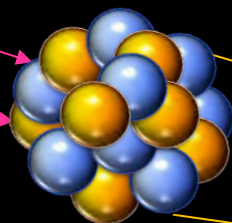
初田哲男
(理化学研究所 数理創造プログラム)



核子 $\sim 10^{-13}$ [cm]



原子核 $\sim 10^{-12}$ [cm]



重イオン衝突



中性子星衝突



27a-SJ-2

ブルックヘブンAGS加速器における高エネルギー重イオン衝突実験

BNL/筑波大

三明 康郎

High Energy Heavy Ion Experiments At BNL-AGS

BNL/Tsukuba

Yasuo MIAKE

1986年、高エネルギー重イオン物理は、新しい時代を迎えた。核子あたり約2GeV（ペバラック）がそれまでの最高エネルギーであったが、ブルックヘブン研究所では、核子あたり15GeVの ^{28}Si ビーム、ヨーロッパのCERNでは、核子あたり60-200GeVの ^{22}S ビームの加速が開始されたのである。高エネルギー重イオン衝突実験から人々が期待しているもっとも劇的な産物は、クォークグルオンプラズマの生成であろう。良く知られているように、核子は3個のクォークから成っているが、クォークは核子から単独で飛び出すことが出来ない。ところが、核物質を高密度にして、核子間距離を核子の拡がり程度になるまで圧縮することが出来ると、核子の境界がもはや意味を持たなくなりクォークは自由に動き出すと考えられる。この状態を原子におけるプラズマ状態のアナロジーから、クォークグルオンプラズマ（QGP）状態と呼ぶ。核物質を高温にした場合にも、パイ中間子が核子間で発生することにより、同様にクォークグルオンプラズマ状態が作られると考えられている。これらの予想は、量子色力学（QCD）の計算からも裏付けされている。

PHENIX Experiment at RHIC

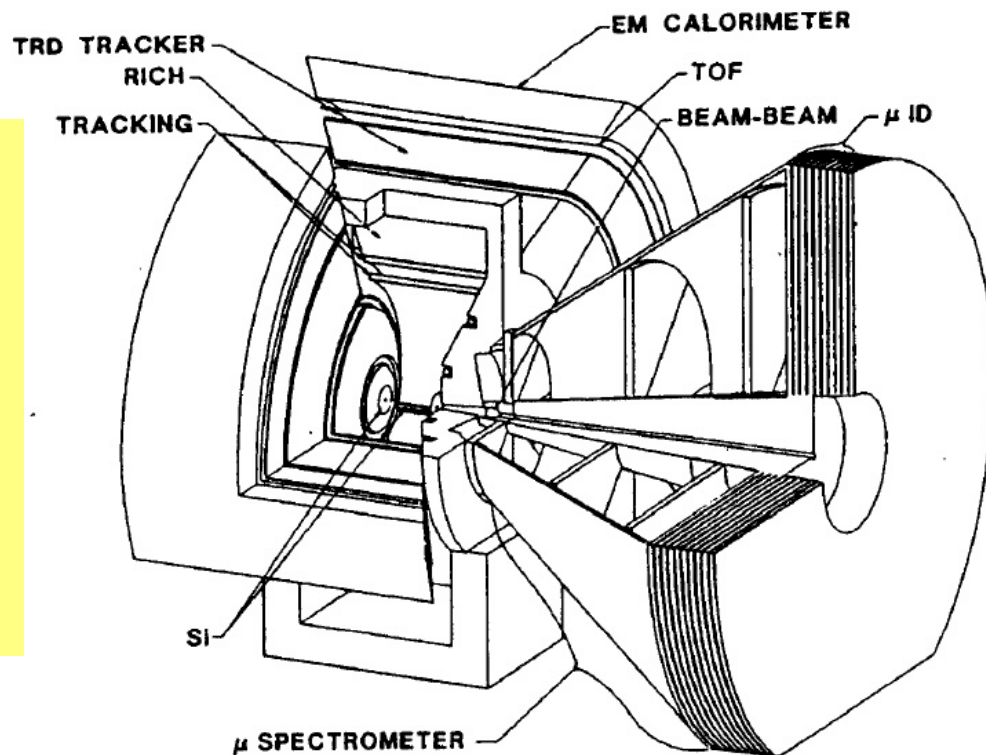
Univ. of Tsukuba / PHENIX-J

Yasuo MIAKE

米国ブルックヘブン国立研究所では世界初の衝突型高エネルギー重イオン加速器(Relativistic Heavy Ion Collider)の建設が進められており、1997年から核子あたり100GeVの金の原子核同志の衝突実験が可能となる。反応中心部の数百fm³の領域においては、3~6GeV/fm³ものエネルギー密度が達成されると予測されている。これは、かつて人類が手にしたことのない最高エネルギー密度であることは言うまでもないが、QCDが予測するクォーク・グルオンプラズマ(QGP)相転移に必要なエネルギー密度をも十分に越えていると考えられている。RHICにおける実験の中心目標は、QGPを作り出し、その性質を調べることであるが、そのためには、何をどのように測れば良いのだろうか。RHICの衝突反応は非常に複雑で現在の理論では、正確に予測することが難しく、一つのシグナルからだけでは、明確にQGP生成を断言することはできない状況にある。そこで我々は、RHICにおいて予想されるなるべく多くのQGP生成のシグナルを同時に測定することをその主な戦略としている。即ち、我々の実験PHENIX (Photon Hadron and Electron in Nuclear Interaction eXperiment)では、原子核同志の衝突で生成されるレプトン対(ミュー粒子対、電子対)、光子、ハドロン(K中間子、パイ中間子、φ中間子、J/ψ中間子、反陽子等々)を分離検出して、衝突で達成されたエネルギー密度(をもっともよく表すと考えられる測定量)の関数として約7~8種のシグナルを観測する。もしこれらの観測でQGP生成を示すアノマリーを同時に検出できれば、確固たるQGP生成の証拠とすることができよう。

QGP相から大量に熱的放射されると考えられる光子、さらに仮想光子からのレプトン対は、衝突初期に達成された温度や密度に関する情報をもたらす。また、 ρ , ω , ϕ の生成量や崩壊分岐比などの変化からも高温高密度状態、さらに、その持続時間等の情報を得ることができる。J/ ψ 中間子を用いて、QGP相に於けるデバイ遮蔽の効果を調べる。 π^\pm , K^\pm , p^\pm 等のハドロン測定では、QGPによる $\langle p_t \rangle$ の増大、ストレンジネス生成量増大の効果を見る。パイ中間子やK中間子のHBT測定によって、QGP相からハドロン相に戻る様子を調べることができ、QGP生成のシグナルが得られる。

PHENIXは、9カ国、45研究機関、約200名から成る国際的なプロジェクトであるが、現時点に於て、日本からは約40名が参加し、日本人研究者は、スポークスマン、執行委員会、そして測定器デザイングループ等に於て大きな役割を果たしている。多くの研究者の参加を呼びかけている。



PHENIX実験装置概念図



Quark Matter'97 Tsukuba Japan, December 1-5, 1997





Quark Matter '97

Thirteenth International Conference on
Ultra Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions

Tsukuba, Japan

December 1 - 5, 1997

Sponsored by the Yamada Science Foundation as the XLVIII Yamada
Conference

QM97 Organizing Committee

- Kohsuke YAGI(*), Univ. of Tsukuba
- Shoji NAGAMIYA(*), Columbia Univ.
- Junsei CHIBA, KEK
- Hideto EN'YO, Kyoto Univ.
- Hideki HAMAGAKI, INS, Univ. of Tokyo
- Tetsuo HATSUDA(**), Univ. of Tsukuba
- Ryugo HAYANO, Univ. of Tokyo
- Masayasu ISHIHARA, Univ. of Tokyo
- Tetsuo MATSUI, Yukawa Institute, Kyoto Univ.
- Yasuo MIAKE(**), Univ. of Tsukuba
- Osamu MIYAMURA, Hiroshima Univ.
- Yoshiharu MORI, INS, Univ. of Tokyo
- Yoshio SUMI, Hiroshima Univ.
- Akira UKAWA, Univ. of Tsukuba

* ; Co-chairman

** ; Scientific secretary

<https://www.racf.bnl.gov/Facility/qm97/>

ビッグバンを再現できたか？

——高エネルギー原子核衝突実験の成果——

杉立 徹

〈広島大学大学院理学研究科物理科学専攻 739-8526 東広島市鏡山 1-3 e-mail: sugitate@hepl.hiroshima-u.ac.jp〉

三明康郎

〈筑波大学物理学系 305-8577 つくば市天王台 1-1-1 e-mail: miake@tac.tsukuba.ac.jp〉

2000年2月10日、「QGP発見」あるいは「ビッグバン再現」という報道が世界中を駆け巡った。このニュースは、CERN（欧州合同原子核研究機関）で高エネルギー原子核衝突の研究を行ってきた7つの実験チームが合同で特別セミナーを開催し、理論家を交えて実験結果を総合的に検討した結果、新しいクォーク物質状態を世界で初めて生成したと発表したことに端を発する。本稿では、実験チーム（NA44 および WA98）の一員としてこの特別セミナーの内容を解説する。

特別セミナーは“A new state of matter; Results from the CERN Lead-Beam Programs”という題名で、2月10日午前9時30分（欧州時間）からCERNにおいてマイアーニ所長出席のもと開かれた。最初にハインツが理論家的見地から全体像を説明したあと、4名の実験家が7つの実験チーム²⁾（NA44, NA45, NA49, NA50, NA52, WA97/NA57, WA98）の研究成果³⁾を手分けして報告した。各報告に対して質疑討論が繰り返され、最後に所長が総括した。講演内容には重複があるので、講演順あるいは講演者の話の組立にこだわらず、ここではセミナーの全容を私たちの考え方で再構成して解説する。

私たちは、重心系エネルギー $\sqrt{s}=5\text{ GeV}$ /核子の原子核衝突を米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のAGS加速器実験で学び、CERNのSPS加速器実験で $\sqrt{s}=17\text{ GeV}$ /核子の領域を研究してきた。文部省日米科学技術協力事業の支援を受け、BNLのRHIC加速器実験PHENIXで、さらに1桁エネルギーの高い $\sqrt{s}=200\text{ GeV}$ /核子の領域でクォーク多体系の示す新しい現象を研究する。¹⁾ SPS実験で見つかった不思議な現象は、おそらくQGPの尻尾を引っかけたのであろう。RHIC実験で、より直接的な証拠を明確にすることができるであろう。QGPあるいはQCDの非摂動力に基づく新しい現象が確認されれば、クォーク多体系を直接研究するこの分野は飛躍的にその重要性を高める。PHENIX実験において多くのことが発見されると期待するが、このとき、さらに1桁エネルギーの高い領域、すなわちLHC加速器の領域($\sqrt{s}=5.5\text{ TeV}$ /核子)で、その全く新しいクォーク物質を系統的に研究すべきである。

RHIC の物理

三明康郎 (筑波大学・数理物質科学研究科)¹

我々の宇宙を構成する素粒子 (ハドロン) は、クォークとグルオンが閉じ込められた状態と考えられており、これらクォーク、グルオンの運動状態は量子色力学によって記述される。量子色力学の計算によれば、非常に高温高密度になると、閉じ込めから開放されて、クォークとグルオンのプラズマ状態 (QGP) に相転移すると予測されている。ビッグバン宇宙の極めて初期には宇宙は QGP 状態として存在し、その後相転移を起こしてハドロンが生成されたと考えられている。物質の存在形態として全く未知なる QGP の研究は多くの分野を巻き込んだ研究課題である。

高エネルギー重イオン衝突では原子核が激しく衝突し、そのエネルギーが原子核程度の小さな空間領域に放出される。高エネルギー重イオン衝突は地上で高温高密度状態を作り出すユニークな方法である。高温高密度状態となった反応中心部では、通常物質から QGP 状態への相転移をひきおこすであろうと予測されている。量子色力学の数値計算によると、相転移の起こる臨界温度は 150 MeV 程度と考えられており、相対論的高エネルギー重イオン衝突では、この臨界を超えると期待される。米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では世界初の衝突型高エネルギー重イオン加速器 (RHIC; Relativistic Heavy Ion Collider) が 2000 年に完成し実験が始まった。RHIC における核子あたり 100 GeV の金原子核同士の衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV) において測定が開始され、生成粒子の数密度や横方向生成エネルギー密度から推定された衝突到達エネルギー密度として、約 10 GeVfm^{-3} が得られた。このエネルギー密度は理論的に予測されている QGP の臨界温度を優に超えており、QGP 生成を示唆する様々な興味深い実験結果が得られている。



QGP Book (Yagi-Hatsuda-Miake, 2005)
の宣伝用写真

Quark-Gluon Plasma

KOHSUKE YAGI,
TETSUO HATSUDA,
AND YASUO MIAKE

CAMBRIDGE MONOGRAPHS
ON PARTICLE PHYSICS, NUCLEAR PHYSICS
AND COSMOLOGY

23

2005/12/15発売



QUARK MATTER 2015

The XXVth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions



歴史的背景 I:

宇宙線による中間子多重発生

1948: 制動輻射モデル (Lewis, Oppenheimer, Wouthuysen)

1949,1952: 中間子流体の乱流モデル (Heisenberg)

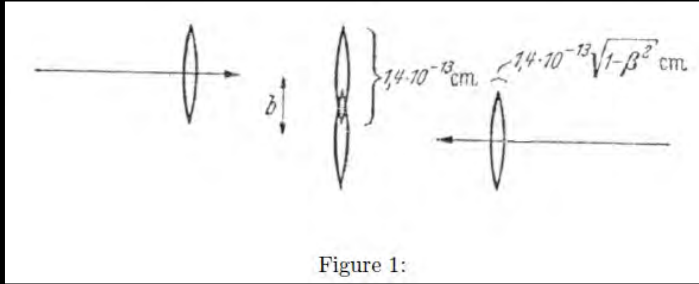


Figure 1:

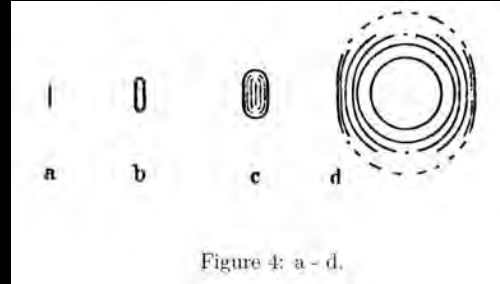
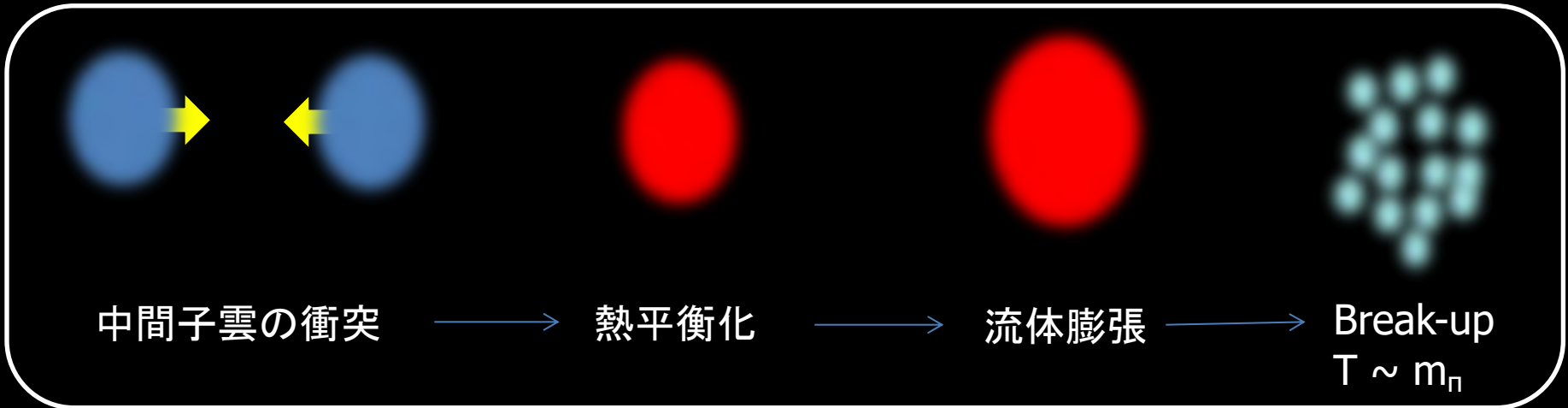
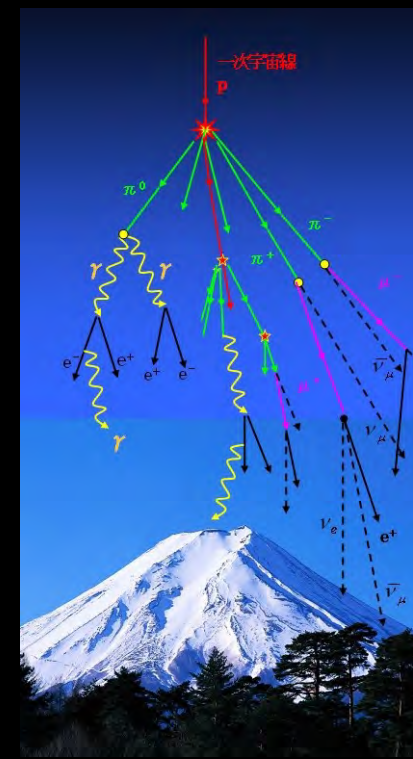


Figure 4: a - d.

1950: 火の玉統計モデル (Fermi)

1953: 相対論的流体モデル (Landau)

1957: 場の量子論と流体モデル (並木-磯、江沢-友沢-梅沢)

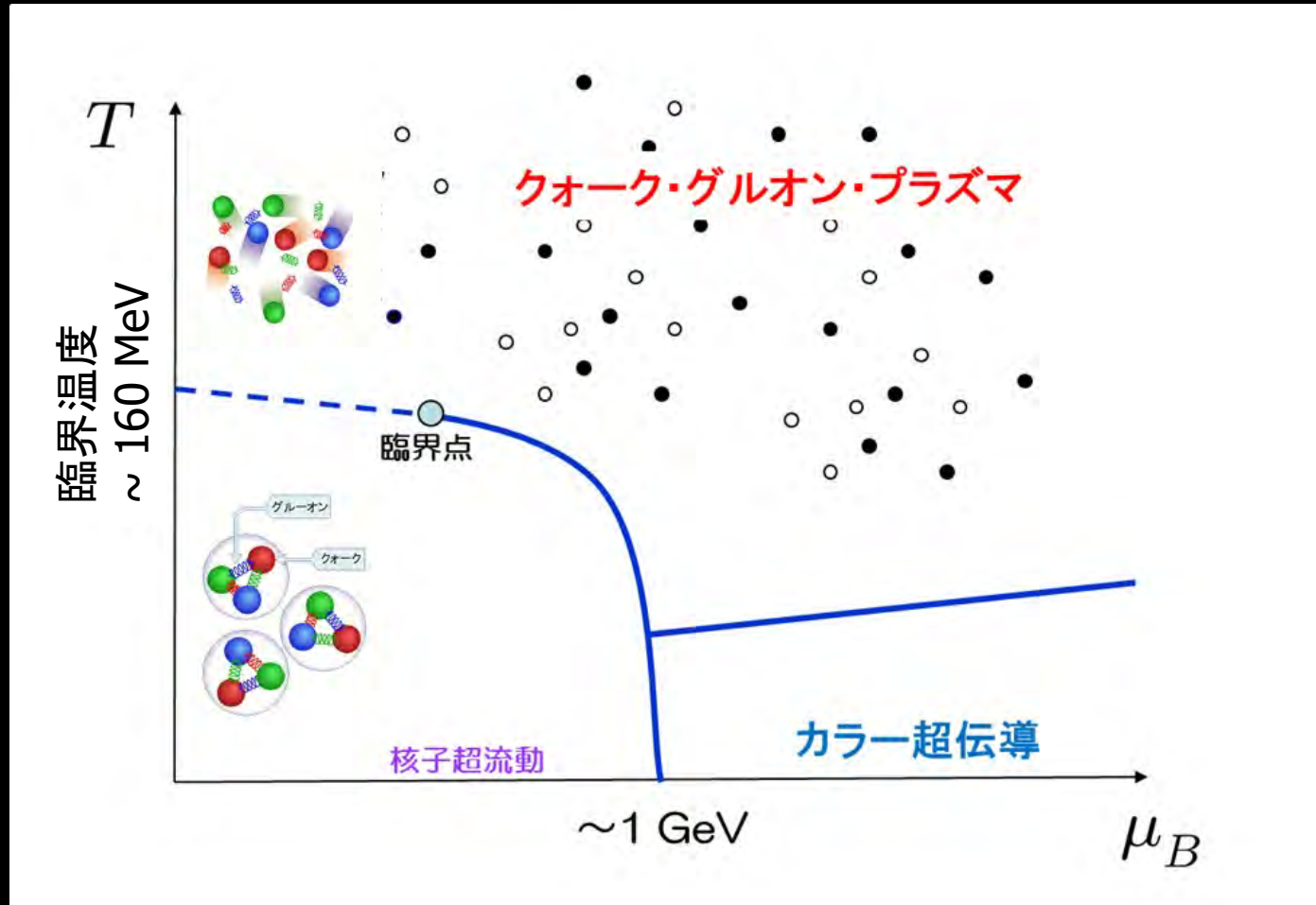


Ref. 原子核研究 流体特集号 vol.54 suppl.3 2010

「相対論的流体力学と高エネルギー重イオン反応: 来し方行く末」 (特に、松井哲男氏、磯親氏の記事)

クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)相の可能性

Collins & Perry (1975), Cabbibo & Parisi (1975)

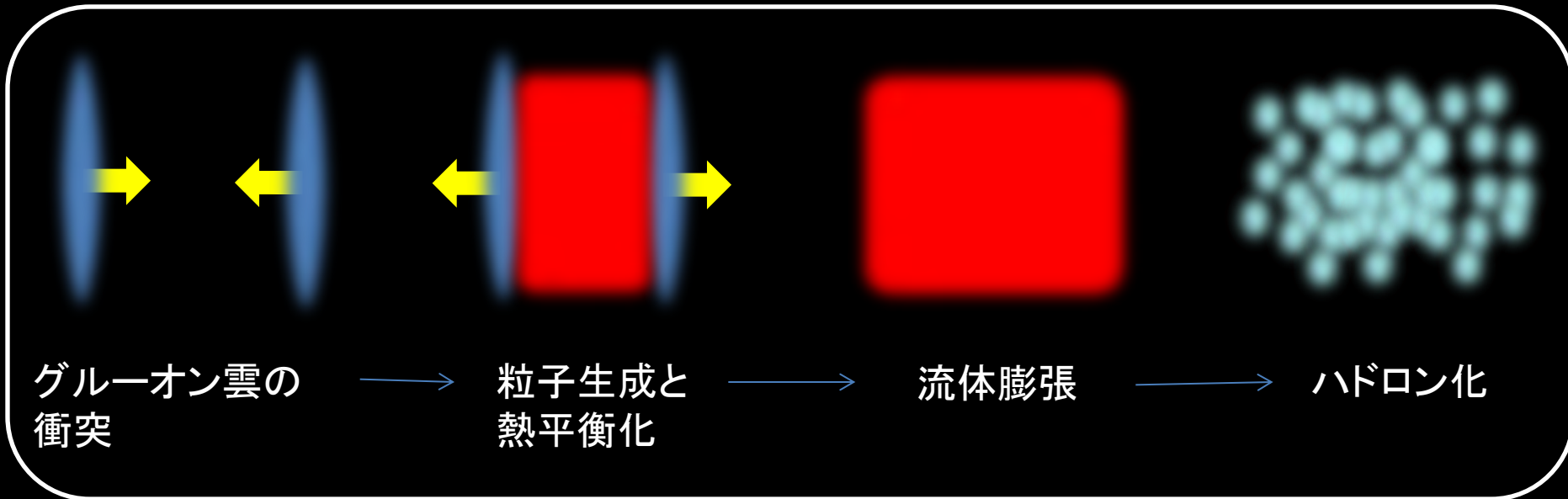
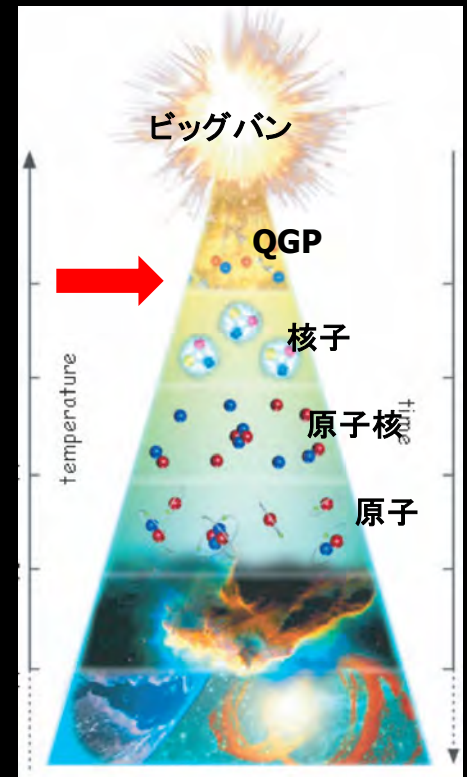


- ・ 宇宙初期 : $0 < t < 10^{-4}$ sec, $T > 1.4 \times 10^{12}$ K
- ・ 重イオン衝突: $0 < t < 10^{-22}$ sec, $T > 1.4 \times 10^{12}$ K

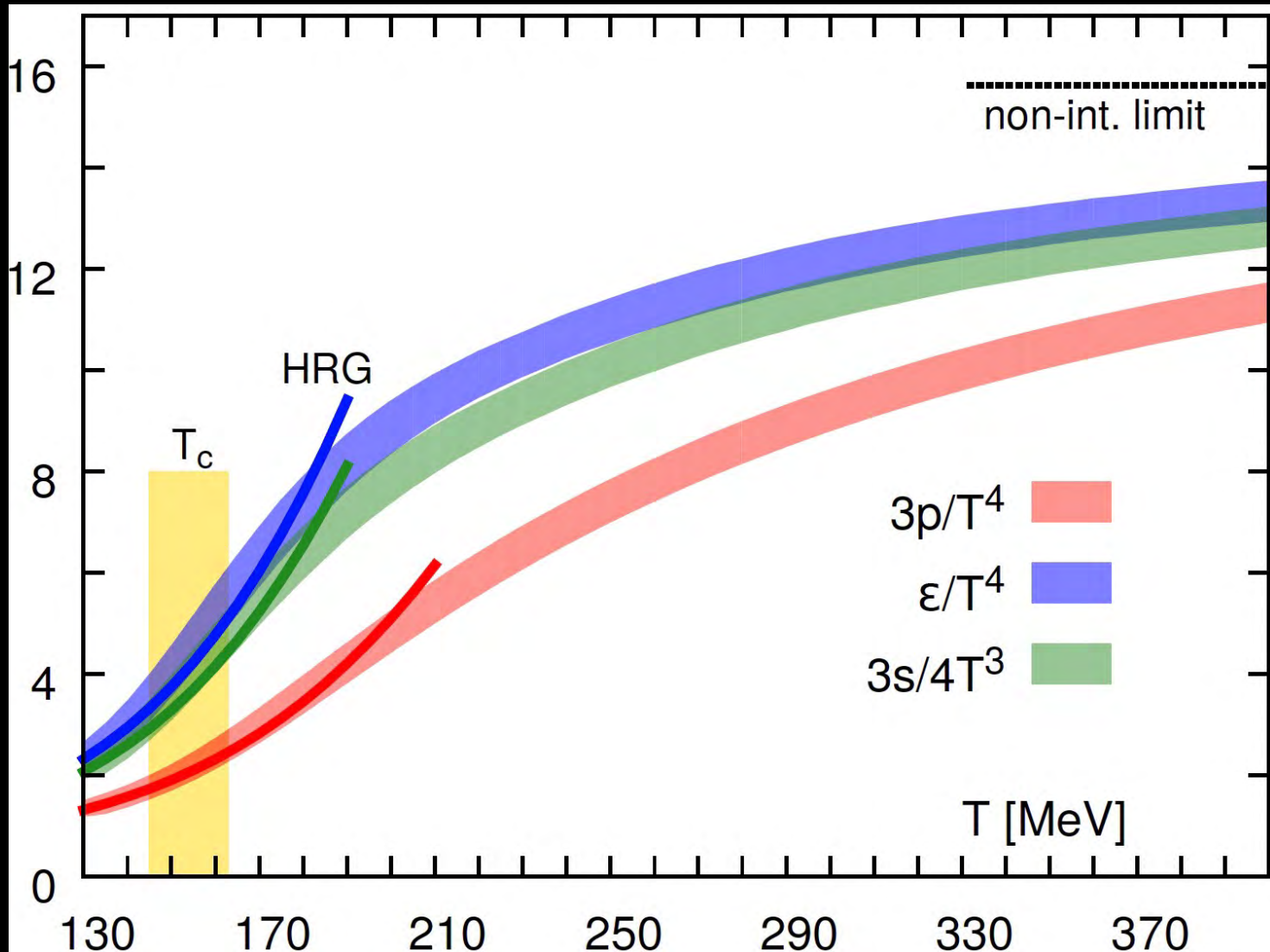
歴史的背景 II:

高エネルギー重イオン衝突とQGP

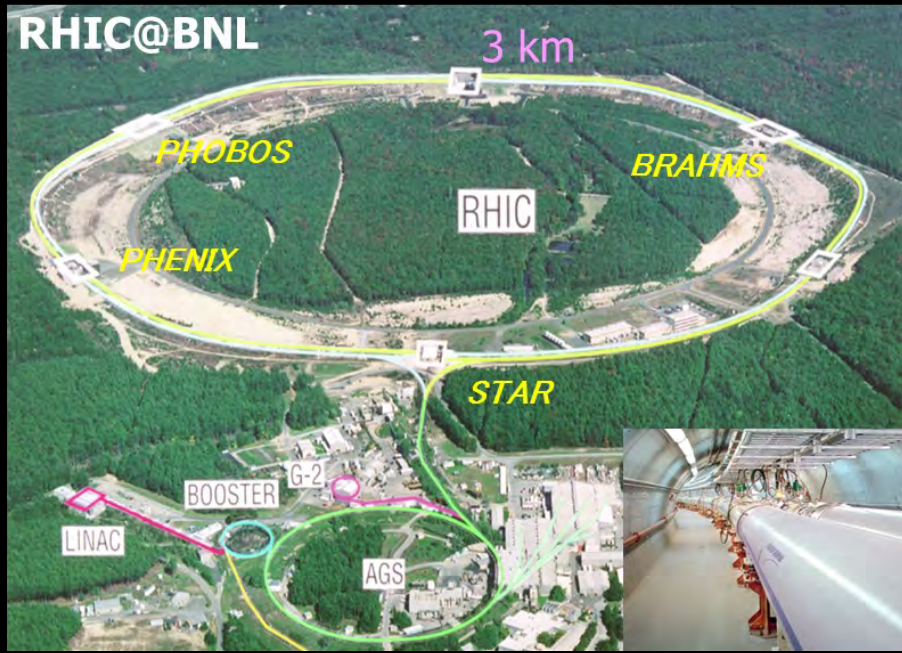
- 1983: QGP生成と相対論的流体モデル (Bjorken)
- 1994: カラーガラス凝縮
- 2001: 3D 相対論的流体力学の数値シミュレーション
- 2005: QGP粘性とゲージ/重力対応
- 2006: QCD相転移の次数 (格子QCD)
- 2010: QCD状態方程式 (格子QCD)



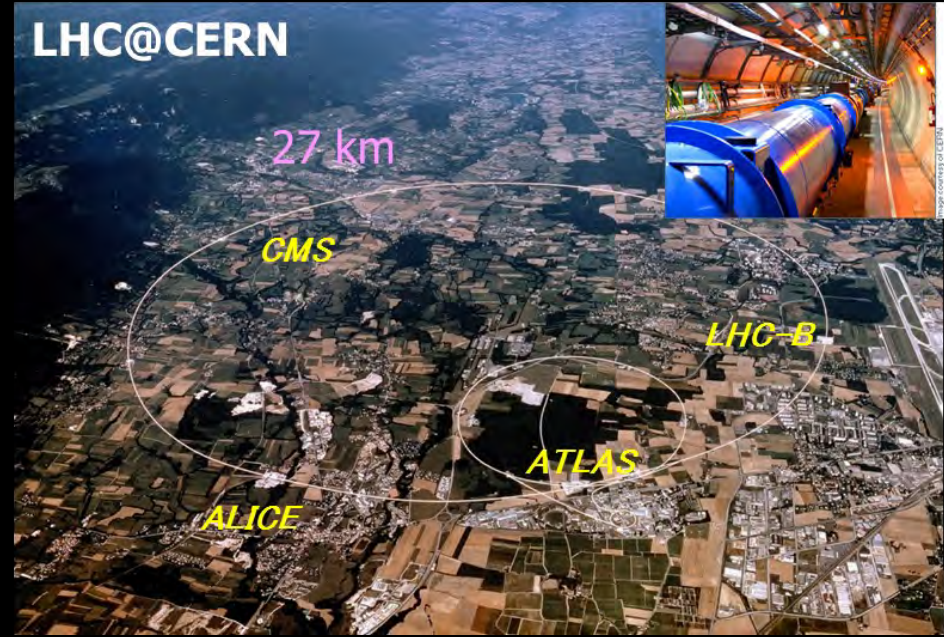
格子ゲージ理論



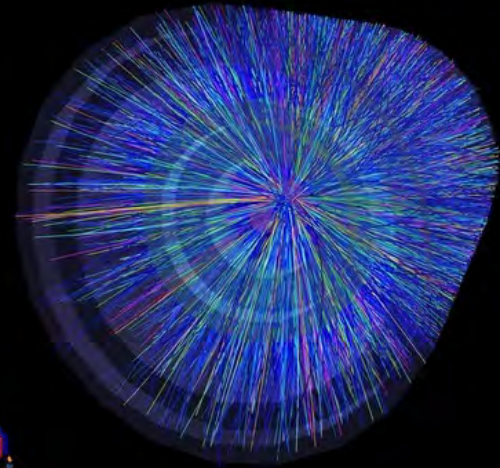
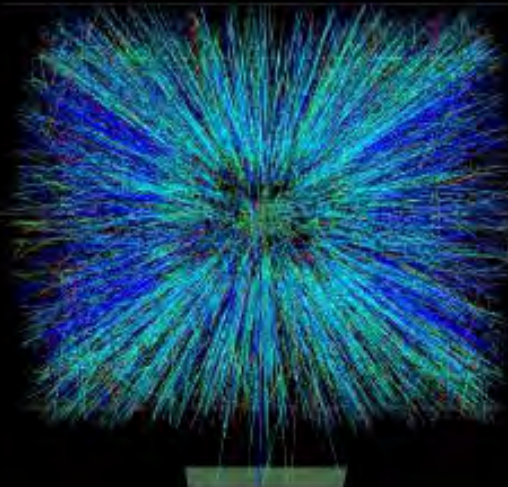
高エネルギー重イオン衝突加速器



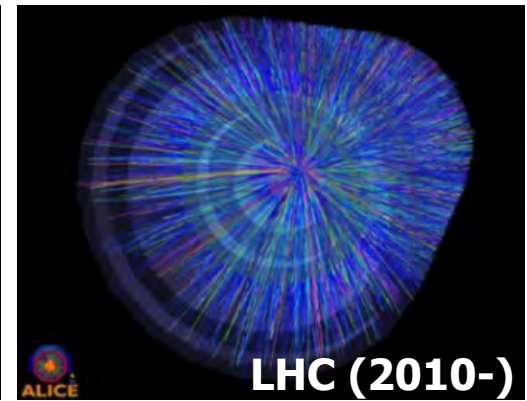
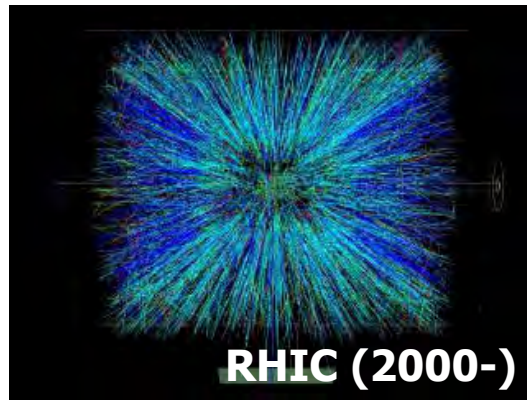
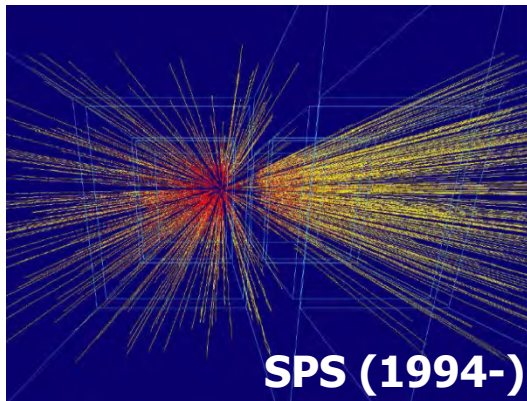
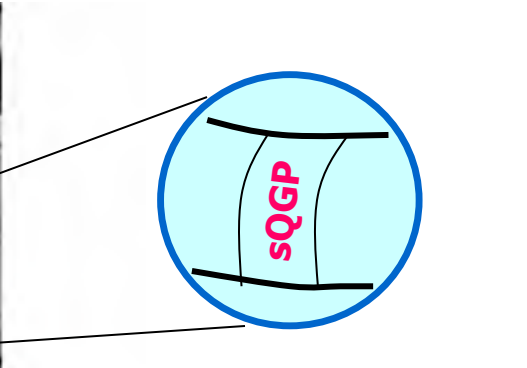
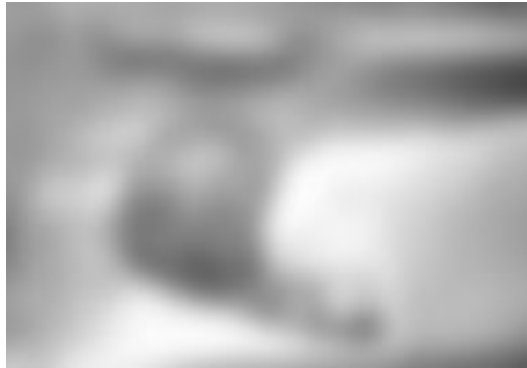
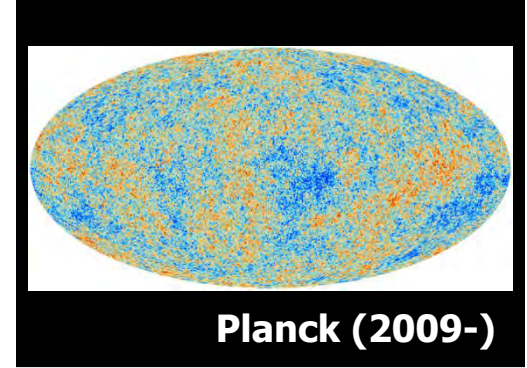
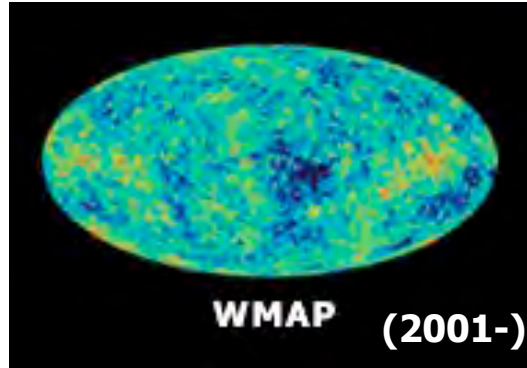
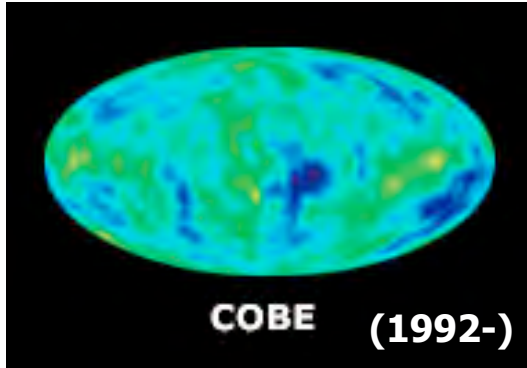
金-金衝突@RHIC



鉛-鉛衝突@LHC

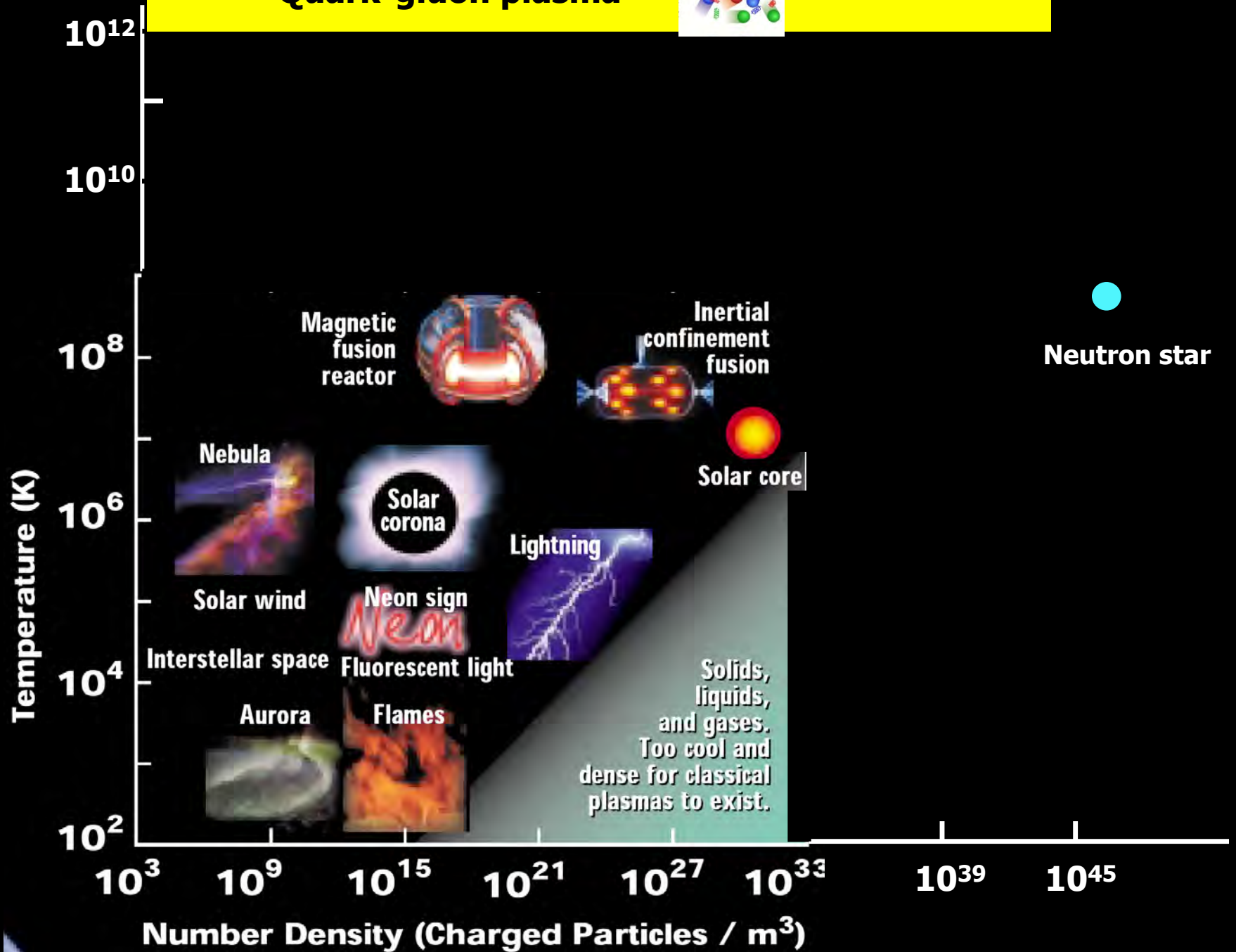
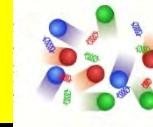


Big Bang



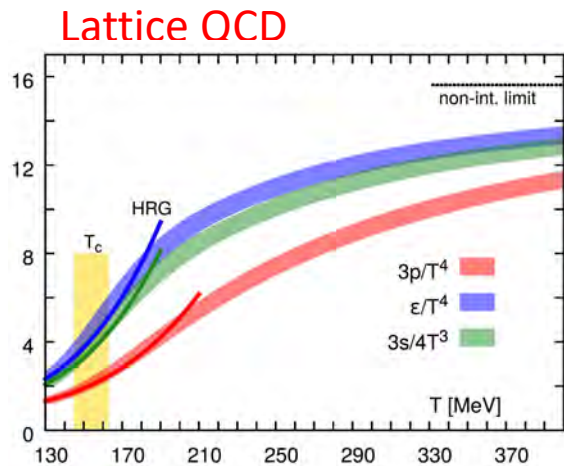
Little Bang

Quark-gluon plasma



From Quarks to Neutron Stars

Quantum Chromodynamics



Sign problem

Lattice QCD

Quantum Computing?



Baryon Interactions

Many-body Theory

Hot Equation of State

Cold Equation of State

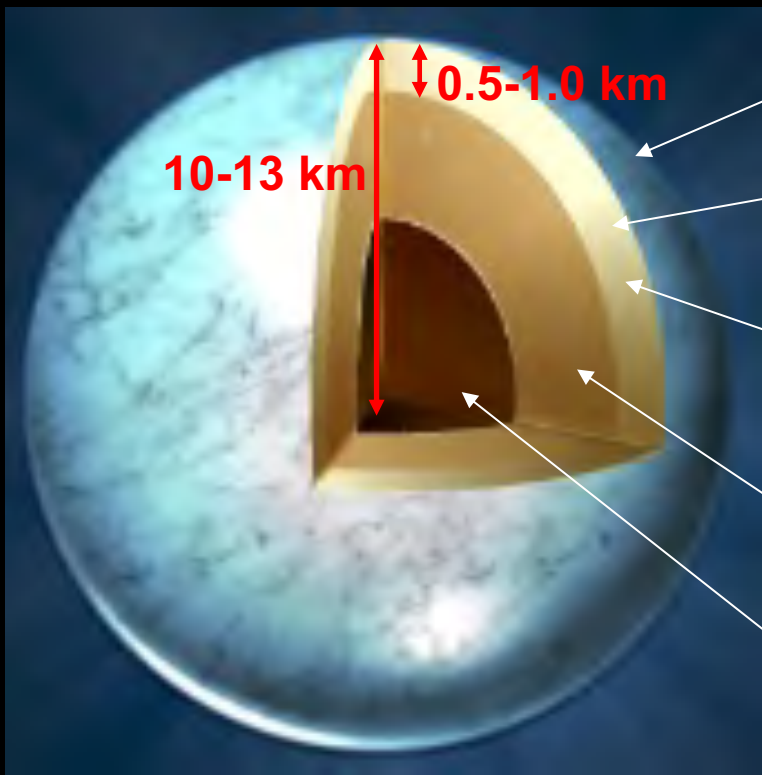
Relativistic Hydrodynamics

General Relativity

Heavy Ion Collisions

Neutron Stars

中性子星の構造



大気

水素、ヘリウム、炭素など

表面

原子核(固体)

地殻 ($> 4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$)

原子核(固体)と中性子(超流動)

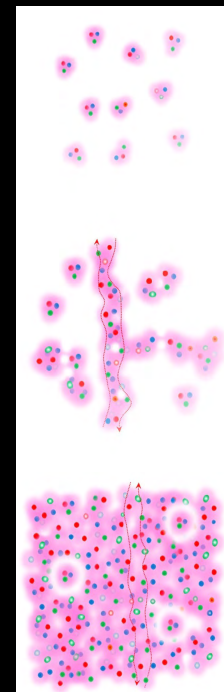
外核 ($> 10^{14} \text{ g/cm}^3$)

中性子(超流動)と陽子(超伝導)

内核 ($> 10^{15} \text{ g/cm}^3$)

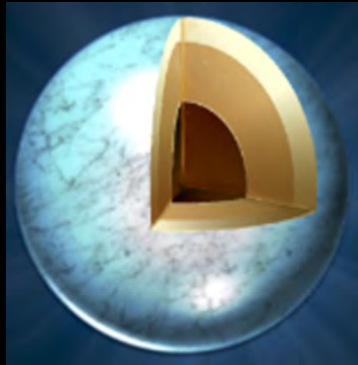
ハイペロン物質 (Λ 粒子など)

クォーク物質 (カラー超伝導)?



- ・ 質量 $\sim (1-2)M_{\odot}$
- ・ 半径 $\sim 10\text{km}$
- ・ 表面重力 $\sim 10^{11} \times \text{地表}$
- ・ 温度 $\sim 10^9 - 10^6 \text{K}$
- ・ 表面磁場 $\sim 10^6 - 10^{15} \text{G}$

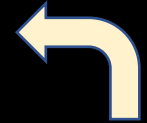
なぜ中性子星は安定に存在するのか？



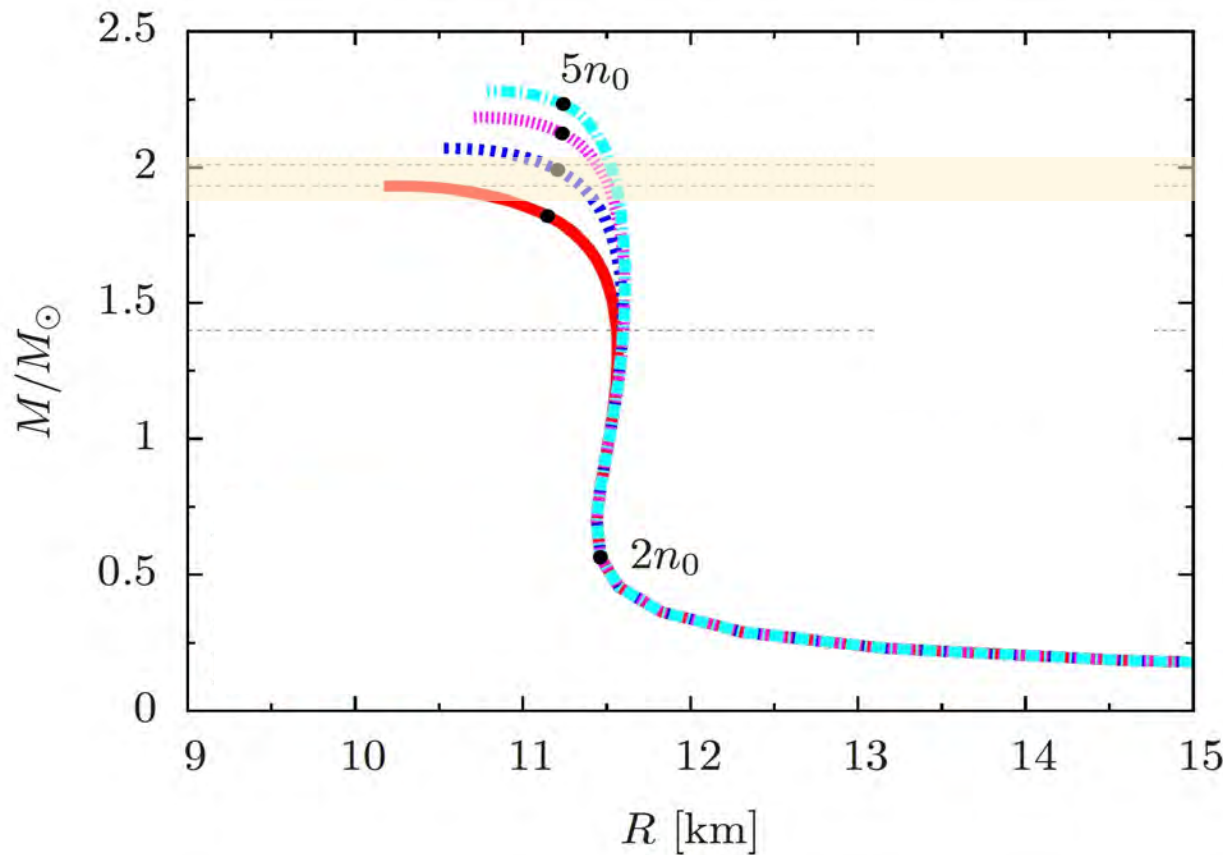
重い中性子星は自己重力で潰れてブラックホールになってしまう。

限界質量はどこか？

⇔ クォーク物質の存在と関係？



未解決問題



Baym, Hatsuda,
Kojo, Togashi, Furusawa,
Astrophys. J (2019)

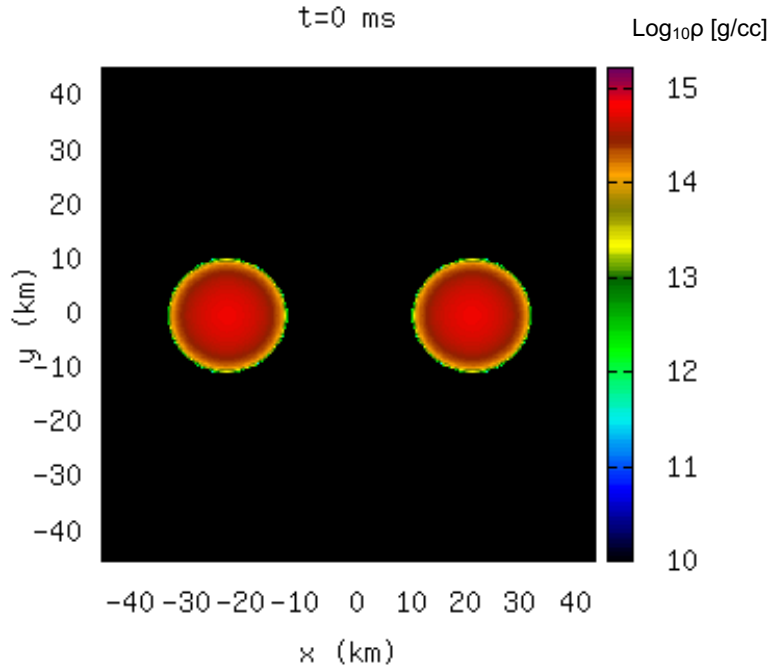
Neutron Star Collision (film/music, 2010)



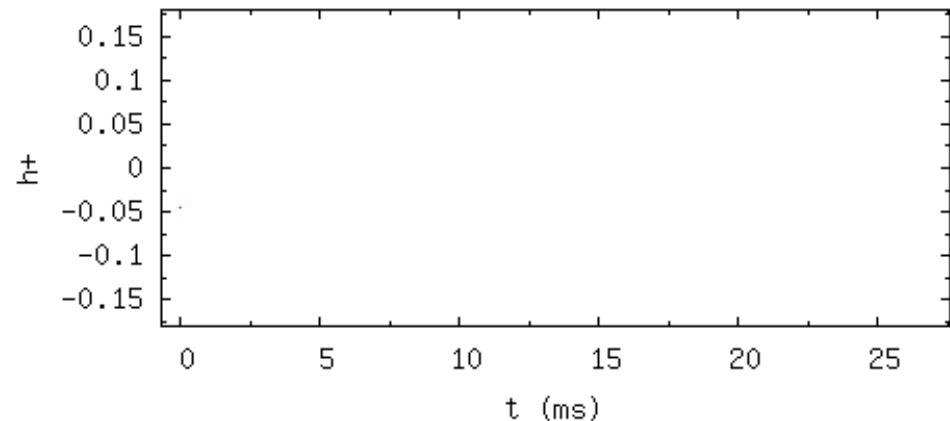
https://en.wikipedia.org/wiki/The_Twilight_Saga:_Eclipse
<https://www.youtube.com/watch?v=MTvgnYGu9bg>

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

物質密度



重力波波形



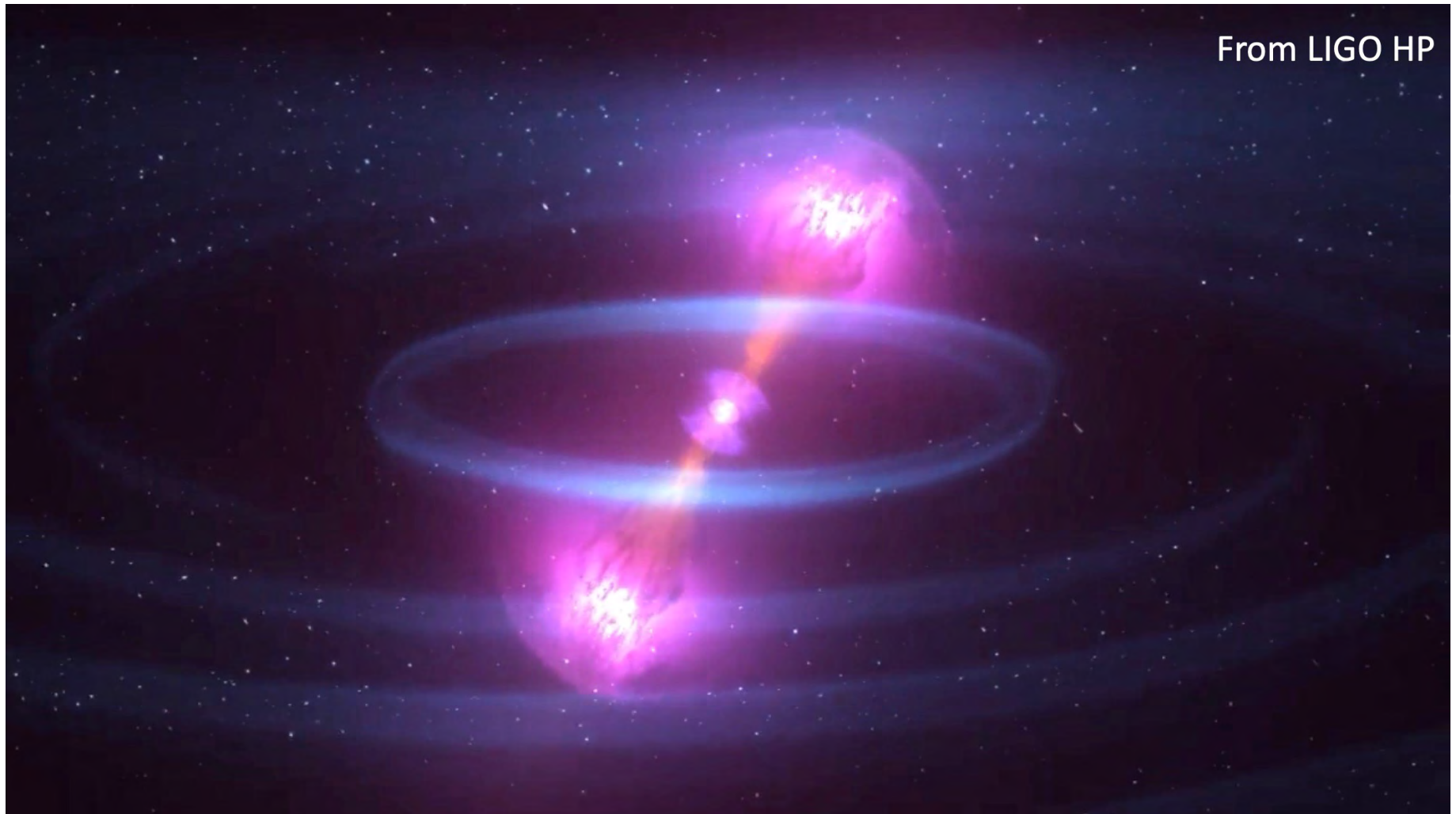
1.4M_s + 1.4 M_s の合体、APR4 状態方程式

K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, H. Okawa, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi,
“The mass ejection from the merger of binary neutron stars”, *Phys. Rev. D* 87, 024001 (2013).

<http://www2-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/~hotoke/anime/index.html>

連星中性子星合体からの重力波と電磁波の観測発見(2017)

GW17087の観測データを総合したイメージ



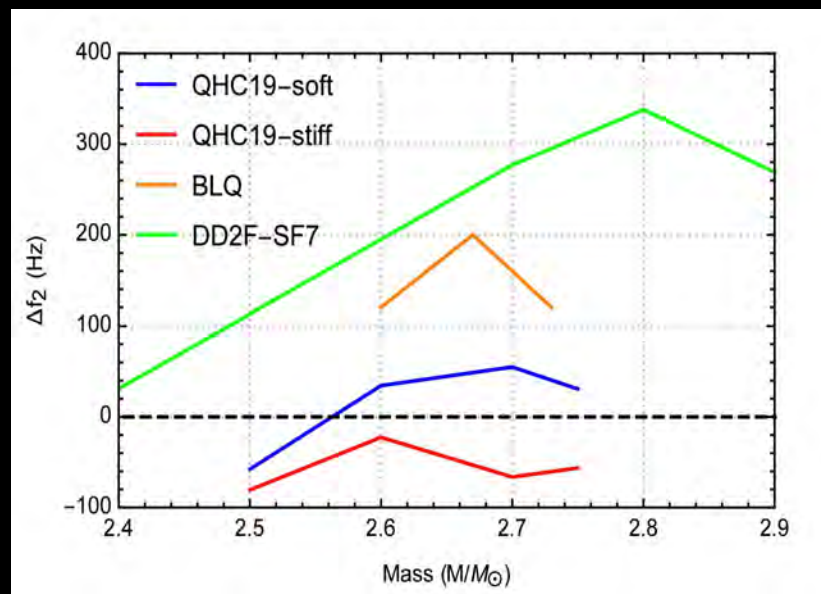
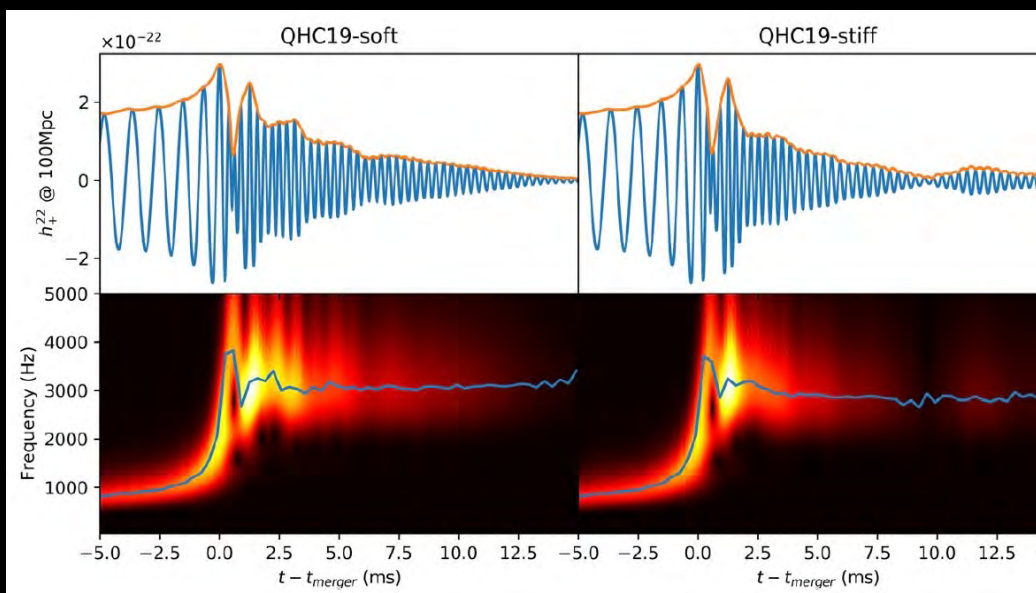
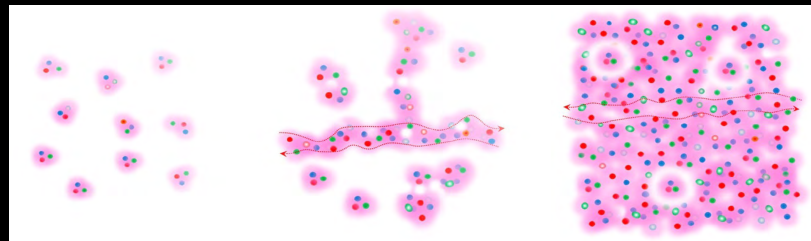
重力波と電磁波(ガンマ線、X線、紫外線、可視光、赤外線、電波)
の全てで観測

クォーク物質の状態により合体後の重力波波形が変わる

Huang, Baiotti, Kojo, Takami, Sotani, Togashi,
Hatsuda, Nagataki, Fan, Phys. Rev. Lett. (2022)



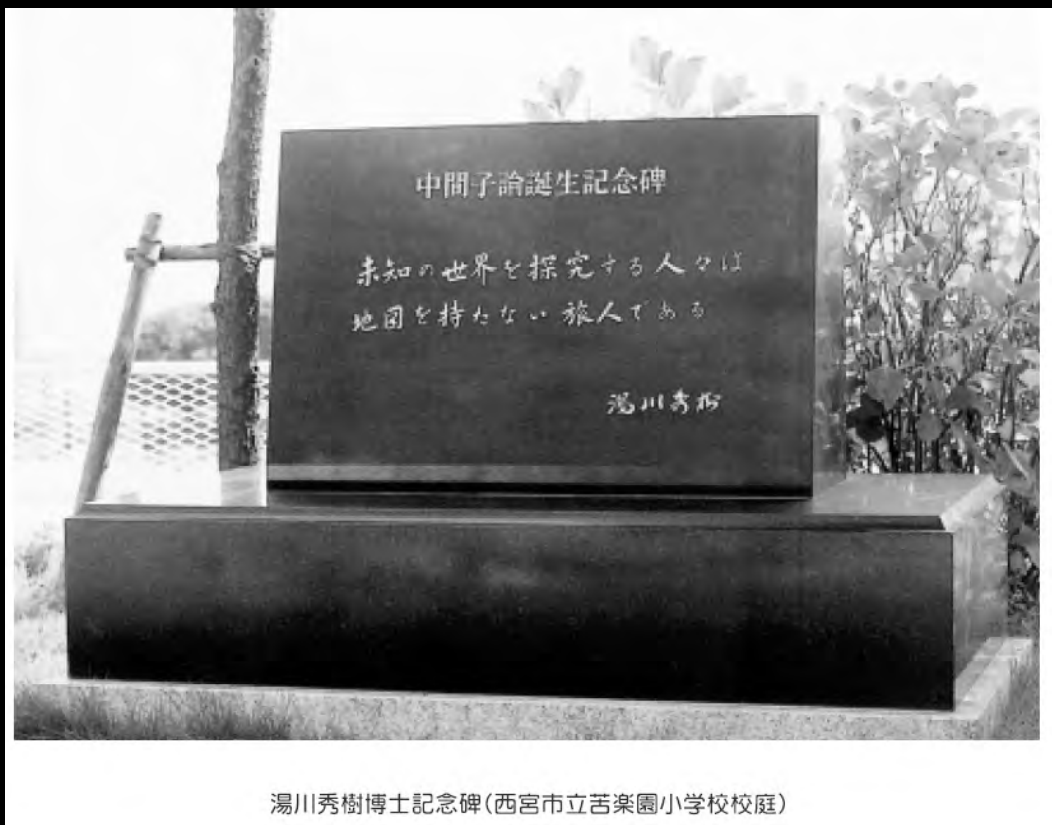
クォーク物質(カラー超伝導)の出現
→ 物質状態の硬化
→ 合体後の重力波波形の変化



次世代重力波望遠鏡 (kHz 領域で解像度 50Hz程度) に期待

- upgrade of Advanced LIGO and advanced Virgo
- Einstein Telescope
- Cosmic Explorer
- NEMO

「衝突の旅」はまだまだ続く。。。。



湯川秀樹博士記念碑(西宮市立苜蓿園小学校校庭)

未知の世界を探求する人々は、地図を持たない旅人である
湯川秀樹

三明さん

ご退職おめでとうございます。

引き続き、「衝突の旅」にお付き合いください！

QGP Book (2nd ed.)
with 新井田さん&平野さん もあと一息！！



QGP Book (Yagi-Miake-Hatsuda, 2005)
の宣伝用写真



つくばサイエンスニュース (2016)