

2009年10月30日 KEK公開講座 @つくば

ねつ りきがく

ちょうげん りろん

ブラックホールの熱力学と超弦理論

悩めるアインシュタイン



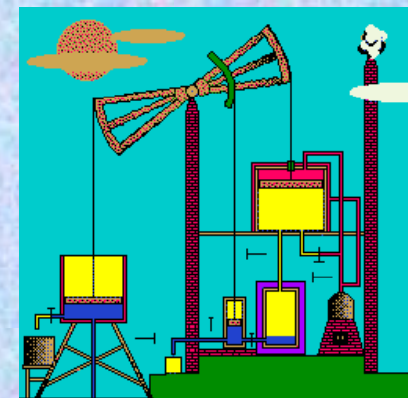
画: 春山富義(KEK)

KEK 理論センター
磯 暁 Satoshi Iso

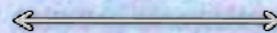
ブラックホールに吸い込まれる物質と
ブラックホールから放出されるジェット



ワットの発明した蒸気エンジン



温度
エントロピー



宇宙のルールブック探し = 観測、実験



ヒエログリフの解読

理論物理

	ア行	イ行	ウ行	エ行	オ行	カ行	キ行	ク行
ア行	𐀀	𐀁	𐀂	𐀃	𐀄	𐀅	𐀆	𐀇
イ行	𐀈	𐀉	𐀊	𐀋	𐀌	𐀍	𐀎	𐀏
ウ行	𐀐	𐀑	𐀒	𐀓	𐀔	𐀕	𐀖	𐀗
エ行	𐀘	𐀙	𐀚	𐀛	𐀜	𐀝	𐀞	𐀟
オ行	𐀠	𐀡	𐀢	𐀣	𐀤	𐀥	𐀦	𐀧
カ行	𐀨	𐀩	𐀪	𐀫	𐀬	𐀭	𐀮	𐀯
キ行	𐀰	𐀱	𐀲	𐀳	𐀴	𐀵	𐀶	𐀷
ク行	𐀸	𐀹	𐀺	𐀻	𐀼	𐀽	𐀾	𐀿
コ行	𐁀	𐁁	𐁂	𐁃	𐁄	𐁅	𐁆	𐁇
ク行	𐁈	𐁉	𐁊	𐁋	𐁌	𐁍	𐁎	𐁏
ケ行	𐁐	𐁑	𐁒	𐁓	𐁔	𐁕	𐁖	𐁗
セ行	𐁘	𐁙	𐁚	𐁛	𐁜	𐁝	𐁞	𐁟
テ行	𐁠	𐁡	𐁢	𐁣	𐁤	𐁥	𐁦	𐁧
ト行	𐁨	𐁩	𐁪	𐁫	𐁬	𐁭	𐁮	𐁯
ナ行	𐁰	𐁱	𐁲	𐁳	𐁴	𐁵	𐁶	𐁷
ネ行	𐁸	𐁹	𐁺	𐁻	𐁼	𐁽	𐁾	𐁿
ノ行	𐂀	𐂁	𐂂	𐂃	𐂄	𐂅	𐂆	𐂇
ハ行	𐂈	𐂉	𐂊	𐂋	𐂌	𐂍	𐂎	𐂏
ヘ行	𐂐	𐂑	𐂒	𐂓	𐂔	𐂕	𐂖	𐂗
ホ行	𐂘	𐂙	𐂚	𐂛	𐂜	𐂝	𐂞	𐂟
ヘ行	𐂠	𐂡	𐂢	𐂣	𐂤	𐂥	𐂦	𐂧
ヘ行	𐂨	𐂩	𐂪	𐂫	𐂬	𐂭	𐂮	𐂯
ヘ行	𐂰	𐂱	𐂲	𐂳	𐂴	𐂵	𐂶	𐂷
ヘ行	𐂸	𐂹	𐂺	𐂻	𐂼	𐂽	𐂾	𐂿
ヘ行	𐂰	𐂱	𐂲	𐂳	𐂴	𐂵	𐂶	𐂷
ヘ行	𐂸	𐂹	𐂺	𐂻	𐂼	𐂽	𐂾	𐂿

今日お話ししたいこと（講演の流れ）

前半

現代の基礎物理学への道のり

統一の歴史

後半

ブラックホールの量子論と超弦理論

21世紀の基礎物理学が何を目指しているのか

時空とは何なのか？

時空と物質の統一とは？



量子時空の微視的構造の理解

現代の基礎物理学への道のり

統一の歴史

現象の統一: 物理学の歴史

力学、電磁気学、熱力学 から 現代物理学へ

次元の統一: 基本定数と次元をもつ物理量の関係

長さ、時間、重さ、温度

力と物質の統一: 素粒子物理学の歴史

粒子に働く4つの基本的な力

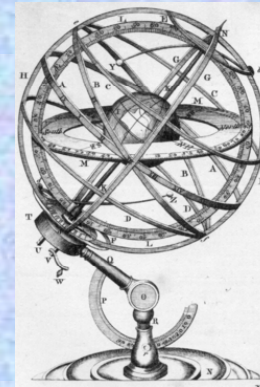
現象の統一 その1 力学

アリストテレス (ギリシャB.C.384~322)

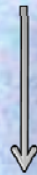
世界は不生不滅な天上界と、絶えず変化する地上界からなる

地上界 : 直線運動

天上界 : 円運動

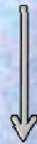


プトレマイオス(83-168)
の天球儀



惑星の運動が複雑

コペルニクス(1473- 1543) 地動説



ガリレオ(1564-1642)

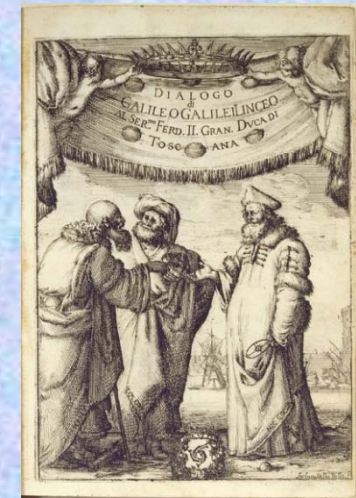
実験と観察

天文対話



地上界と天上界の統一

ニュートン (1643-1727) 力学 万有引力(重力)
プリンピキア

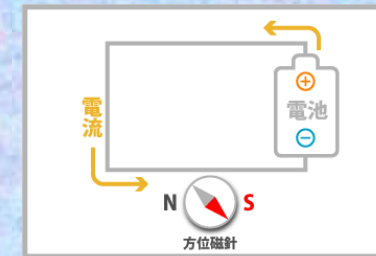


サルビアッチ
サグレド
シムプリチオ

現象の統一 その2 電磁気学

電気力 クーロン(1736-1806)
クーロンの法則

磁気力 エルステッド (1777-1851)
電流が磁気をつくること



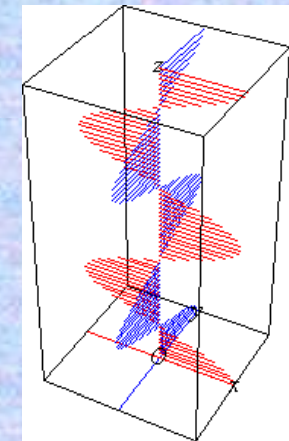
<http://blog.rohm.co.jp/entry/cat79/cat78/>
ローム株式会社HPより

ファラデー (1791-1867) 電磁誘導の法則



マックスウェル (1831-1879) 電気と磁気の統一
電磁気学

光速度で伝搬する電磁波の発見 光＝電磁波
(統一で生まれた新しい現象の予言)



<http://www.eto.titech.ac.jp/>
東工大工学入門講座HPより

力学、電磁気学、熱力学の成功をもってして
古典物理学は完成した。（19世紀）



20世紀初頭の物理学革命

相対性理論 時間と空間の概念

量子力学 ミクロな自然法則の発見

統計力学 原子(アトム)の存在

これらは何の統一として理解できるのか？

現象の統一 その4 相対性理論

マックスウェルの電磁気学
光速度で進む電磁波 1864

光速度の測定
ブラッドレー 1725 恒星の光行差
マイケルソン・モーリー 1887 干渉計

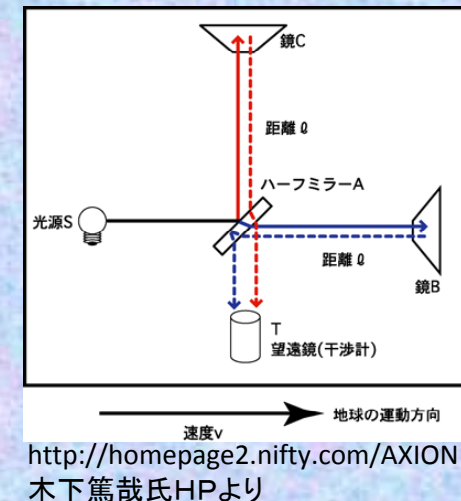
エーテルの非存在

アインシュタイン (1879-1955)
光速度不変の原理

特殊相対性理論
1905

時間と空間の統一

光速度 c



“時間と空間”を曲った時空間まで拡張したもの

1916 一般相対性理論 幾何学による重力の記述

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R = 8\pi GT^{\mu\nu}$$

時空と重力の統一

重力定数 G

重力とは時空の歪みが伝搬していく現象(重力波)

現象の統一 その5 量子力学

電子 = 粒子

光 = 波

1905



ドブロイ: 物質波 1924



電子顕微鏡 1931
(波としての電子)

光電効果 (粒としての光)
金属に光をあてると電子がでる

波と粒子の統一 (双対性)
量子力学

プランク定数 $\hbar$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left(\frac{-\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^2 + V(x) \right) \Psi$$

シュレーディンガー方程式 (1926)

・波動関数の干渉性
(波)

$$\Psi = \sum c_i \Psi_i$$

・不確定性原理

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



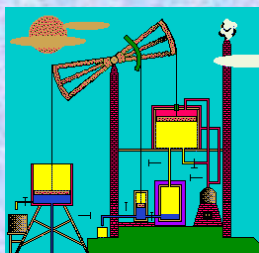
物質の安定性の説明

・エネルギーの量子化
(粒子)

例: 水素原子のエネルギー準位はとびとびの値をとる

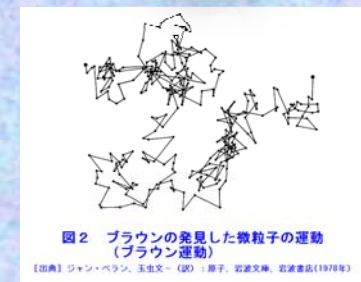
現象の統一 その6 熱統計力学

1905



マクロな現象
蒸気機関、大気の大気循環
(温度、エントロピー)

ミクロな現象
ブラウン運動
(揺らぎ)



マクロとミクロの統一
統計力学

ボルツマン定数

$$k_B$$

原子(アトム)の存在証明

$$S = k_B \log W$$

熱力学的なエントロピーと
微視的状态数 W を
関係づける

- ・マクロな現象をミクロに説明
- ・マクロ現象から、背後の微視的構造を明らかにできる



撮影:磯暁

二つの異なる現象が統一されると新しい学問が生まれる

古典物理学の基礎

力学(天上界と地上界) 電磁気学(電気と磁気) 熱力学



20世紀物理学の基礎

相対論(時間と空間) 量子力学(粒子と波) 統計力学(マクロとミクロ)

c 、 G

$\hbar$

k_B

これらの基本定数は、種々の次元を関係づける

(長さ、時間、重さ、エネルギー、温度)

次元の統一

次元の統一 その1

次元をもつ基本物理量が現れる理論には、新しい物理概念がある。

量子力学

プランク定数

$$\hbar = \frac{ML^2}{T}$$

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

高エネルギーになるほど
時空の細かな領域を見る。

光速

$$c = \frac{L}{T}$$

時間と空間

特殊相対論

重力理論

重力定数

$$G = \frac{L^3}{MT^2}$$

統計力学

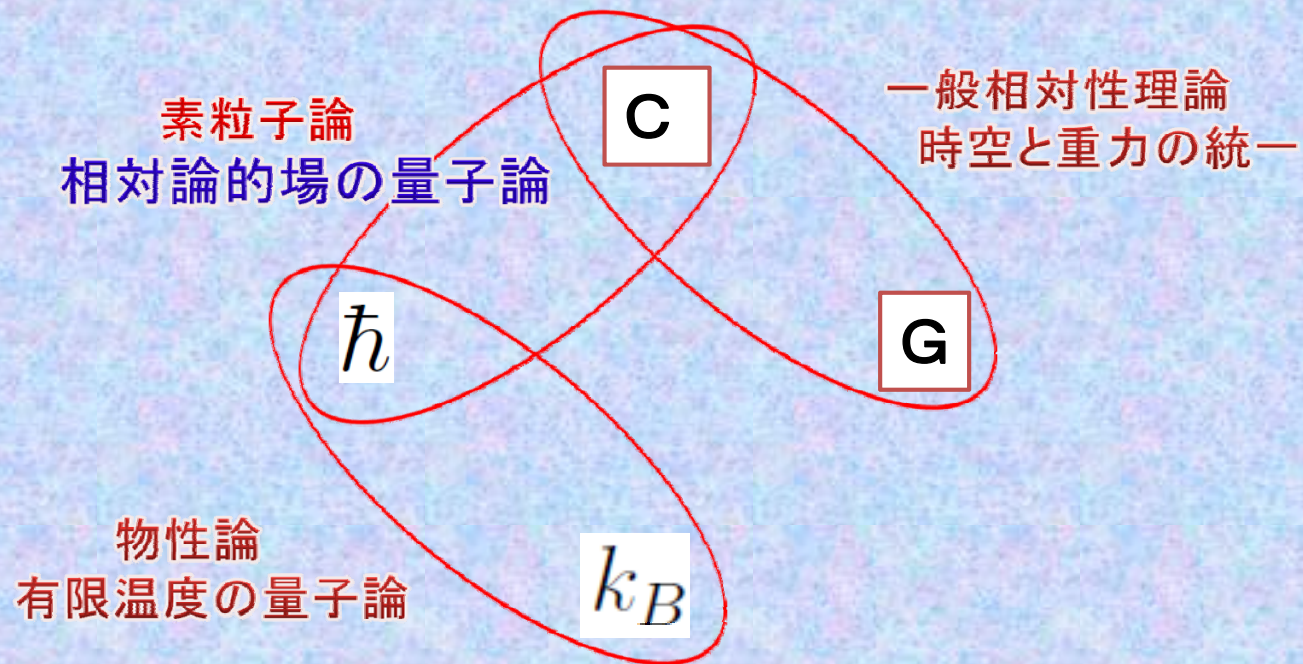
ボルツマン定数

$$E = k_B \tilde{T}$$

エネルギーと温度

4つの基本物理量が、(長さL、時間T、質量M、温度 $\tilde{T}$) の4つの次元を関係づける

二つの基本物理量が同時に現れる理論は何か？



これらが20世紀物理学の中心課題

次元の統一 その3

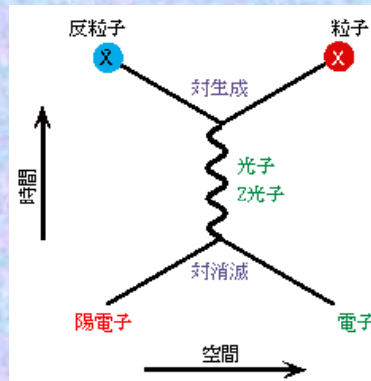
相対論的な場の量子論(素粒子論の基礎) = c と $\hbar$ の物理

(1)(特殊)相対性理論 → 反粒子の存在

Dirac 1930

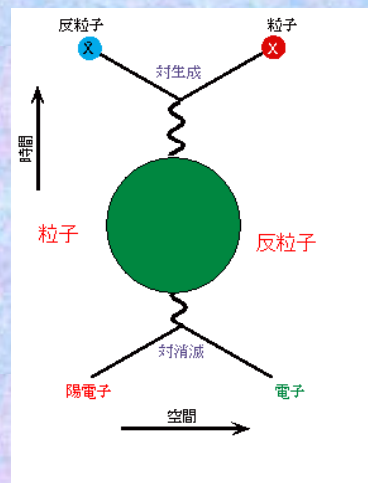


(2)量子力学 → 粒子・反粒子の対生成、対消滅 → 場の量子論



高エネルギーで電子、陽電子を衝突
→ 対消滅 → 様々な粒子、反粒子の対生成

真空は、何もない空虚な空間ではなく、
粒子や反粒子が生成消滅を繰り返す
ダイナミックな媒質である。



場の量子論による高次量子補正効果

衝突の散乱確率が(紫外)発散

繰り込み理論(朝永、ファインマン、シュインガー)

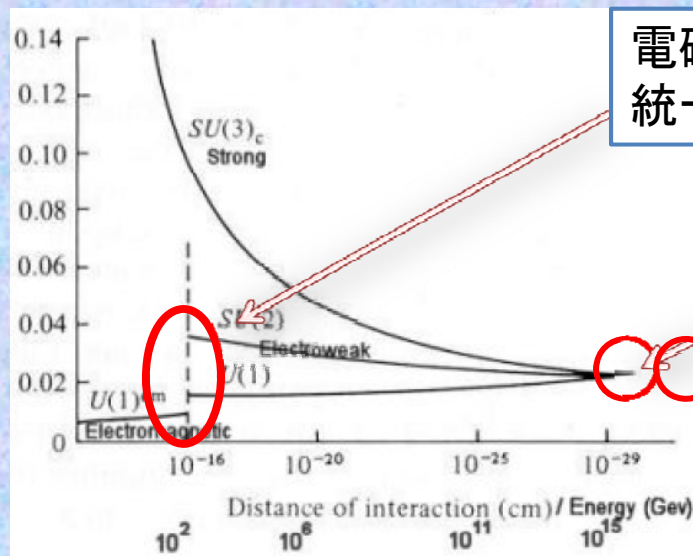
~1945

力の統一 その1

相互作用(力)の統一

素粒子間に働く力 (ゲージ粒子とよばれるボーズ粒子で媒介される)

- | | |
|------------|------------------------|
| (1) 電磁相互作用 | 電荷の間に働く力 |
| (2) 強い相互作用 | クォークを結びつけてハドロンを作る力 |
| (3) 弱い相互作用 | ベータ崩壊などの素粒子の崩壊現象にかかわる力 |
| (4) 重力相互作用 | 素粒子間の力としては非常に弱い力 |



電磁相互作用と弱い相互作用の統一(ワインバーグ・サラム理論)

1971

大統一理論
(未検証)

プランクスケール

大統一の2桁エネルギーの高いスケールでは、重力が強くなる
(重力が無視できなくなるスケール)

重力相互作用の特殊性

相互作用定数は次元をもつ

$$G = \frac{L^3}{MT^2}$$

重力の量子論で観測量を計算すると

$$\sum_n c_n \left(\frac{G^2}{a^{D-2}} \right)^n$$

D=4

a: 揺らぎの起こっている最小の長さ

時空が連続的であれば、 $a \rightarrow 0$ とするのが自然であり、無限種類の発散
= 重力相互作用の**繰り込み不可能性**

重力相互作用は全ての物質に普遍的に働く（等価原理）

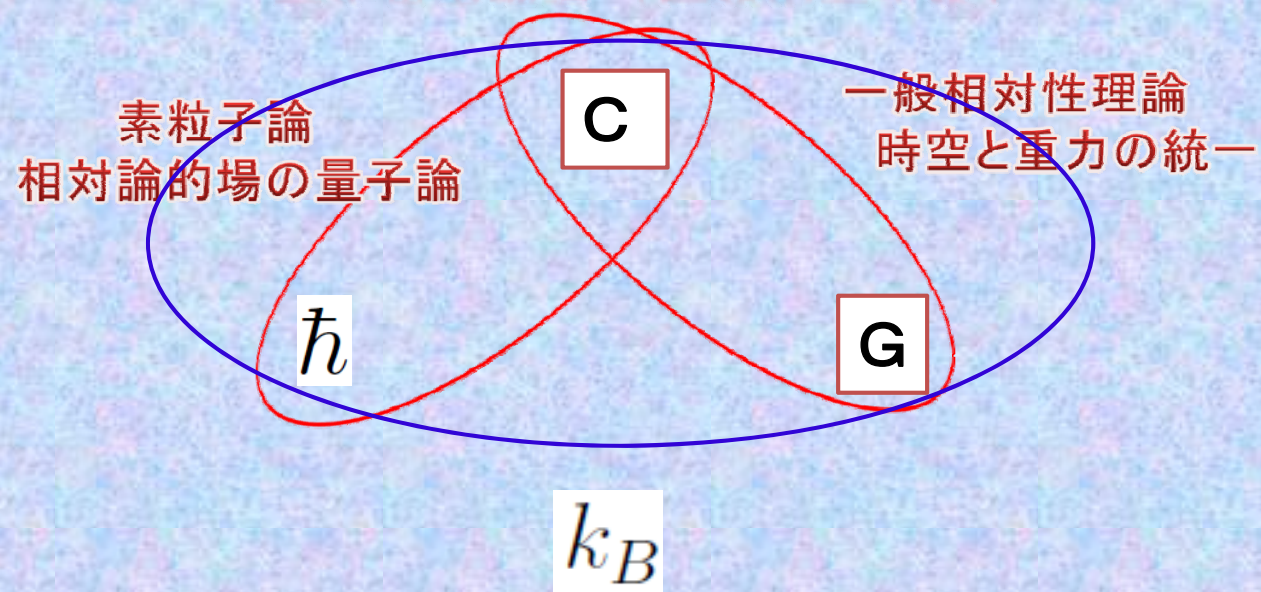
重力相互作用は、単なる力というより**時空のダイナミクス**である（一般相対論）

他の力とは質的に異なるのではないか？

新たな統一 その1

新たな統一を求めて

量子重力理論（時空の量子化）



現象の統一

次元の統一

$$c = \frac{L}{T}$$

$$\hbar = \frac{ML^2}{T}$$

$$G = \frac{L^3}{MT^2}$$

絶対的な質量、空間、時間のスケールが決まる。

$$M_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$$

プランク質量 10^{19} GeV

$$L_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

プランク長さ 10^{-35} m

[GUT図](#)

$$T_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

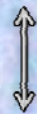
プランク時間 10^{-43} 秒

プランクスケールは量子力学と重力理論が会うところ

プランクスケールで何が起こるのか？

(1) 重力エネルギーの増大

質量 m の粒子



量子力学的拡がり(コンプトン長さ)

$$r_c = \frac{\hbar}{mc}$$

静止エネルギー

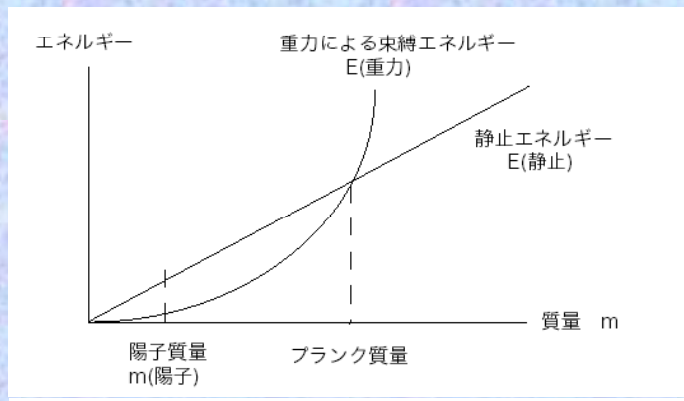
$\gg$

重力による束縛エネルギー

$$E(\text{静止}) = mc^2$$

vs.

$$E(\text{重力}) = \frac{Gm^2}{r_c} = \frac{Gm^3c}{\hbar}$$



プランク質量では、両者が等しくなる

$$m = M_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$$

重力はプランクスケールで強くなる。 → 4つの力の統一

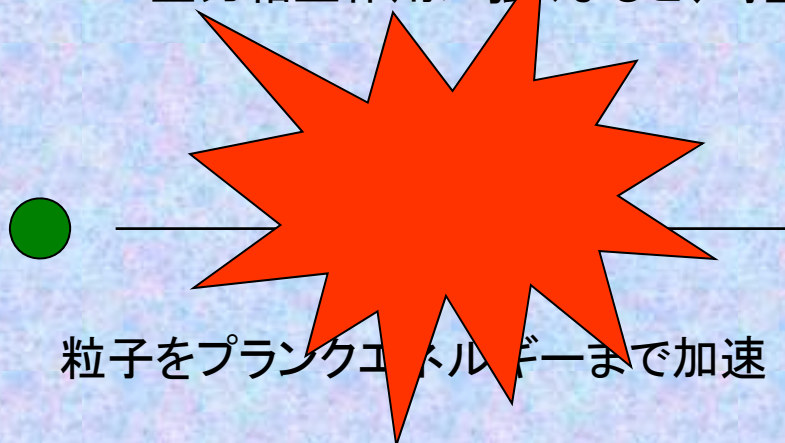
(2) 時空の破たん 高エネルギー散乱実験

$\Delta p \Delta x \geq \hbar$ 高エネルギーになるほど、細かい構造が見える。(量子論)

1 eV	10^{-7} m
1 keV = 10^3 eV	10^{-10} m
1 MeV = 10^6 eV	10^{-13} m
1 GeV = 10^9 eV	10^{-16} m

エネルギーをプランクスケール 10^{19} GeV まであげると
プランク長さ 10^{-35} m の時空が見えてくるか？

重力は時空の揺らぎであるから、
重力相互作用が強くなると、時空自体が大きく揺らぐ



時空概念の変更

量子ブラックホールの生成

A cosmic background image featuring a bright yellow and orange nebula on the left and a black hole with a purple and blue accretion disk on the right. The text is overlaid on the left side of the image.

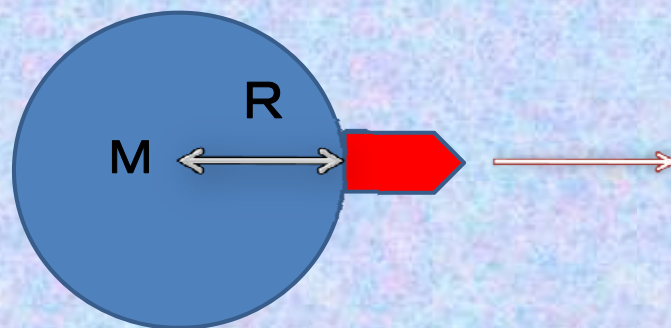
後半

ブラックホールの量子論と超弦理論

時空の微視的構造を目指して

ブラックホールとは？

ニュートン重力で理解すると



脱出速度

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

脱出速度が光速 c になるとロケットは脱出不可

$$v \leq c$$

脱出不可な時の臨界半径は

$$R_c = \frac{2GM}{c^2}$$

質量Mの物質が、臨界半径以下に集まると、重力が強くなりすぎて外へ脱出することが不可能となる。

ブラックホール その2

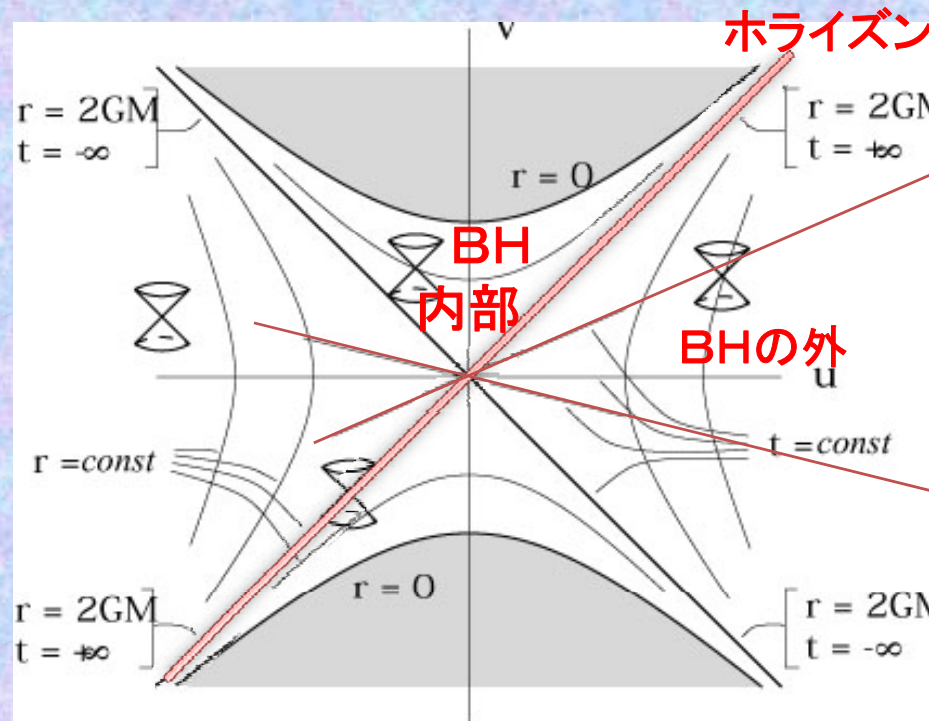
このような強い重力場を記述する理論は、**一般相対性理論**

アインシュタイン方程式の古典解としてシュワルツシルド・ブラックホール解

$$ds^2 = f(r)dt^2 - \frac{dr^2}{f(r)} - r^2 d\Omega^2$$

$$f(r) = 1 - \frac{r_H}{r}$$

$$r_H = \frac{2GM}{c^2}$$



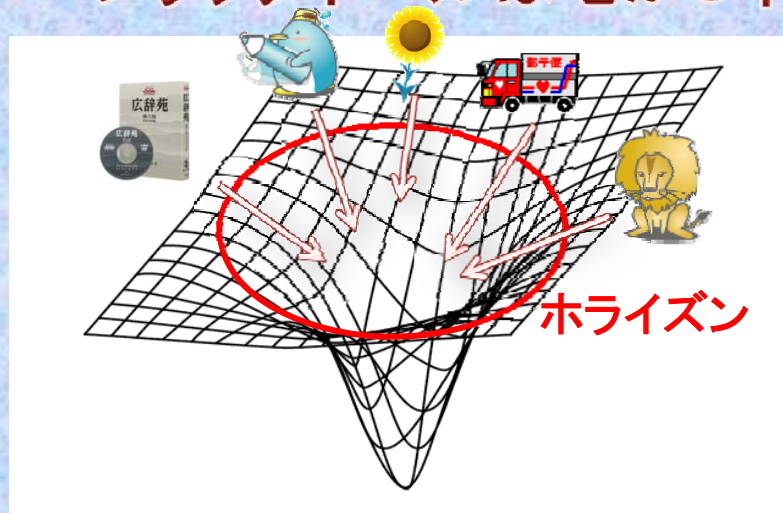
ホライズン

時間 t 一定

ホライズンはBHの境界である

ブラックホール その3

ブラックホールは毛が3本



何をBHに落としても、最後は
(質量、電荷、角運動量)の3つのみ

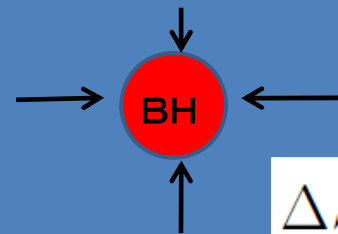
ホライズンの内側に隠れてしまうと、
外からは違いが全く見えない。

乱雑さ増大の法則

ブラックホールがあると熱力学第2法則(エントロピー増大の法則)が破れるのか？

$$\Delta S \geq 0$$

$$S = k_B \log W$$



$$\Delta S \leq 0 ?$$

答え: ブラックホールがエントロピーを持つとすると、熱力学第2法則は保たれる

$$\Delta S + \Delta S_{BH} \geq 0$$

ベッケンスタイン 1972

ブラックホール その4

ブラックホール熱力学

ブラックホールは**温度、エントロピー**などの熱力学的性質をもつ（ホーキング）

1974

$$T_H = \frac{\hbar c^2}{8\pi G M k_B}$$

量子論

$$S_{BH} = k_B \frac{c^3 A}{4 G \hbar} = k_B \frac{A}{4 L_{pl}^2}$$

A: ホライズンの面積



ブラックホールは熱い



太陽質量のBH
に対しては

$$T_H = 6 \times 10^{-9} K$$

$$S_{BH} = 10^{79} k_B$$

比較
(太陽のエントロピー)

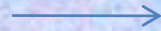
$$S_{\text{太陽}} = 10^{58} k_B$$

ブラックホール その5

ホーキング輻射



古典論

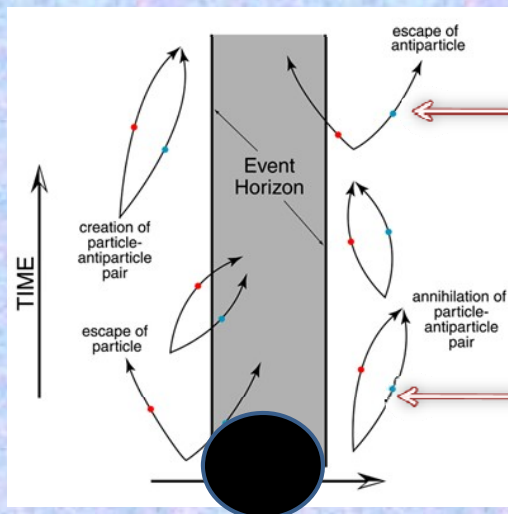


量子論では暖かい

$$T_H = \frac{\hbar c^2}{8\pi G M k_B}$$

なぜ量子論ではブラックホールは輻射を出すのか？

相対論的な場の量子論では、真空は常に粒子反粒子の生成消滅を繰り返すダイナミックな海である。



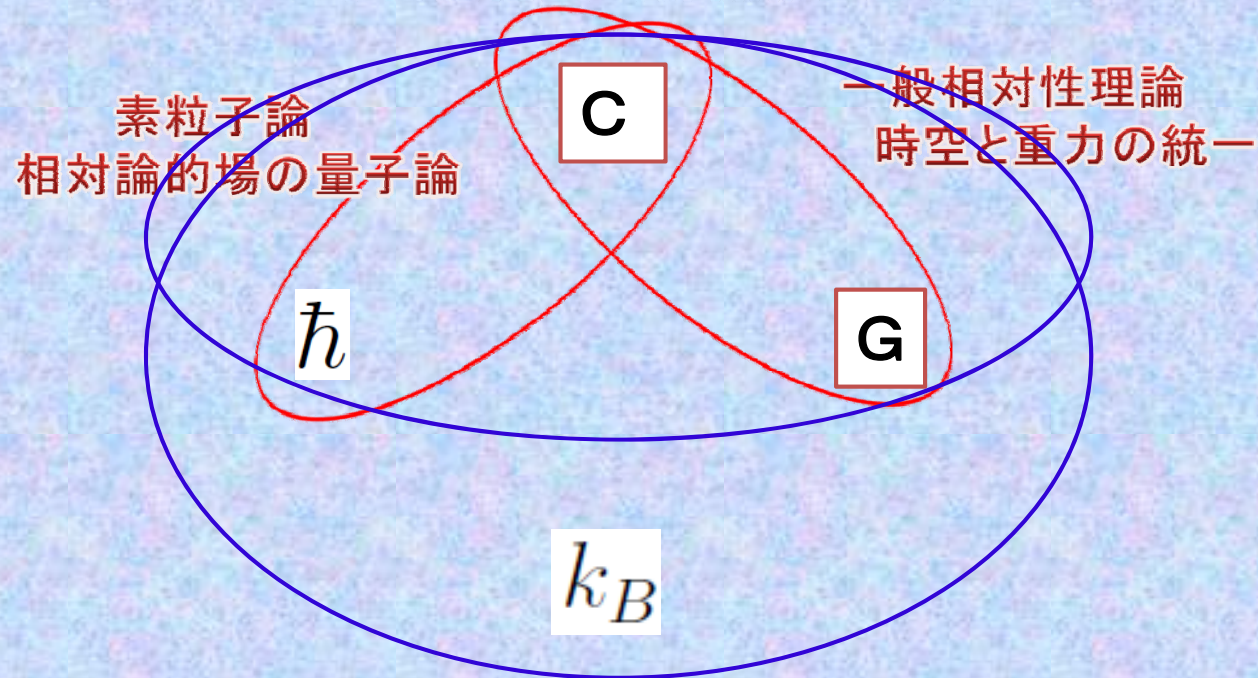
相棒がBHへ落ちると
その片割れが輻射となる

生成消滅を繰り返す
粒子反粒子

ブラックホールの蒸発
→ 情報喪失問題

ブラックホール その6

量子重力理論 (時空の量子化)



ブラックホールのような時空まで考えると
量子重力理論は、おのずから熱(統計)力学を含んでしまう。

では、マクロな熱力学に対応するミクロな統計力学とは何なのか？
ブラックホールの微視的な状態を記述するものとは何なのか？

量子重力理論の最も有望な候補

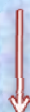
超弦理論

70年代から

超対称性をもつ重力理論: ボソンとフェルミオンの間の対称性

高次元の重力理論: Kaluza Klein 理論

など色々と考えられたが、どれも短距離の量子揺らぎが制御できない。
(繰り込み可能性の問題)



超弦理論 (1984)

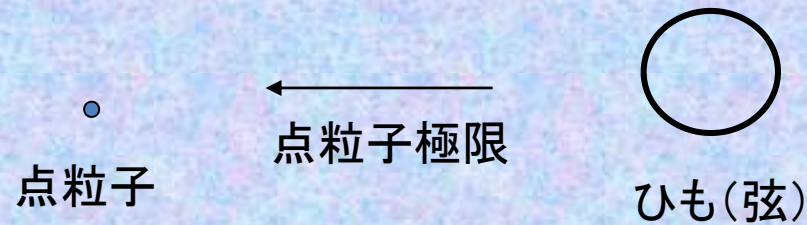
人類が手にした初めての発散のない重力の量子論

あらゆる意味での統一理論

- ・ **力の統一**: 重力を含む素粒子の全ての相互作用が弦で記述される
- ・ **物質と時空の統一**: 物質も時空の同じ弦から生成される
- ・ **アイディアの統一**: これまでに提案された様々なアイディアが一同に集合
ゲージ対称性、一般座標不変性、超対称性、高次元時空、非可換幾何
- ・ **次元の統一**: 基本的な長さのスケールをもつ (弦の拡がり)

弦とは何か

- 基本的構成要素を粒子ではなく、広がりを持つ紐(弦)と考える。



紐の各振動モードが、違う粒子として見える。

- 紐から出てくる粒子 物質と時空の統一

物質場(クォーク、レプトン)だけでなくゲージ粒子や重力場なども含む。

- 基本的長さを最初から包含

弦の張力 $Tension = \frac{1}{2\pi\alpha'}$ $\longrightarrow$ 弦の大きさ (string scale) $l_s = \sqrt{\alpha'}$

重力定数はこの基本的な長さから与えられる

$$G_{10} = \frac{e^{2\phi} l_s^8}{\hbar}$$

ϕ dilaton と呼ばれるスカラー場の値

超弦理論 その3

弦の基本的長さとは？ → 時空の最小長さ

- 量子力学の不確定性関係

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

量子力学で探索できる長さの限界 = $\Delta x = \hbar / \Delta p = \hbar c / \Delta E$

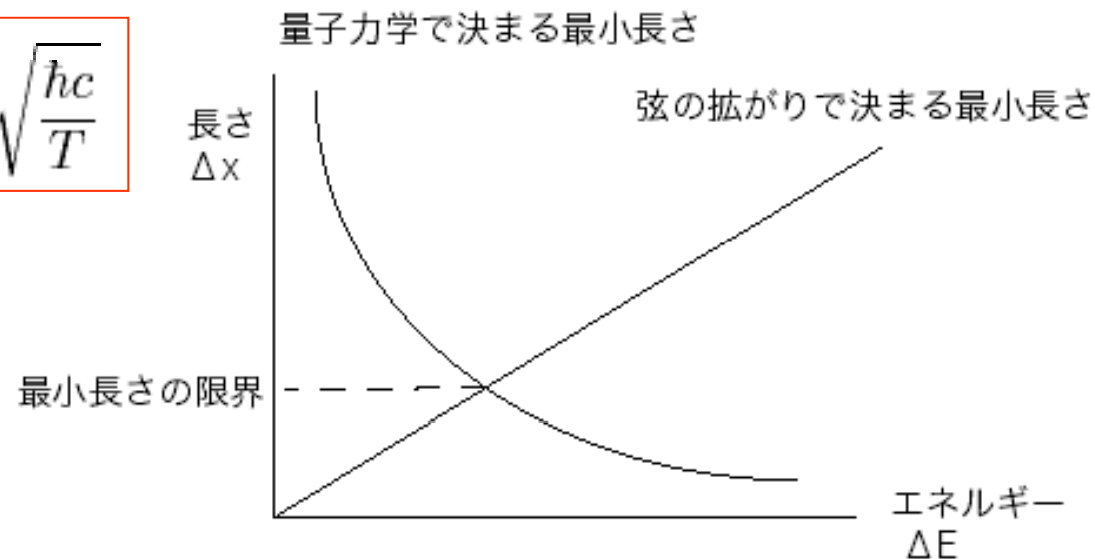
- 弦理論に固有の拡がり（エネルギーが上がるほど弦は拡がる）

弦の拡がりで決まる長さの限界 = $\Delta x = \Delta E / T$

T 弦の張力

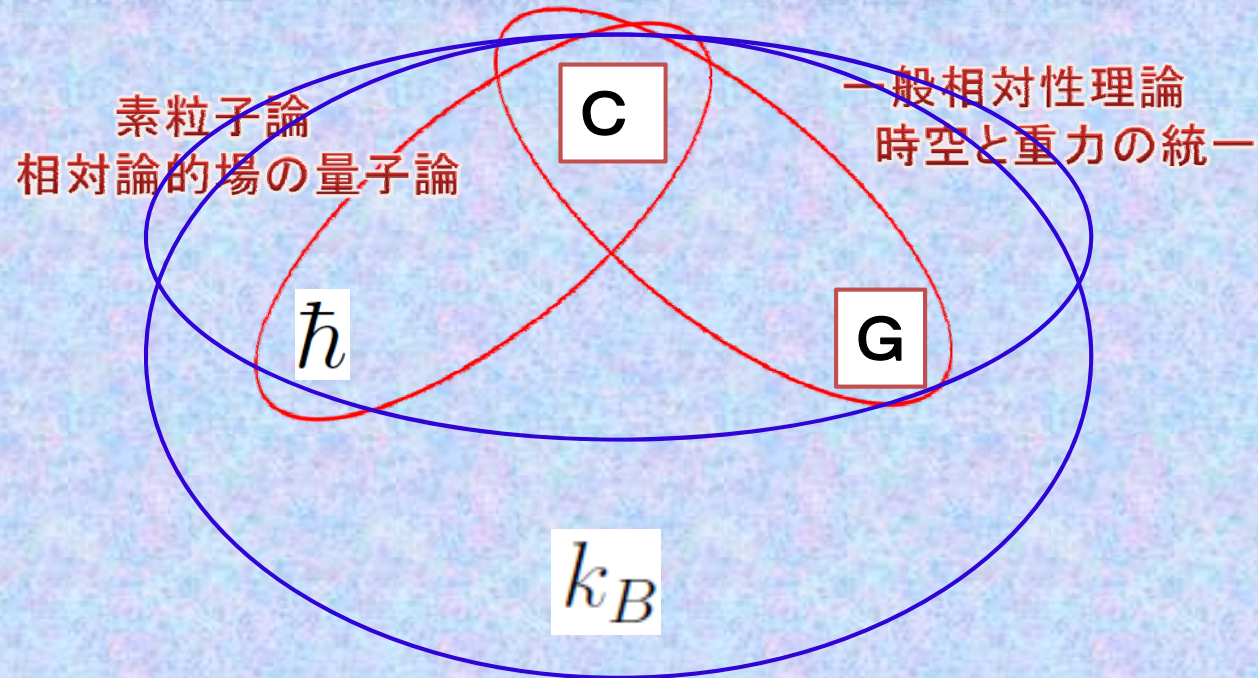


$$\text{最小長さの限界} = L_{\text{弦}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{T}}$$



超弦理論 その4

超弦理論 = 人類が初めて手にした量子重力理論

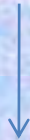


超弦理論も、自然に量子統計力学を含んでいる

弦からDブレーンへ： 時空の微視的状态を与える。

Dブレーンとは何か

弦理論： 点粒子を弦に広げることで発散の問題を解決



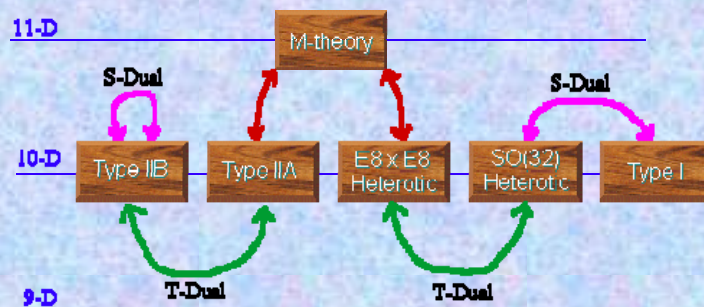
弦理論は弦だけを記述する理論ではない 1995 Polchinski

Dブレーンの発見

- ・ D0粒子、
- ・ Dストリング（基本弦とは異なる弦）
- ・ D2 ブレーン（膜）
- ・ より高次元の物体
- ・ Dインスタントン： 0次元物体＝一種の時空アトム

→ 行列模型

これらの様々なものが等しく重要 =Dブレーン民主主義



知られている全ての弦理論は、
実は一つの理論の違った
側面を見ているにすぎない。

弦理論の新たな成功: Dブレーンによるブラックホール・エントロピーの
微視的説明



$$S_{BH} = \frac{A}{4\hbar G} = \frac{A}{4l_{PL}^2}$$

エントロピーはBHの体積でなく
ホライズンの面積に比例。

$$S_{BH} = k_B \log W_{BH}$$

Wに対応する状態数とは
何なのか？



時空を構成している微視的状态とは何なのか？

Dブレーン: ゲージ理論のもとになっている時空を構成している微視的状态

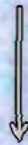
Dブレーンを使って、正しくブラックホールの状態数(エントロピー)が求められる。
ブラックホールの量子統計力学

ホログラフィック原理: 重力理論とゲージ理論の間の深い関係(ゲージ重力対応)

二重(双対)性

現状

ある特殊な場合には、Dブレーンを使ってブラックホールエントロピーが
(理由はわからないが)正しく計算できる。



より一般の場合は？
その背後にある物理的な見方は？
時空の微視的状态とどのように関係しているのか？

まだわからないことだらけ

超弦理論 その8

弦理論の「成し遂げたこと」と「未解決問題」

「成し遂げたこと」

- ・ 人類がはじめて手にした統合的な量子重力理論
- ・ 様々なアイディアの統一
- ・ ブラックホールエントロピーの微視的説明



「未解決問題」

- ・ 宇宙始めに時空はどのように生成されたのか
- ・ 弦理論から時空が生まれるダイナミクスを解くことはできるのか？
一つの候補は行列模型
- ・ 弦理論は素粒子の基本的な問題を解決することはできるのか？
 - クォークやレプトンの質量 (CKM行列)
 - 世代数
 - 宇宙の物質反物質の非対称性の起源？
 - ヒエラルキー問題の解決
 - 暗黒エネルギーの謎、宇宙項問題の解決
 - 暗黒物質
- ・ どのようにして検証するのか

今日の講演のまとめ

現代の基礎物理学への道のり

統一の歴史

力学、電磁気学 → 相対性理論、量子力学、統計力学
これらを基礎にして 素粒子論
さらなる統一を目指しているのが **量子重力理論**

ブラックホールの量子論と超弦理論

量子重力理論の最も有望な候補が**超弦理論**
ブラックホール時空まで考えると、熱統計力学までもが統一される

しかしまだ3合目

時空とは何なのか？ 創発的な時空
時空と物質の**統一**とは？

この山は本当に富士山？

