



超弦理論で探る クォーク・グルーオン・プラズマ

夏梅 誠 (KEK 素核研, 理論研究系)

Based on

hep-th/0509079

hep-th/0602010

hep-th/0605224

hep-th/0607233

hep-ph/0701201

arXiv: 0706.0086 [hep-th]

arXiv: 0712.2916 [hep-th]

arXiv: 0712.2917 [hep-th]

arXiv: 0801.1797 [hep-th]

in collaboration w/

Elena Caceres (Colima Univ./U Texas),

Kengo Maeda (Shibaura Institute of Technology)

and

Takashi Okamura (Kwansei Gakuin Univ.)



08/2 金茶会

プロローグ

American Physical Society annual meeting 2005

RHIC 実験のプレス・リリース (April 18, 2005)

"The possibility of a connection between string theory and RHIC collisions is unexpected and exhilarating,"
(Director of the DOE Office of Science)

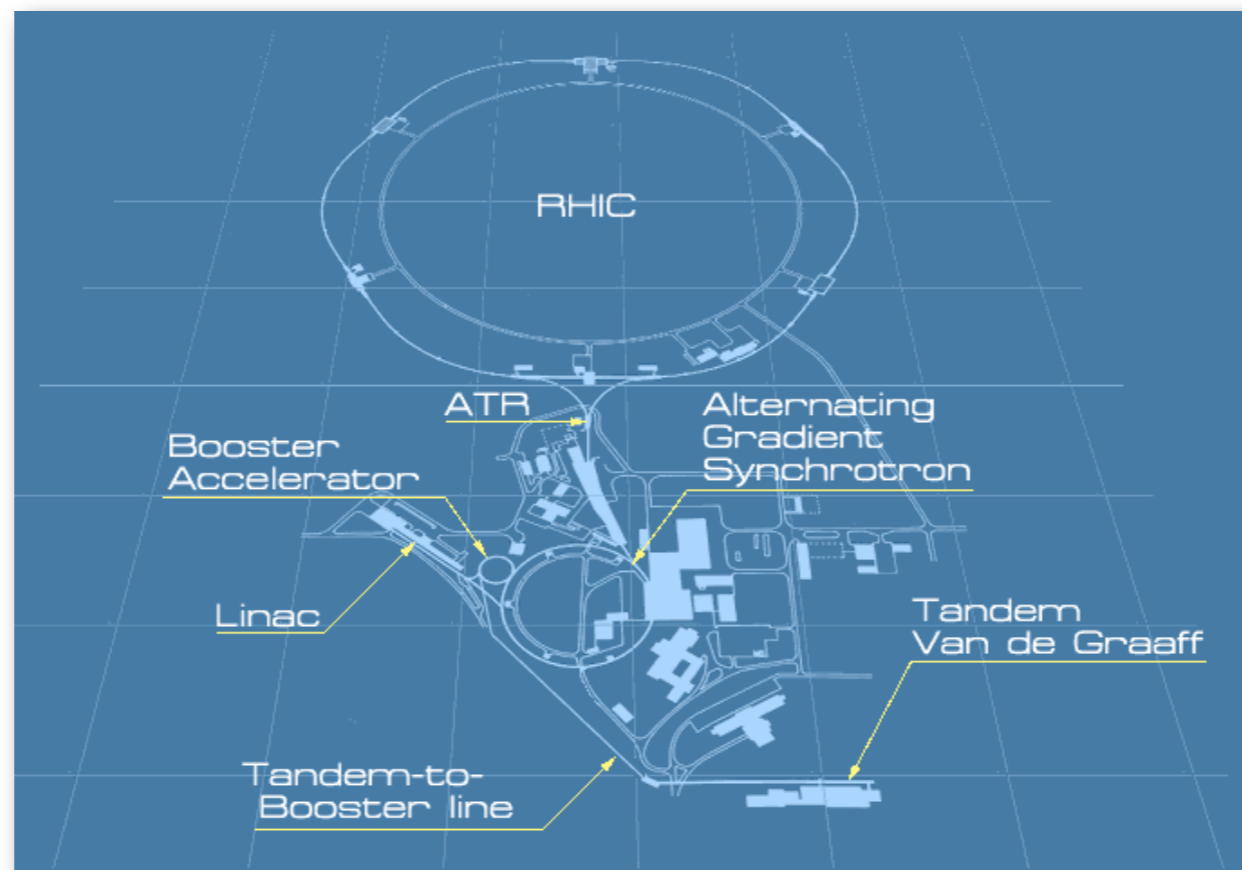
大型実験の報告で超弦理論が言及されたのは初めて

超弦理論と実験の「予期せぬ関係」とは何か？

RHIC

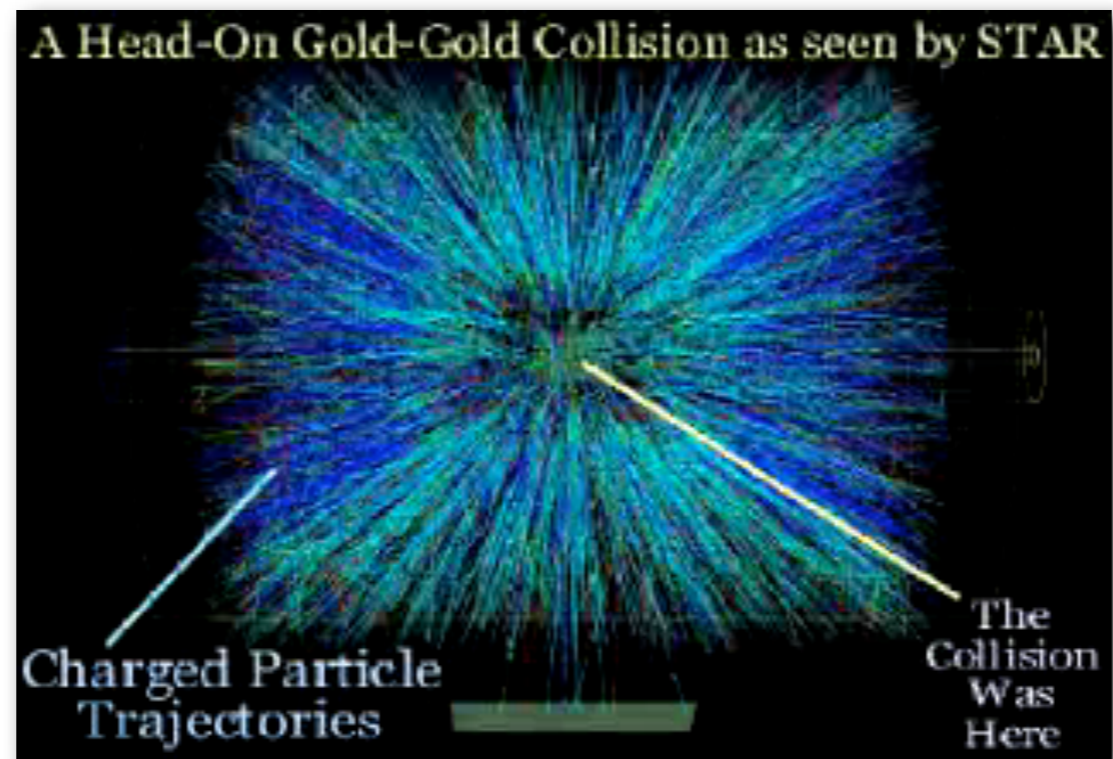
RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven National Lab.)

電子・陽電子や陽子・陽子ではなく重イオン同士の衝突：e.g. ^{197}Au
同様の実験は LHC でも予定 (ALICE 実験)



http://www.bnl.gov/RHIC/RHIC_complex.htm

A STAR event



Animation courtesy of the STAR Experiment at Brookhaven National Laboratory's Relativistic Heavy Ion Collider

RHICの目的

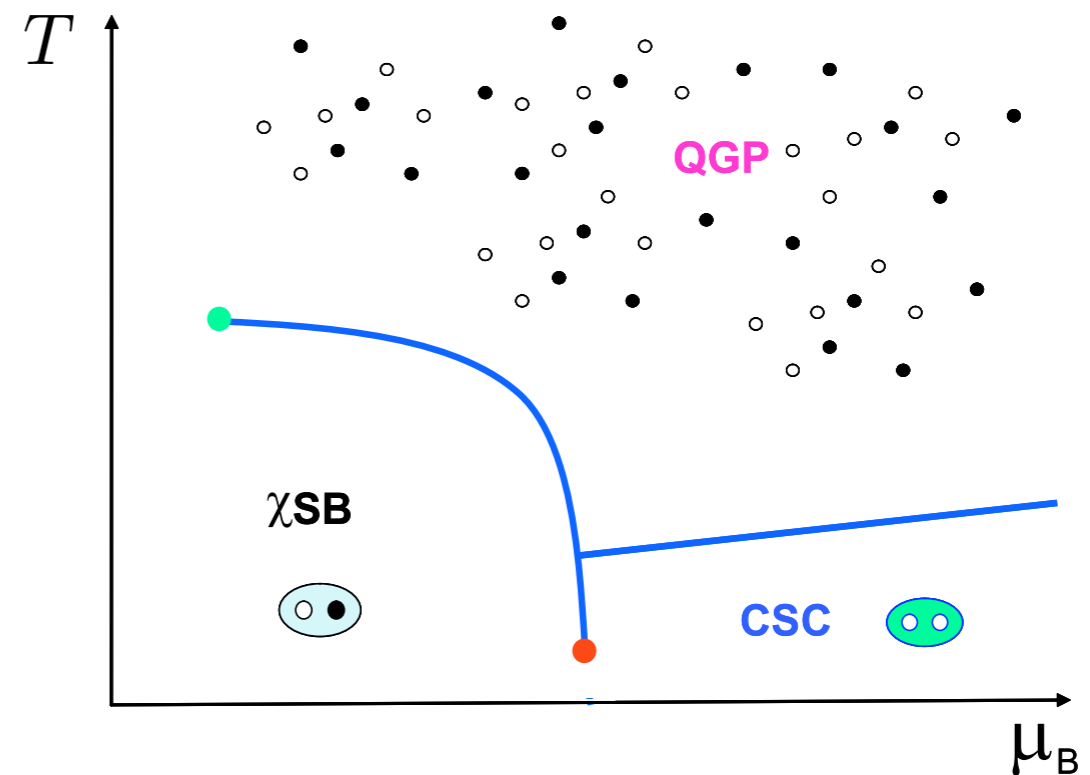
- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成
- 物理的性質の測定

QGP: QCD から自然に予言

実験で作られたことはなく、物理的性質が測られたこともない

QCD phase diagram (schematic)

Adapted from T. Hatsuda, hep-ph/0702293



アウトライン

- クォーク・グルーオン・プラズマ
- 超弦理論の初歩
- ゲージ理論とブラックホールを比べる

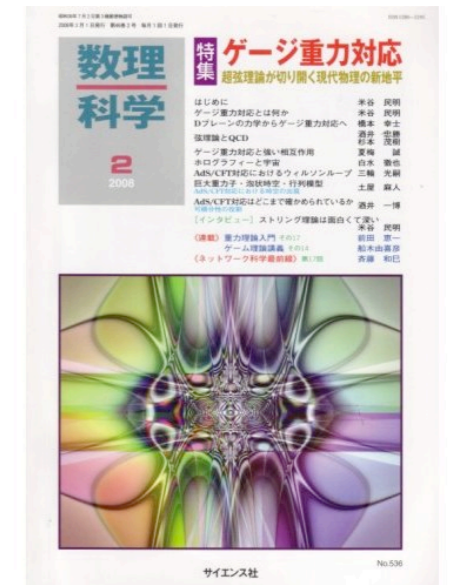
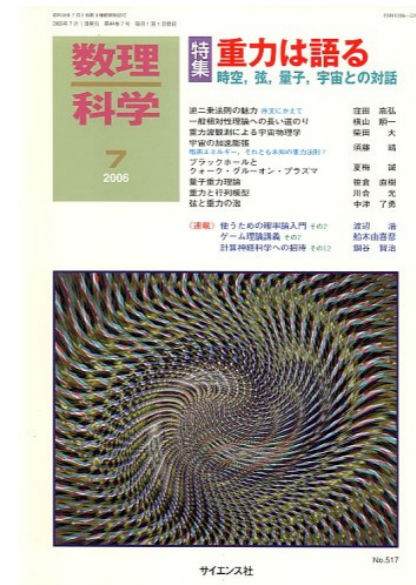
My Reviews: 数理科学 (July 2006)

hep-ph/0701201

Nature Physics (May 2007)

日本物理学会誌 (Sep 2007)

数理科学 (Feb. 2008)



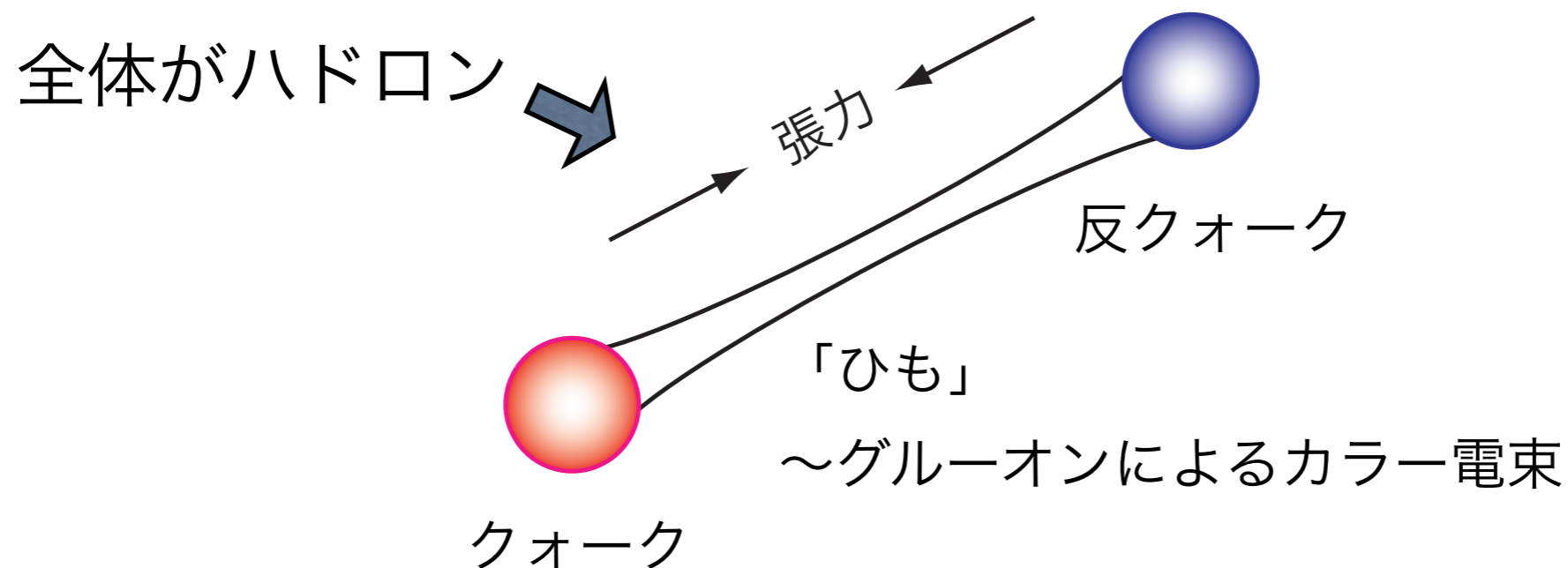
1. クォーク・グルーオン・プラズマ

強い力と閉じこめ

陽子や中性子（総称：ハドロン） → クォークからなる
クォークは単独では取り出せず、「閉じこめ」られている

クォークを閉じこめる力：強い力

強い力の理論：量子色力学 (QCD)



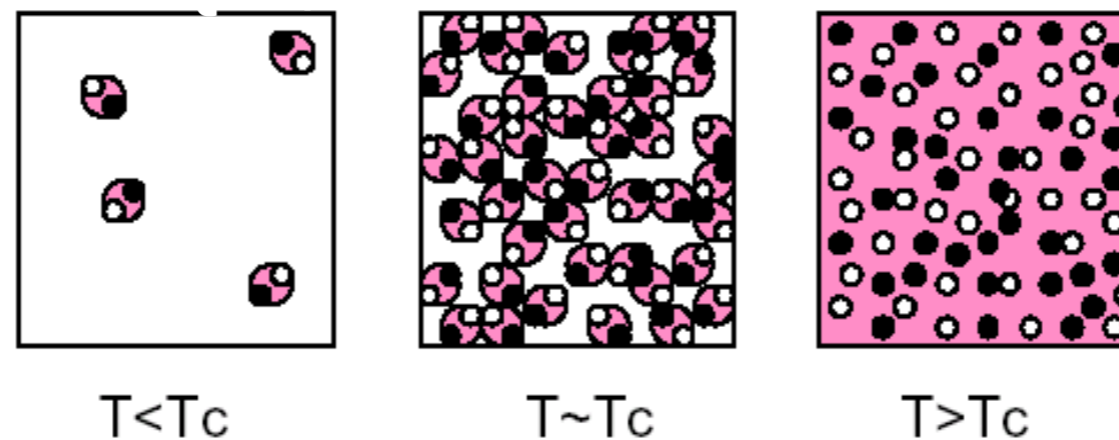
クォーク・グルーオン・プラズマ

高温 → ゆらぎにより激しくハドロンが対生成

ハドロンが重なりあい、ハドロンとしてのidentityを失う。カラー電荷の自由度が顕在化 (約2兆度)

➔ クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

(イオン化した「荷電」粒子からなるという意味でプラズマ)



Adapted from a slide by T. Hatsuda (U. Tokyo, Hongo)

1兆度と言えば「ゼットン」



RHIC は人類がゼットンを越える試み！？

RHICの発見

APS annual meeting 2005 : RHIC 実験プレス・リリース

QGP: 理想気体というよりむしろ完全流体

= 粘性ゼロ

気体と完全流体の違い → 粘性

Early Universe was a liquid

Quark-gluon blob surprises particle physicists.

by Mark Peplow
news@nature.com

nature

The Universe consisted of a perfect liquid in its first moments, according to

Universe May Have Begun as Liquid, Not Gas

Associated Press
Tuesday, April 19, 2005; Page A05

The Washington Post

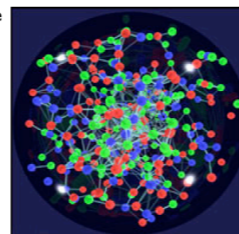
New results from a particle collision suggest the early universe was a liquid in its earliest moments, not a gas. Physicists say they have created a new state of hot, dense matter by crashing together the nuclei of gold atoms.

BBC NEWS

The high-energy collisions prised open the nuclei to reveal their most basic particles, known as quarks and gluons.

The researchers, at the US Brookhaven National Laboratory, say these particles were seen to behave as an almost perfect "liquid".

The work is expected to help scientists explain the conditions that existed just milliseconds after the Big Bang.



The impression is of matter that is more strongly interacting than predicted.

of Matter Is 'Nearly Perfect' Liquid

Physicists working at Brookhaven National Laboratory announced today that they have discovered a new state of matter. It appears to be a new state of matter made of quarks and gluons. The researchers unveiled their findings at a meeting of the American Physical Society in Florida.

SCIENTIFIC AMERICAN

The researchers, in collaborations, dubbed BRAHMS, PHENIX and STAR, working at



社会 asahi.com トップ > 社会 > その他・話題

宇宙の始まりはしずく? 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日 23時34分

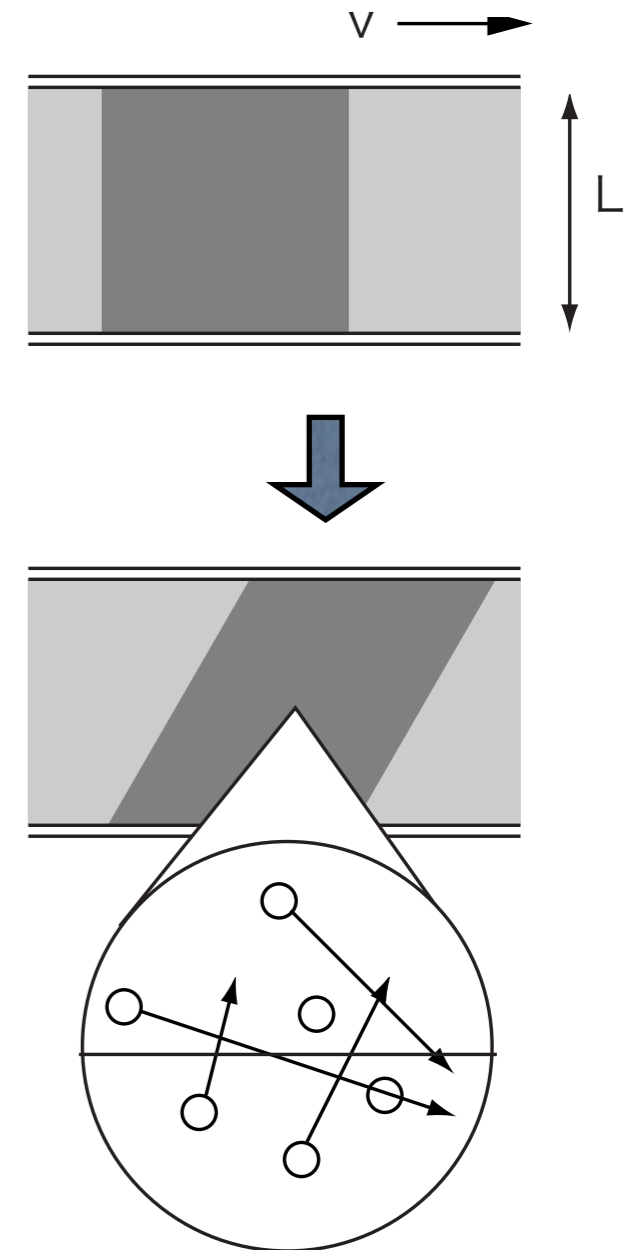
宇宙誕生の大爆発「ビッグバン」直後に相当する超高温・高密度の状態を再現する実験をしてきた日米などの国際チームは18日、物質を形づくる究極の基本粒子クォークは超高温でバラバラになるが、気体のように自由に飛び回るのでなく、しずくのような液体状態にあったと考えられる、と発表した。理論的に予想外の発見で、宇宙や物質のなりたちを説明するシナリオに影響を与える可能性がある。

粘性

2つの板に流体をはさみ、上の板を動かす
下の板にも力Fがかかる

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{L}$$

↓
(ずり) 粘性率



微視的：分子運動による運動量輸送



議論の限界について：

- (1) ニュートン流体
 - (2) 上記の機構で運動量輸送が起こる場合
- 「ハチミツ」はどちらも満たさない

粘性 と 相互作用

$\eta \sim (\text{質量密度}) \times (\text{平均速度}) \times (\text{平均自由行程})$

↓ 強結合

短くなる

輸送：妨げられる

相互作用が強い → 小さな粘性

完全流体 → 強結合極限

RHIC: QGPが強く相互作用することを示唆

しかしこのような強結合問題をどう調べればいいのか？

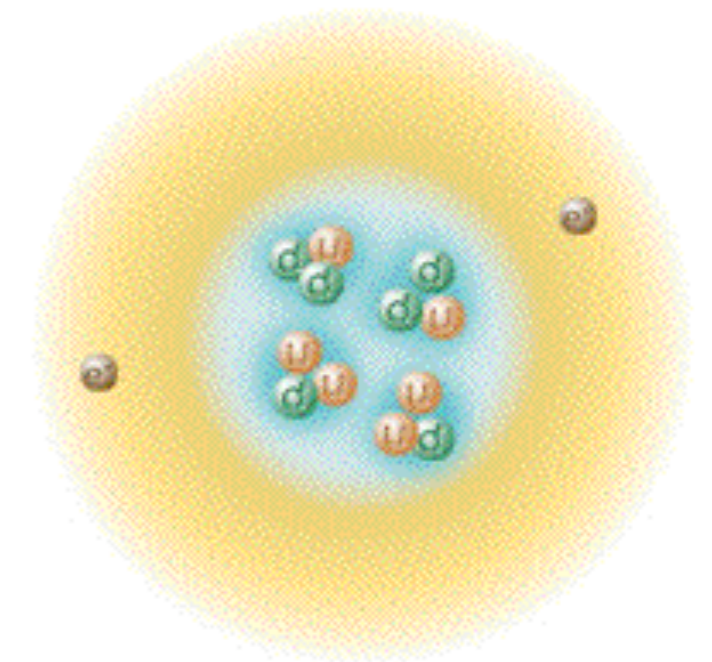
超弦理論が有用かもしれない

2. 超弦理論の初歩

宇宙の基本的な要素

● **物質**：クォーク 6 種類 → 陽子、中性子等
レプトン 6 種類 → 電子、ニュートリノ等
ヒッグス粒子

● **相互作用**：重力 一般相対論（古典論）
電磁気力 }
弱い力 } ゲージ理論（量子論）
強い力 }



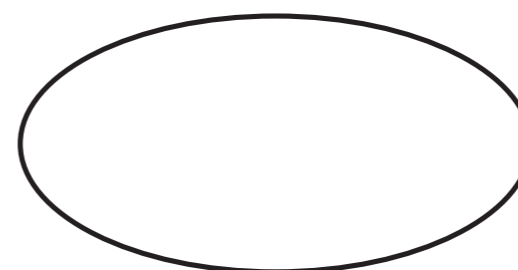
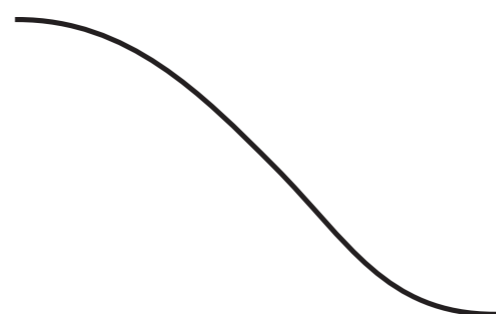
基本的にはこれらの要素であらゆる現象が理解可。しかしまとまりがない

超弦理論によって統一的に説明

超弦理論の登場人物

開弦：ゲージ理論

閉弦：重力



10^{-32} cm

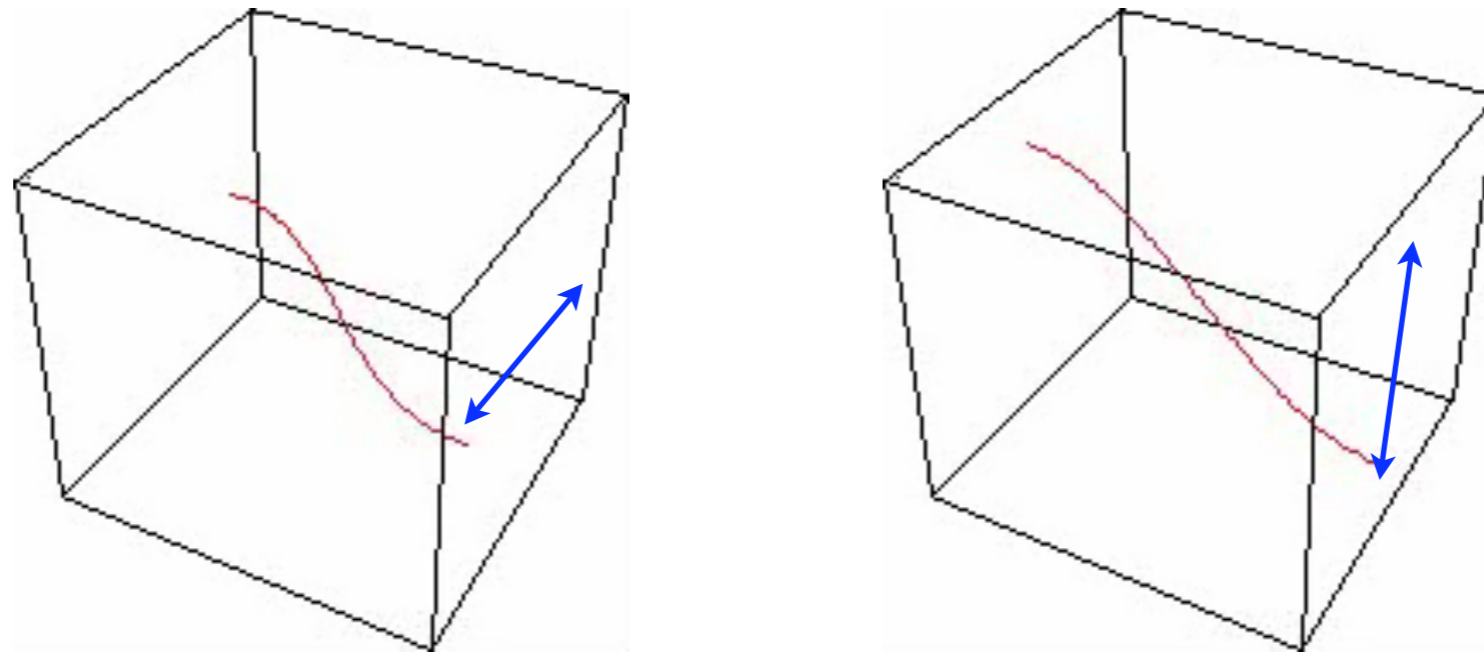
cf. 実験で「見る」ことができる長さ = 10^{-15} cm



ストリング：巨視的には点粒子

開弦：ゲージ理論

4次元時空でのもっとも単純な振動



自由度 2 → 光子の偏光

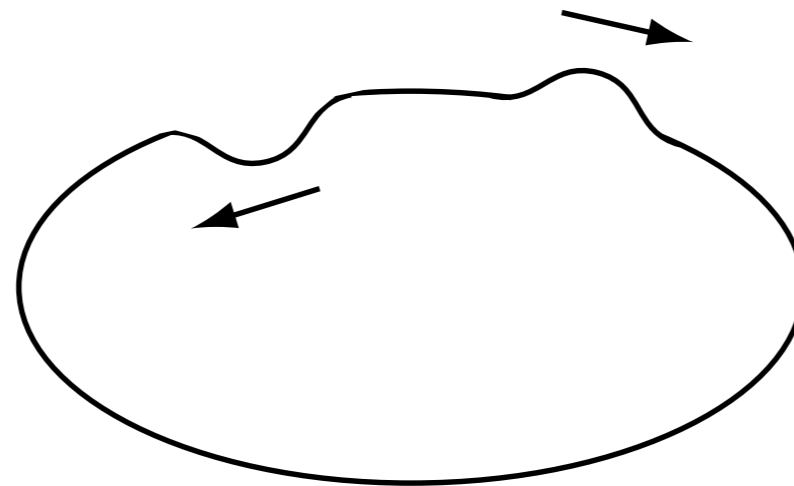


実際の超弦理論は10次元時空を要求

閉弦：重力

「左向き」と「右向き」の進行波：独立

同時に2つの方向に振動する → スピン2 $h_{\mu\nu}$

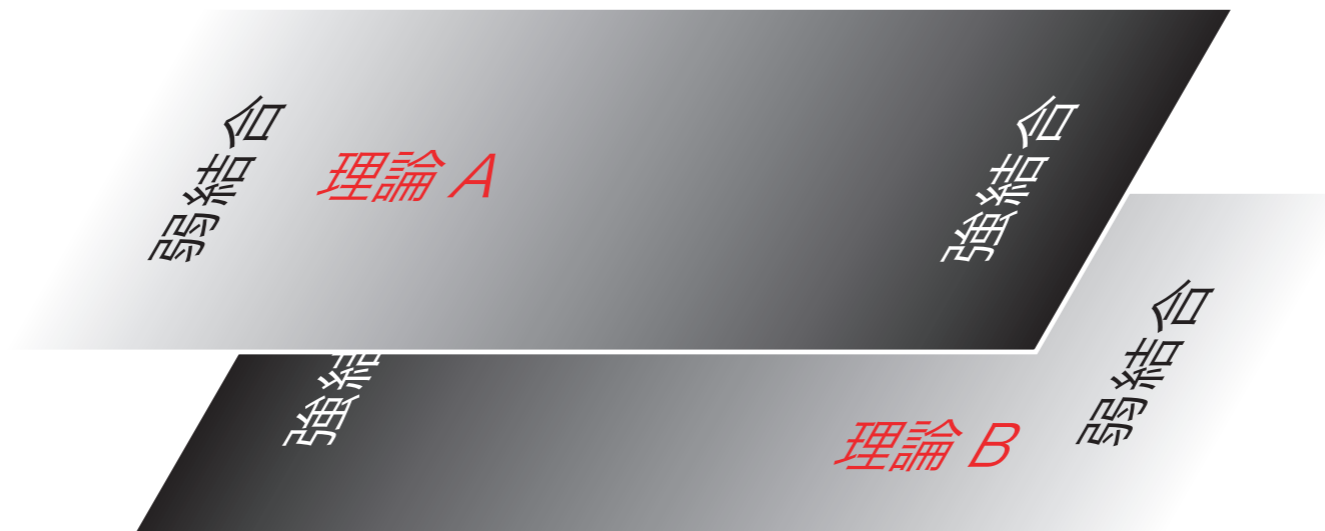


超弦理論はゲージ理論と重力の両方を含む

双対性

過去10年超弦理論の有用なツール。様々な双対性が登場

- 見かけ上異なる2つの理論が等価
- 補完関係：一方の苦手領域（非摂動現象）を得意領域（摂動論）でカバー



AdS/CFT 双対性

重力とゲージ理論を統一する超弦理論だからこそ
可能になった双対性

有限温度のゲージ理論 \Leftrightarrow AdS 時空中のブラックホール



有限温度系

等価



ホーキング放射により有限温度系

強結合

\Leftrightarrow

「弱結合」

(重力が弱く一般相対論で十分)

弱結合

\Leftrightarrow

「強結合」

3. ゲージ理論と ブラックホールを比べる

平衡状態での比較

温度を持った系 → 平衡状態での性質（熱力学量）

ゲージ理論

熱力学



ブラックホール

「ブラックホール熱力学」

- ブラックホールはホーキング放射により温度を持つ
- ブラックホールの性質は熱力学の第0～第3法則の形にまとめられる

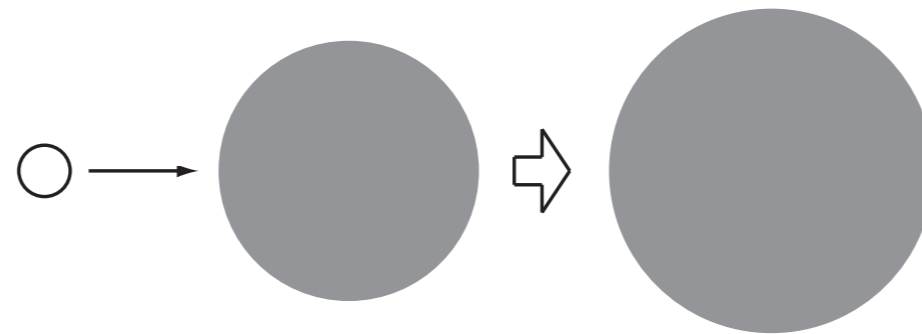
ブラックホール熱力学

ブラックホールの特徴的な場所：ホライズン

光さえも外に逃れられない場所

ホライズン半径（シュワルツシルド）： $r_0 = 2GM$

物質が落ちこむと、ホライズンの面積 A は増大



A は単調増加 \leftrightarrow エントロピー？

$$S_{BH} \propto A?$$

実際、ブラックホールは熱力学と似た法則に従う

e.g. 第一法則

$$dE = TdS$$

$$dM = \frac{1}{M} (MdM)$$

$$= \frac{1}{32\pi G^2 M} dA \quad r_0 = 2GM \rightarrow A = 16\pi G^2 M^2$$

T? dS?

ホーキング ('74) : BHが量子効果により温度を持つ。シュワルツシルドでは

$$T = \frac{\hbar}{8\pi GM}$$

S_{BH} が決まる

$$S_{BH} = \frac{A}{4G\hbar}$$

“BH entropy”

ゲージ理論



ブラックホール

熱力学

「ブラックホール熱力学」

温度	=	ホーキング温度
エネルギー		BH 質量
エントロピー		BH エントロピー

$\mathcal{N} = 4$ SYM の場合

$$S_{free} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 \quad \longleftrightarrow \quad S_{BH} = \frac{\pi^2}{2} N_c^2 T^3 = \frac{3}{4} S_{free}$$

↑ 自由度 ↑ Stefan-Boltzmann

あわない？ 比べ方がおかしい！

(ゲージ理論としては) 弱結合の結果

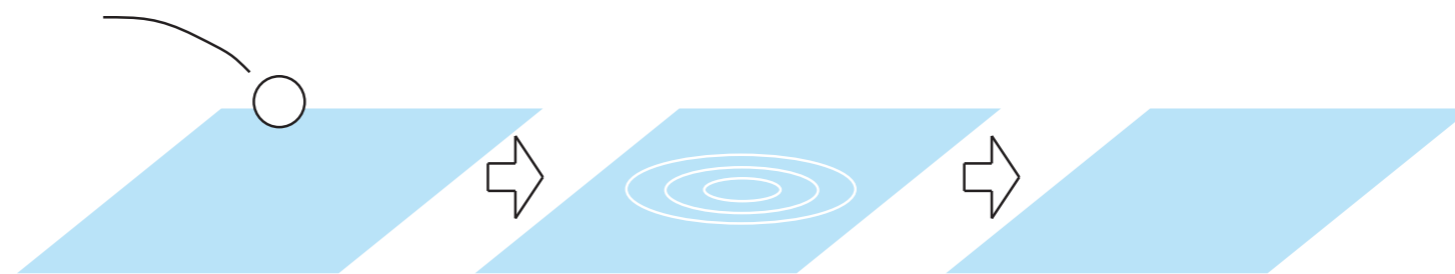
(ゲージ理論としては) 強結合の結果

強結合による効果

BH と流体力学

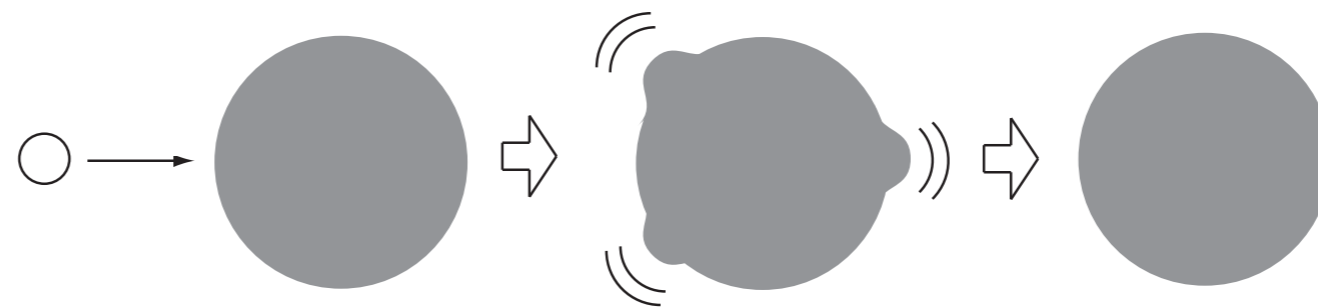
- 次に複雑な状況 → 擾動を加えどう減衰するか（緩和現象）
- QGP: RHIC によれば極めて小さい粘性を持った流体
→ BH と流体は実際似た振るまい

池：



散逸：粘性の効果

BH:



散逸：BHによる吸収

η/s の普遍性

重力の立場では、散逸はブラックホールによる吸収

ずり粘性 \Leftrightarrow ブラックホールによる吸収断面積
= ホライズン面積 (一般に)

$$\eta = \frac{A}{16\pi G}$$

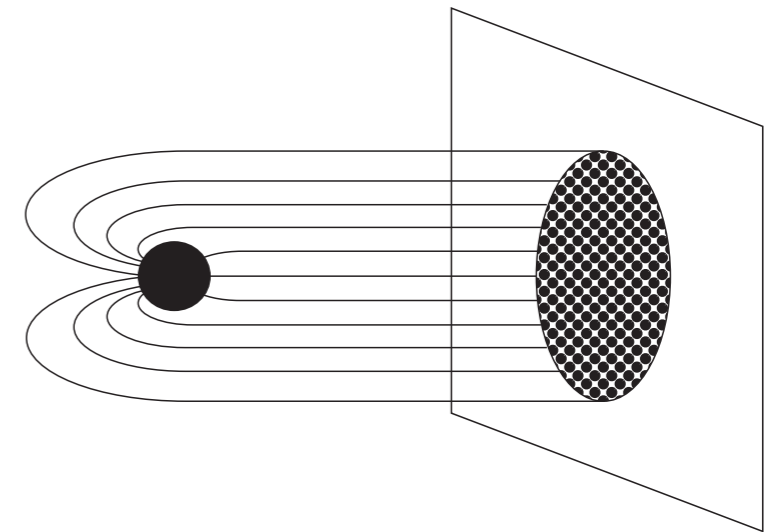
エントロピー \Leftrightarrow ホライズン面積 (一般に)

$$s = \frac{A}{4G\hbar} k_B$$

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

どれも一般的な関係なので、この結果も

普遍的



Adapted from Susskind
“The world as a hologram”

主張：

BHと対応関係があるゲージ理論プラズマ：
強結合で η/s は普遍的な小さな値を持つ

Kovtun - Son - Starinets (2004)

cf. 通常の下で窒素の場合：
$$\frac{\eta}{s} \sim (3 \times 10^3) \times \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

ゲージ理論

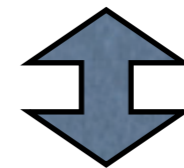
ブラックホール

超対称ゲージ理論

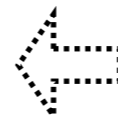


AdS BH

ずり粘性率に普遍性



QCD



未知

→ η/s が実験と比較可能！

実験との比較

RHIC の結果 :

$$\frac{\eta}{s} \sim O(0.1) \times \frac{\hbar}{k_B} ?$$

Teaney (2003)
Hirano - Gyulassy (2005)

...

AdS/CFTの予言 :

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

摂動論的 QCD の外挿 :

$$\frac{\eta}{s} \sim O(1) \times \frac{\hbar}{k_B}$$

摂動論の精度は悪く、QGPはたしかに強結合のよう

どこまで普遍的なのか？

様々な「一般的な証明」があり、吸収断面積の議論もその一つ

Kovtun - Son - Starinets, 0309213

Buchel - J.Liu, 0311175

Buchel, 0408095

しかしどんな証明も仮定次第→証明は全てのゲージ理論の全ての状況をカバーしているわけではない

この1～2年、**証明がカバーしていなかった様々な状況下**でも普遍性が確かめられた（我々の仕事がきっかけ）

Mas, 0601144

Son - Starinets, 0601157

Saremi, 0601159

Maeda - Natsuume - Okamura, 0602010

QGP の他のトピック

強結合の問題からQGPの解析は極めて困難

→ QGPに特徴的な現象は何か？

小さな粘性率 (楕円フロー)

ジェットの抑制

J/ψ 抑制

Liu - Rajagopal - Wiedemann, hep-ph/0605178

Herzog et al., 0605158

Casalderrey-Solana - Teaney, hep-ph/0605199

Gubser, 0605182

Liu - Rajagopal - Wiedemann, hep-ph/0607062

Chernicoft - Garcia - Guijosa, 0607089

Caceres - Natsuume - Okamura, 0607233

Natsuume - Okamura, 0706.0086 [hep-th]

どれも最近AdS/CFTで調べ出されてきた

まとめ



- 🎤 超弦理論は現実世界に有用！
- 🎤 AdS/CFT が QGP の解析に有用。逆に、実験や QCD の理論ツールが AdS/CFT の研究に有用。
- 🎤 超弦理論によるゲージ理論プラズマの流体力学：普遍性から強力
- 🎤 ずり粘性率の普遍性は最近様々な状況に拡張された

Special thanks to

ハドロン原子核グループ at 素核研
森松さん、板倉さん、...