



LHC で探る余剰 「空間」 次元

「なんで、余剰次元なんて突飛なことを考えるの？」
「どうやって余剰次元をみるの？しかもコライダーで？」



奥村恭幸

東京大学素粒子物理国際研究センター

自己紹介

- 奥村恭幸 (おくむらやすゆき)

- 名古屋大学 (- 2012)

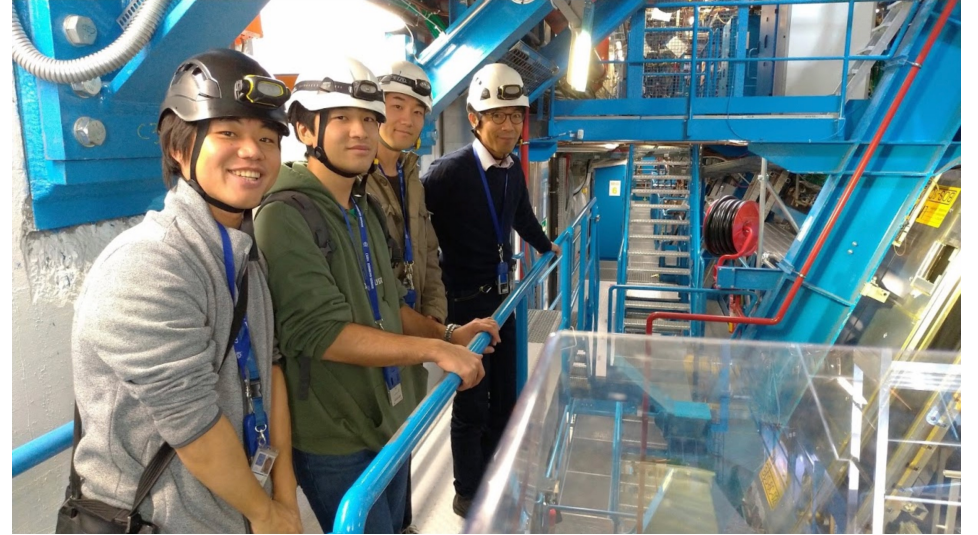
- 2006 はじめて、“CERN”へ。
“夏の学校”の学生として派遣された。
- LHC-ATLAS 実験の建設、試運転、
初実験、最初期データ解析の結果で博士。

- シカゴ大学・フェルミラボ (2012 - 2016)

- ポスドク研究員。

- 東京大学、素粒子センター (2016 -)

- CERN に常駐して、学生や仲間と実験研究に取り組む。

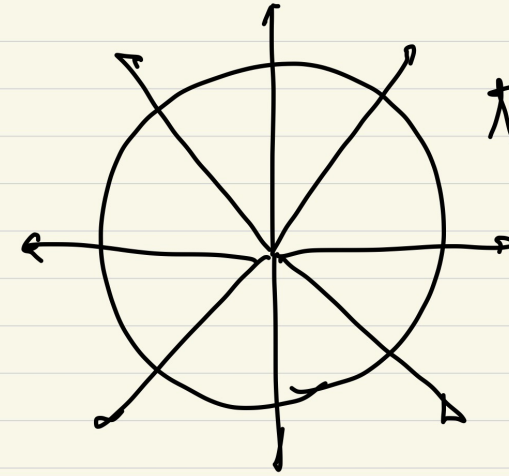


前置き: ガウスの法則

- 力の距離依存性と、空間の次元について考えよう

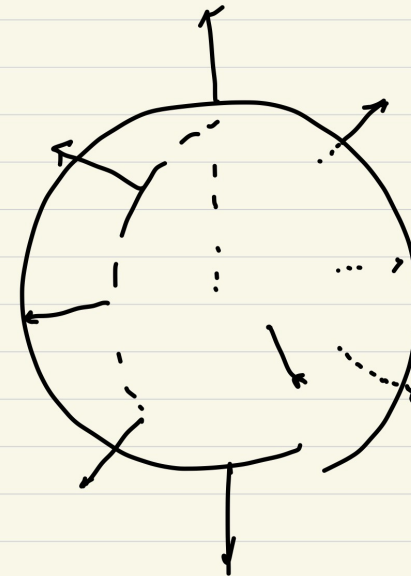
逆二乗の法則

= 空間が三次元であることの証拠



力線の密度 = 力の大きさ

$$F \propto \frac{1}{r}$$



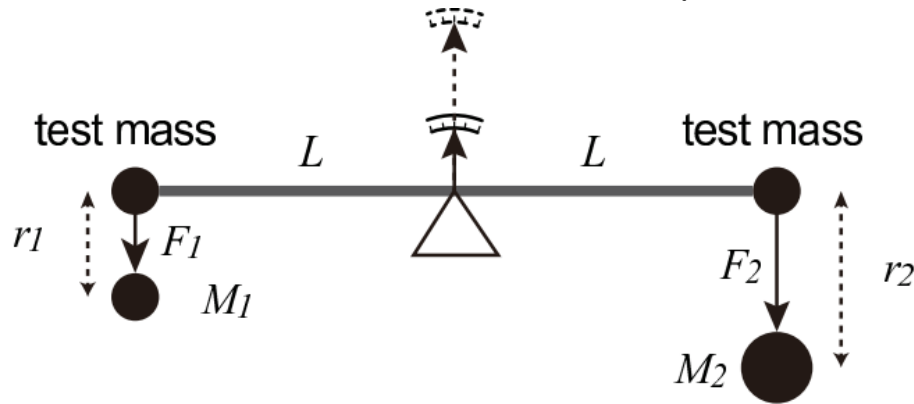
$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

前置き: どのくらい重力をしっているか?

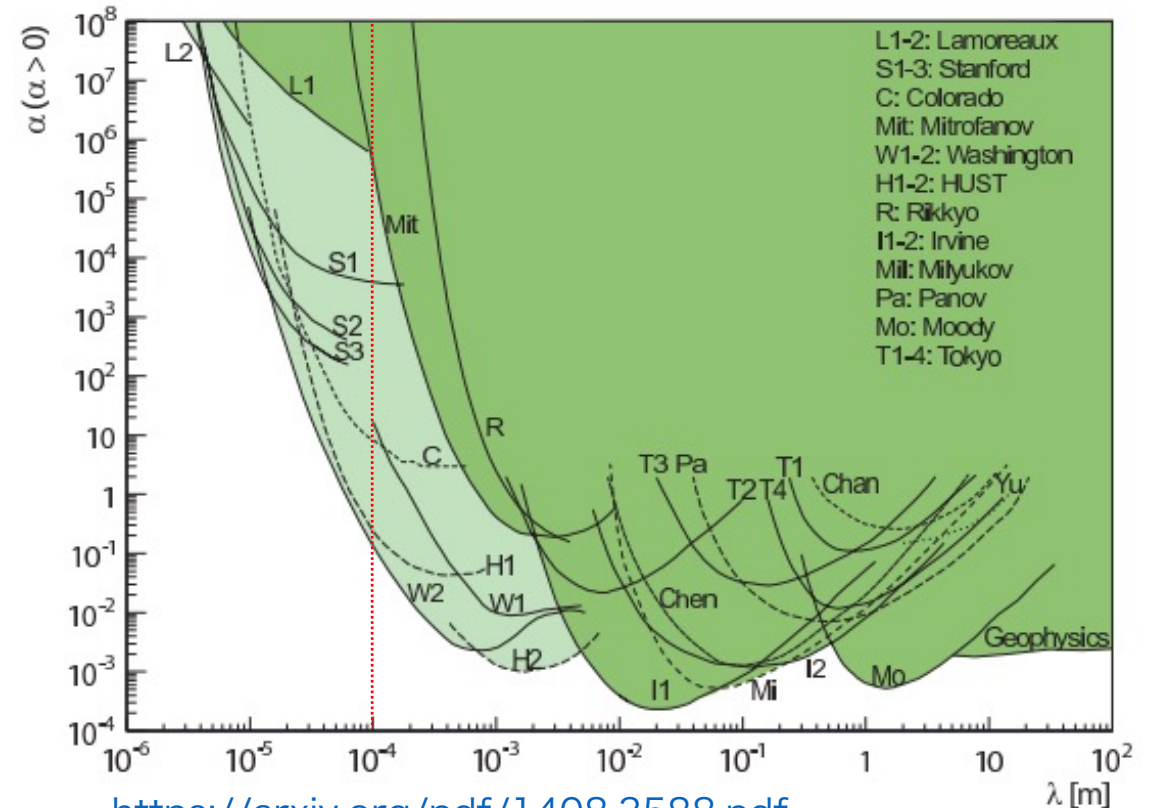
どのくらい小さい距離まで、重力で
ガウスの法則が正しいことを知っているか?

ニュートン定数からのズレの棄却領域

$$F(r) = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



10⁻⁴ m くらいまでは成り立つ



<https://arxiv.org/pdf/1408.3588.pdf>

前置き：素粒子物理の力は？

• 標準模型における相互作用が感じる空間次元は？

- ゲージボソン (電磁気のカ・強いカ・弱いカ)
- ヒッグスボソン (湯川のカ)

• 加速器は**顕微鏡**

- 「1.2 GeV の運動量で叩く」は「1 fm の分解能で世の中をみる」と、解釈できる。
- $100 \text{ GeV} = 1.2 \times 10^{-17} \text{ m}$ 。
- 加速器実験データは、3次元+1次元の計算で忠実に再現される

$10^{-17} \sim 10^{-18} \text{ m}$ までは 3 次元の理論が成り立っている

$$p = \hbar k$$
$$pc = \hbar c \frac{2\pi}{\lambda}$$
$$\lambda = \frac{\hbar c}{pc} \cdot 2\pi = \frac{1.2 \text{ GeV}}{\text{運動量}} \text{ fm}$$

波数と波長

" $\hbar c = 200 \text{ MeV fm}$ "

隠された余剰次元を仮に考えてみよう

- 余剰次元はあっても実験と矛盾してはダメ
 - 素粒子標準模型の登場人物 $< 10^{-18}$ m
 - 重力 $< 10^{-4}$ m

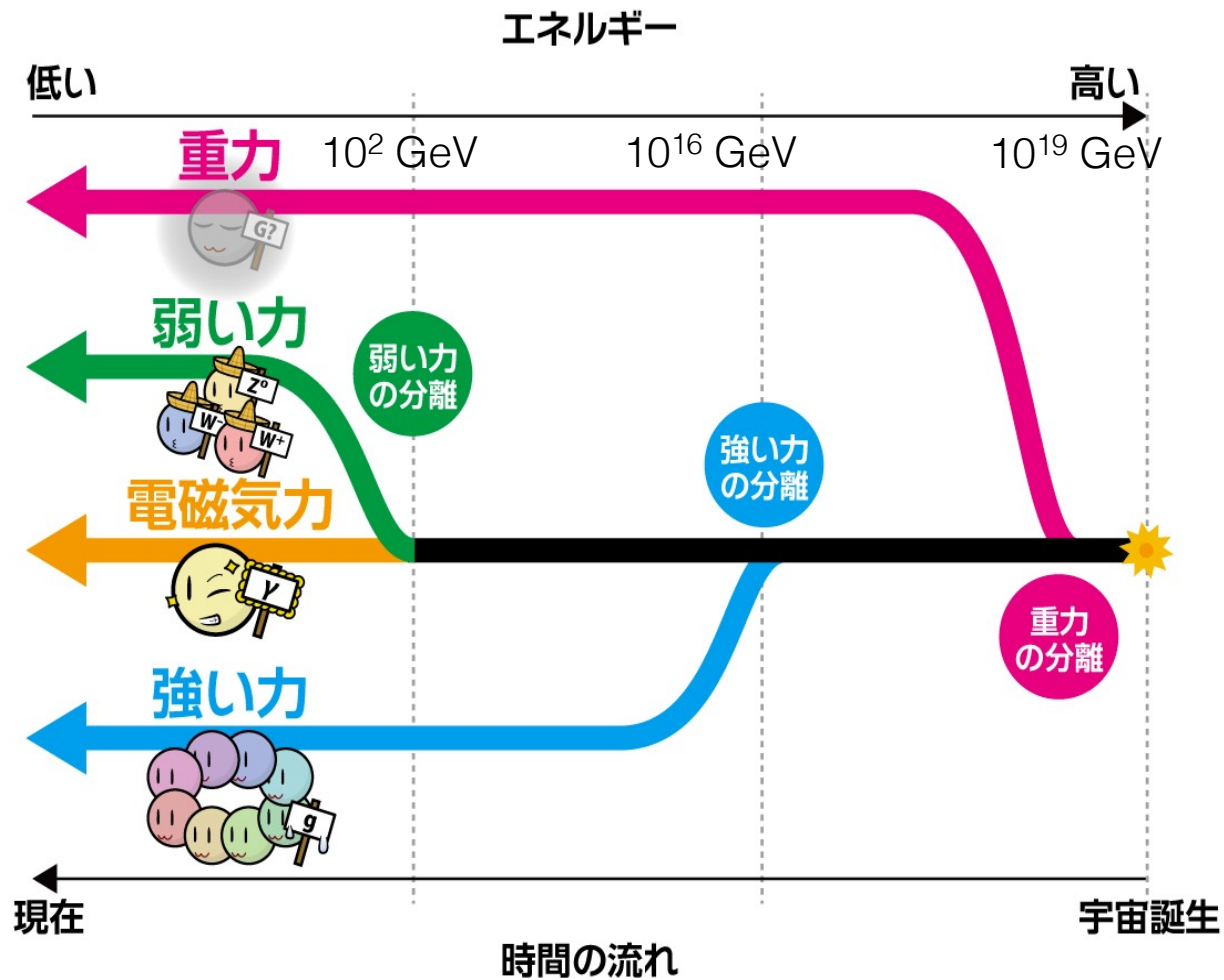
余剰次元はあっても重力だけが感じるものであるべき
少なくとも 10^{-4} m より「コンパクト」であることが必要

- コンパクト化された次元の見え方
 - 一つの次元が“巻き上げられた”二次元宇宙
 - 「ホースは遠くから見るとただの線 (一次元)」



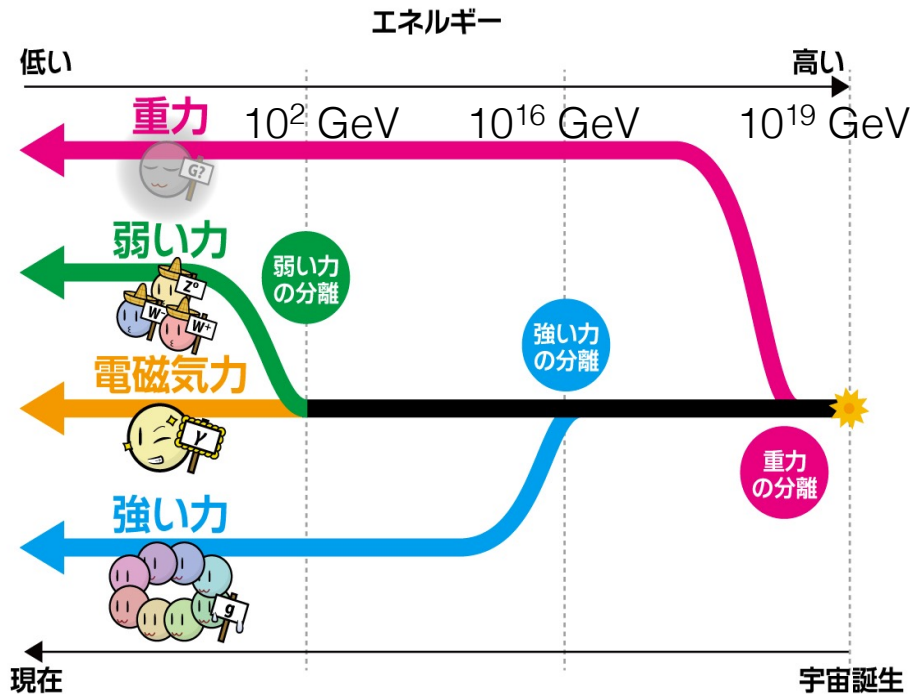
ところで階層性問題

素粒子物理をまじめに勉強すればするほど、この世の中の現象は 10^{16} GeV とか 10^{19} GeV とかで記述されるのが自然な気がしてくる



プランクスケール

重力が他の力と同じくらい強くなるスケール



1. 重力は、とても高エネルギー (短距離) で、他の相互作用と同じくらいの大さの相互作用になりうる。
2. 重力が弱すぎるためそのエネルギーはとても大きく 10^{19} GeV

重力定数が実は大きかったなんてことがあると、プランクスケールと電弱スケールの階層性問題はなくなりうる。

重力相互作用 電磁気相互作用

$$G \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad e^2 \frac{\hbar c}{r^2}$$

↓

$$G \frac{E_1 E_2}{r^2} = G \frac{(\hbar c)^2}{r^4} \qquad \text{量子的相互作用}$$

見出しの式に $\hbar c$ を乗ると r^4 に逆比例。

$$G \frac{(\hbar c)^2}{r^4} = e^2 \frac{\hbar c}{r^2}$$

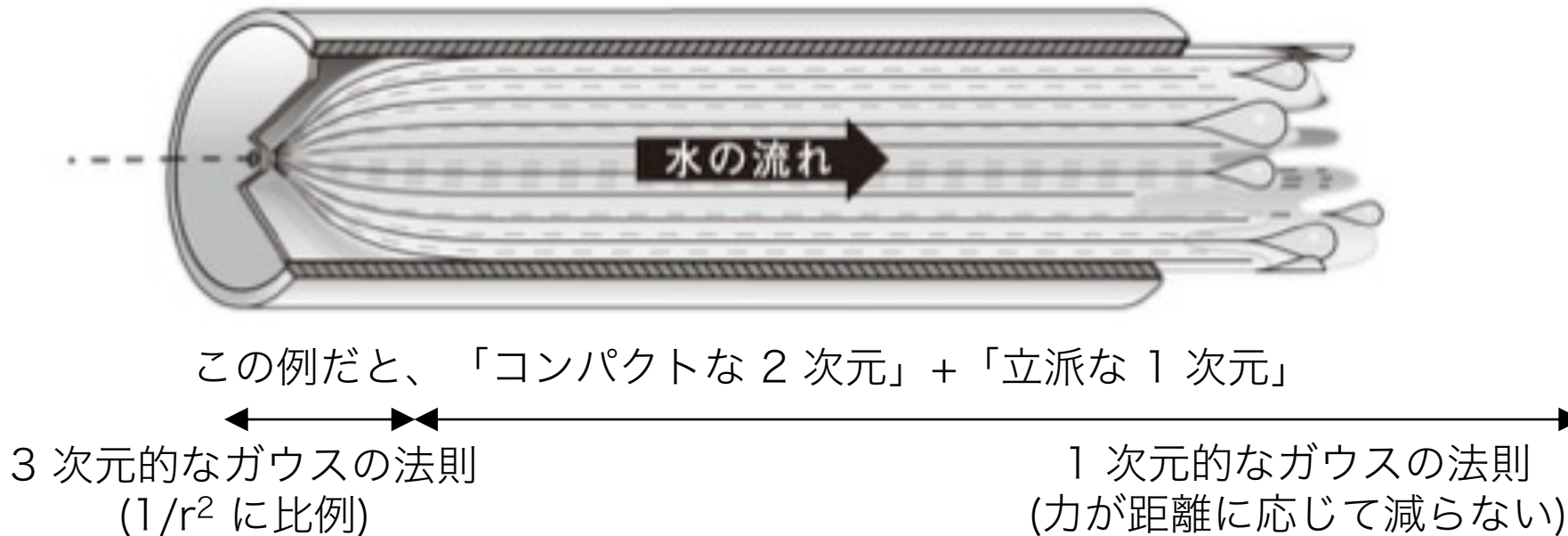
$$R \propto \sqrt{G}$$

プランクスケール $\propto \frac{1}{\sqrt{G}}$

プランクスケール 10^{19} GeV

「実は強い重力」を余剰次元を使って説明できる？

- コンパクトな余剰次元に対する力線



余剰次元によって $1/R^2$ で力線密度が薄まっている
(最終的な見えない次元方向の) 断面の大きさは、 R の大きさで決まっている (R^2)

“思考: 「重力が弱すぎる」は実は嘘で余剰次元のせいで薄まっている仮説。”
ちなみに、コンパクトな余剰次元がでかいほど & 次元数が大きいほど薄まる。

階層性問題の解決としての余剰次元

- 余剰次元によるプランクスケールの修正を真面目に式で書く
 - コンパクト化スケール R で
 - n 個のフラットな余剰空間次元を足した場合

四次元の弱い重力

$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{\text{Planck}}^2} \frac{1}{r}$$

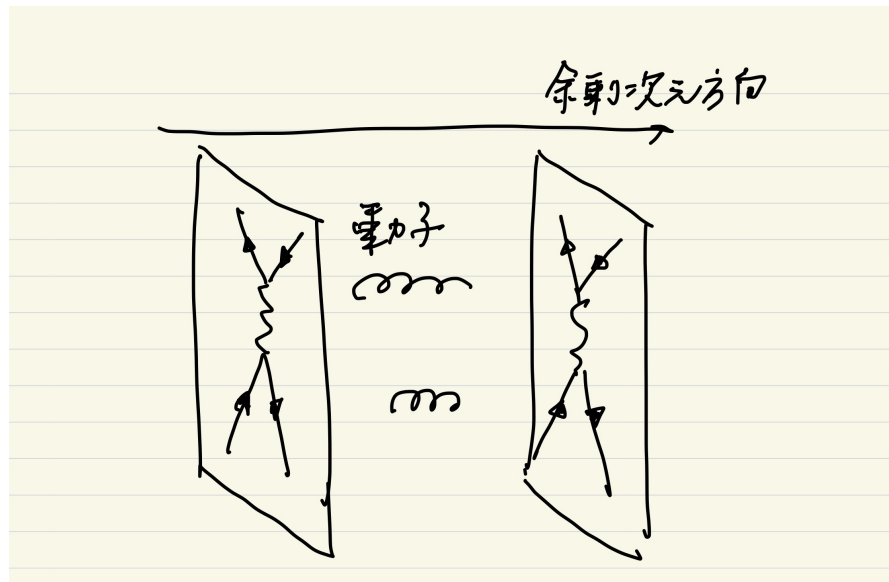
高次元の強い重力

$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_D^{2+n}} \frac{1}{r^{1+n}} \quad (\text{small } r)$$
$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_D^{2+n} R^n} \frac{1}{r} \quad (\text{large } r)$$

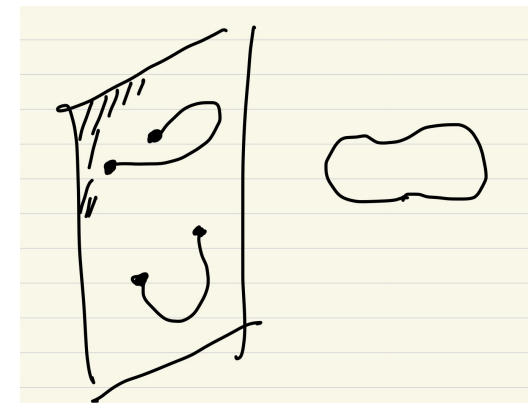
- 真のプランクスケール
- 四次元時空では重力は見かけ上弱く見えるだけ
真のプランクスケールは実は結構低エネルギー → “階層性問題の解決案”
- プランクスケールを TeV まで下げる余剰次元のサイズは？
 - $n=1$: 太陽系サイズ (非現実的), $n=6$: 100 fm (現実的)

ブレーン

- グラビトンだけが行き来できるコンパクトな余剰次元
 - 素粒子標準模型は 10^{-18} m までのポテンシャルの振る舞いを正しく記述
 - 「標準模型粒子」は余剰次元方向を感じない
 - 3次元 + 1次元のブレーンに束縛されている
 - 重力だけが、余剰次元による薄まる効果をうける



ひも理論の言葉を借りるならば、
標準模型の粒子 (spin 0, 1/2, 1) は開弦
重力子 (spin 2) だけが閉弦



ブレーン + 余剰次元という新しい時空のコンセプトは、
階層性問題のよい解決になりそう！

新しい物理を示す王道手法

1. 「実験データ」を用いて、
「新しい現象」や「新しい粒子」の発見する
2. 新しい現象の性質の詳細な理解により、
新発見の裏にある、「新しい物理」を確立する

ブレーン + 余剰次元をしめす
加速器実験のデータで見つけられる新現象はあるか？

グラヴィトン とKK モード

- 余剰次元方向の運動量 = 4次元世界の質量

数式が出てきますが、「議論の本質」だけ。

$$p^2 = 0 = g_{AB} p^A p^B = p_0^2 - \mathbf{p}^2 \pm p_5^2$$

5次元時空での質量 0 粒子

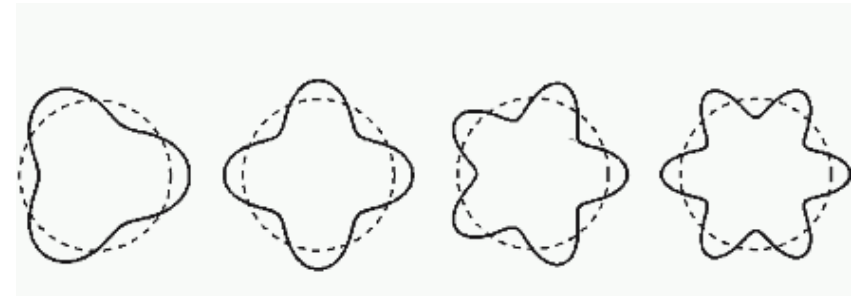
$$p_0^2 - \mathbf{p}^2 = p_\mu p^\mu = \mp p_5^2 \quad p_\mu p^\mu = m^2$$

5次元目の運動量が
4次元の質量に見える

- KG 方程式を“Rで巻かれた周期境界条件”の下、解く

$$A_n \cos ny/R + B_n \sin ny/R$$

$$m_n = n/R$$

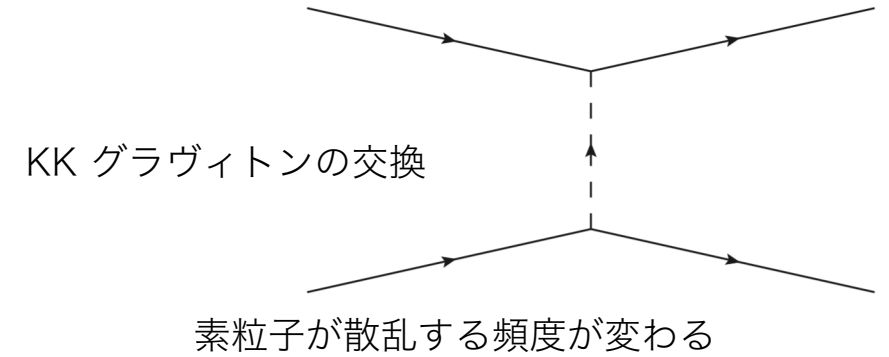
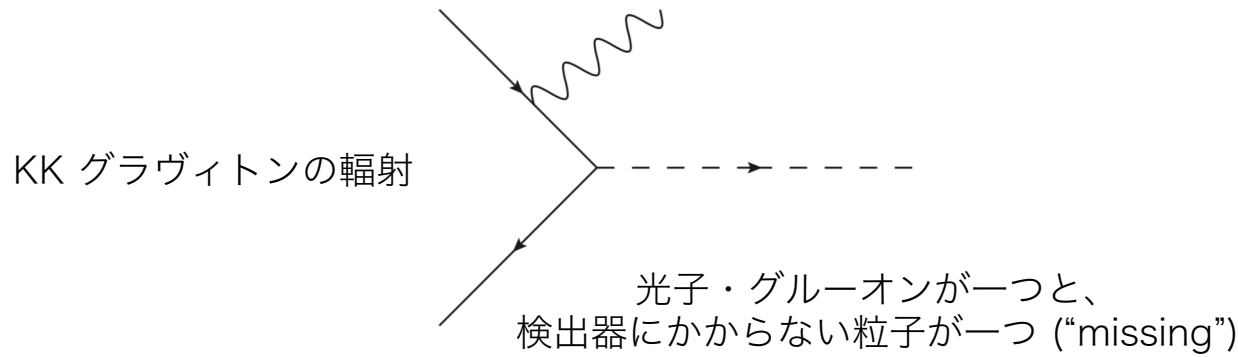


- 余剰次元に運動できる粒子(重力子) はKK モードを持つ

- $1/R$ がそんなに大きくなりなく、連続的な質量スペクトラム

KK モードの見え方

- 2つの新しい相互作用を考えてみよう



- 加速器実験で見えるか？

- 一つ一つのダイアグラムの寄与はしょぼい、けど **YES**

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \sum_k^{M_k < \sqrt{s}} \left| \begin{array}{c} \text{Diagram with radiation} \\ M_k \end{array} \right|^2$$

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \left| \sum_k^{\infty} \begin{array}{c} \text{Diagram with exchange} \\ M_k \end{array} \right|^2$$

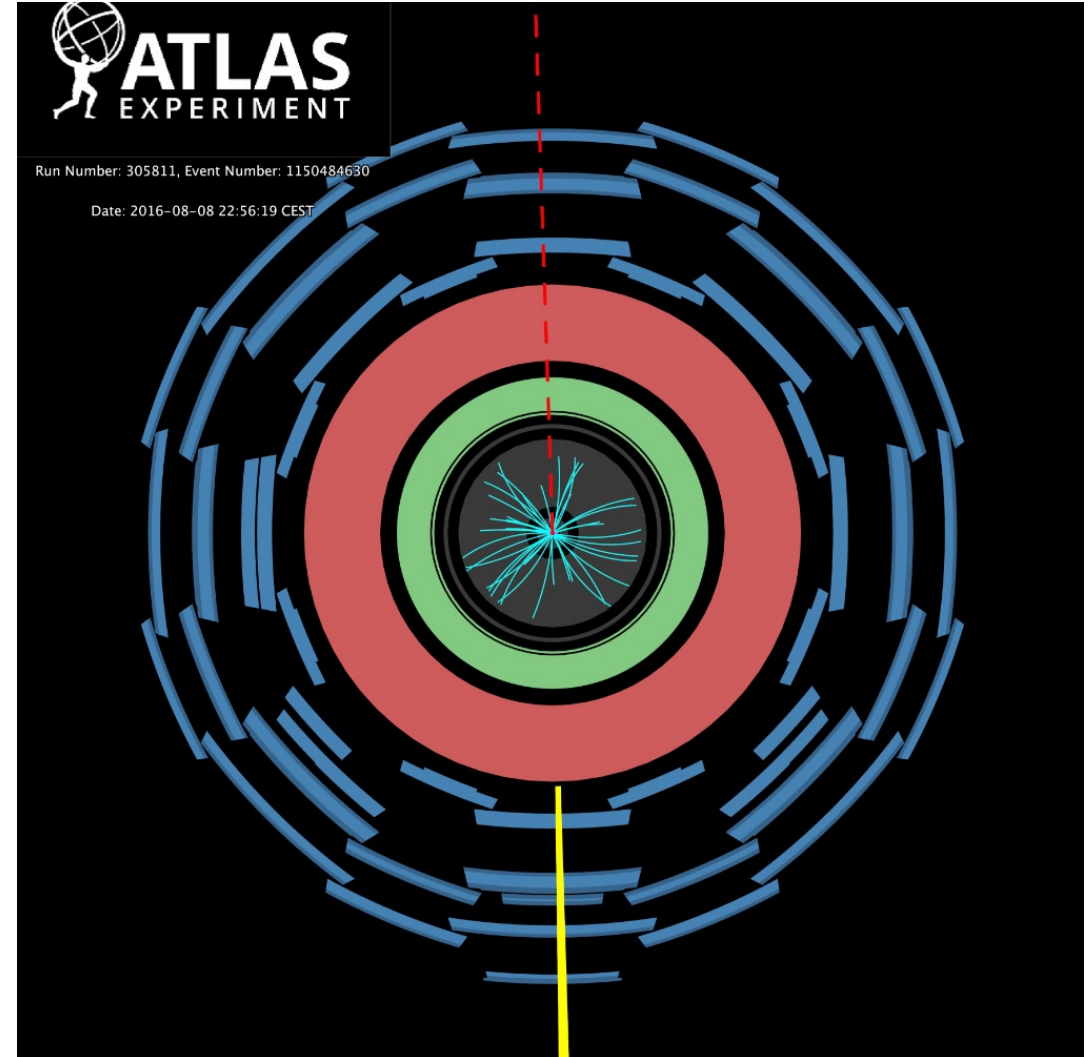
KK グラビトンの輻射探索

光子・グルーオンが一つと、
検出器にかからない粒子が一つ (“missing”)

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \sum_k M_k < \sqrt{s} \quad \left| \begin{array}{c} \text{Diagram} \\ \text{with } 2 \end{array} \right.$$

(MET+jet) 事象選別

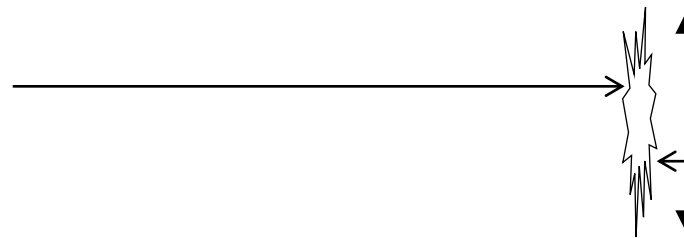
- Missing ET トリガー
- 高運動量ジェット
- 欠損横運動量 (Missing ET)
 - 運動量保存するはずなのにアンバランス
 - 検出できない粒子の証拠



ブラックホール生成のモデル

- 修正されたシュバルツシルト半径 (断面積)

- 平坦な n 個の余剰次元の場合



The diagram shows a horizontal line representing an incoming particle or wave from the left, indicated by an arrow. It strikes a vertical, jagged line representing the event horizon of a black hole. A vertical double-headed arrow to the right of the horizon indicates its radius, labeled $2r_s$.

$$r_S = k(n) \frac{1}{M_D} \left(\frac{M_{BH}}{M_D} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

- ブラックホールの反応断面積

$$\pi r_S^2$$

- ブラックホール生成の閾値エネルギー

- コンセプト：
物質波長 $< r_s$

$$\frac{2\pi}{M_{BH}} \lesssim 2r_S \sim \frac{1}{M_D} \left(\frac{M_{BH}}{M_D} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

$$\Rightarrow M_{BH} > kM_D$$

ブラックホール崩壊のモデル化

- “カラフル”, “Charged” で “角運動量” をもつブラックホールは “個性” と “質量” を四つの相で失っていく

1. “脱毛” 相 (balding phase)

- 重力子・ゲージボソンを輻射
- ゲージチャージを失う

2. スピンダウン相

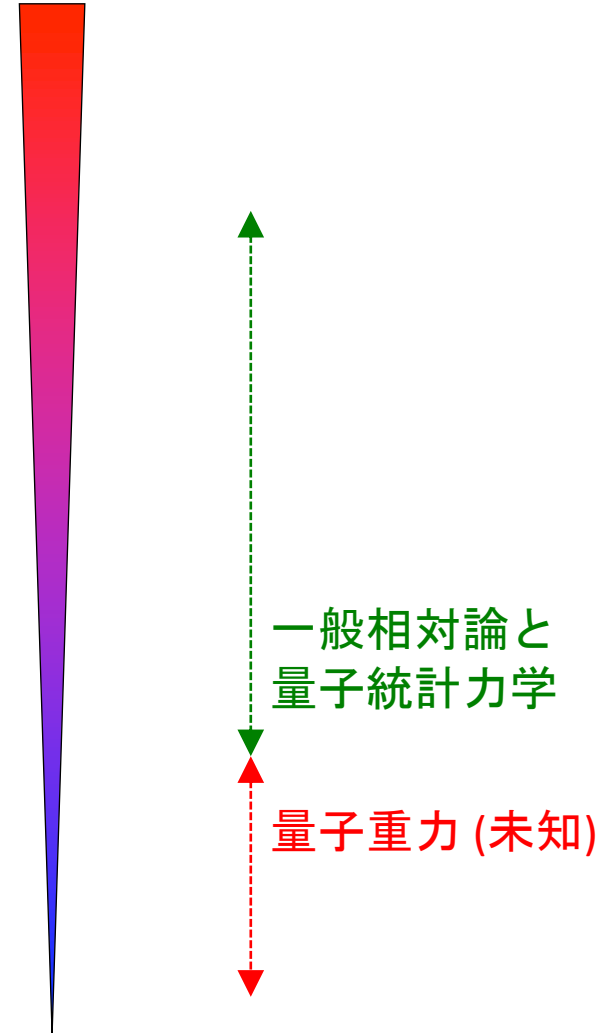
- ホーキング輻射を通じて角運動量を失う

3. シュバルツシルト相

- ホーキング輻射を通じて質量を失う

4. プランク相 ($M_{\text{BH}} \sim M_{\text{D}}$)

- シュバルツシルト半径と物質波長が同程度
- “量子重力” によって 2 (3) 体崩壊 (仮説)



ブラックホール崩壊のモデル化

- “カラフル”, “Charged” で “角運動量” をもつブラックホールは “個性” と “質量” を四つの相で失っていく

1. “脱毛” 相 (balding phase)

- 重力子・ゲージボソンを輻射
- ゲージチャージを失って対称になる

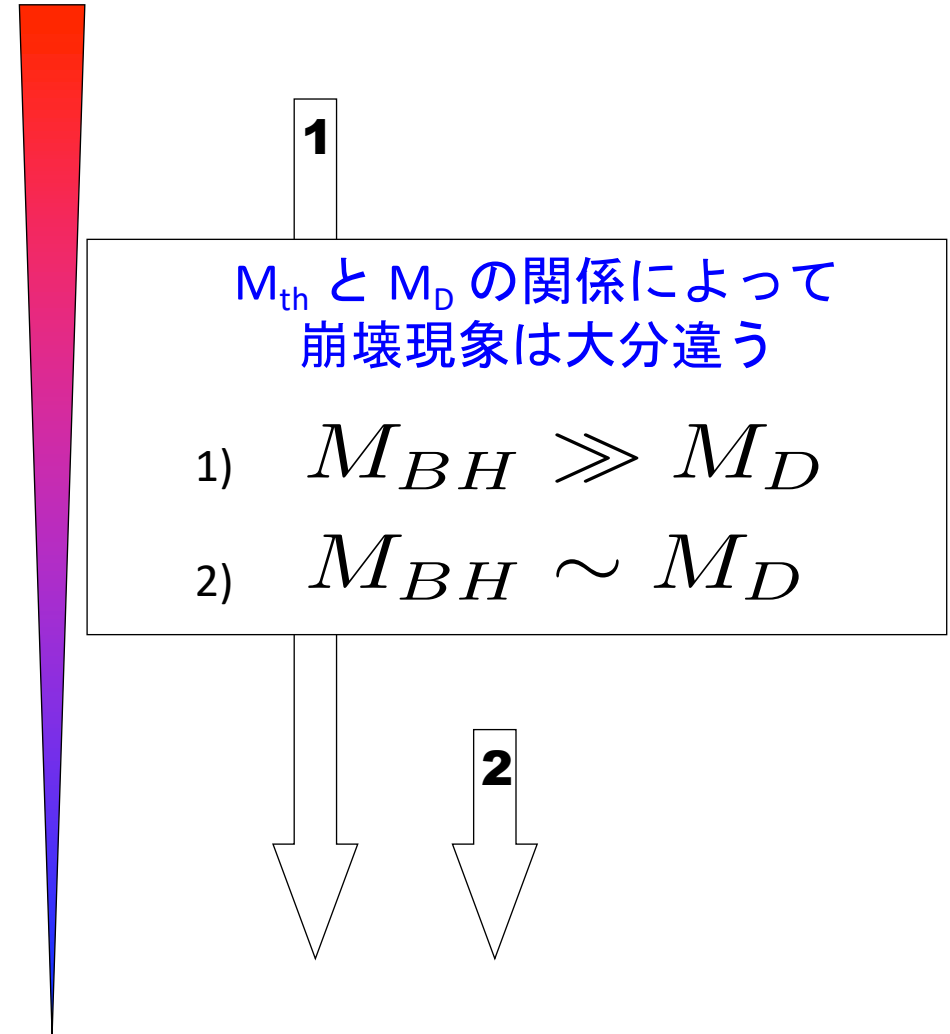
1. ホーキング輻射で調べる

2. 量子重力による BH 崩壊現象を探る！

「BH質量の閾値」 「量子重力へのアクセス」

4. ノランク相 ($M_{BH} \sim M_D$)

- シュバルツシルト半径と物質波長が同程度
- “量子重力” によって 2 (3) 体崩壊 (仮説)



1. 余剰次元は階層性問題の解決になりえる、
動機づけされる、実験データでテストすべきアイデア
2. 「実験データ」を用いて、余剰次元が予言する
「新しい現象」や「新しい粒子」を探索中
 - 大きな損失横運動量を伴う現象 (KK グラヴィトンの生成)
 - 散乱レートの異常 (KK グラヴィトンの交換)
 - ブラックホール生成
 - 小さい空間で強い重力 = シュバルツシルト半径の拡大 =
LHC 衝突でブラックホール生成の可能性
3. 新しい現象の性質の詳細な理解により、
新発見の裏にある、「新しい物理」を確立する

ミュオントリガーの研究について

トリガーが大事！

こんなに大きな装置をみんなで
協力して作って動かして
ワクワクする物理実験が
できるのは、やっぱり
面白いなあと思います
次の石野さんの授業で

