



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)

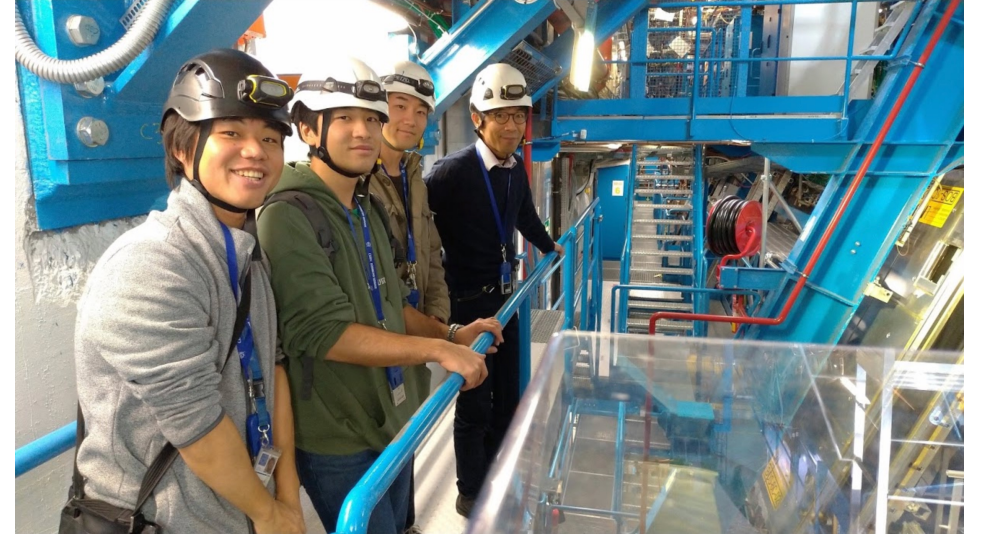
- 2006 はじめて、“CERN” へ。
“夏の学校” の学生として派遣された。
- LHC-ATLAS 実験の建設、試運転、
初実験、最初期データ解析の結果で博士。

- 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。

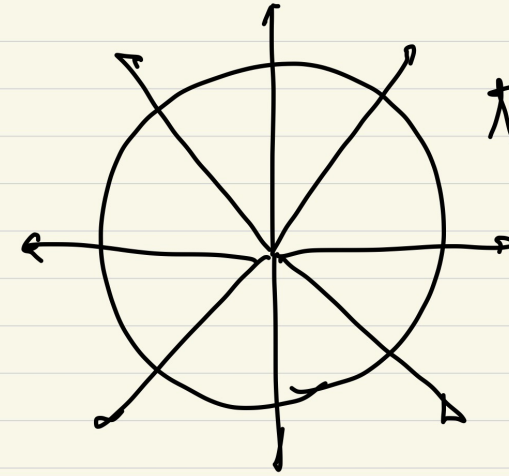


前置き: ガウスの法則

- 力の距離依存性と、空間の次元について考えよう

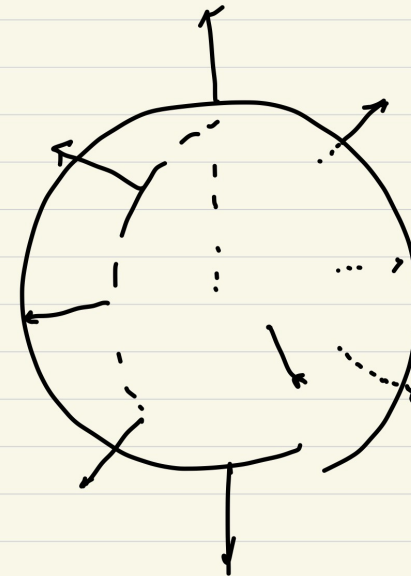
逆二乗の法則

= 空間が三次元であることの証拠



力線の密度 = 力の大きさ

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



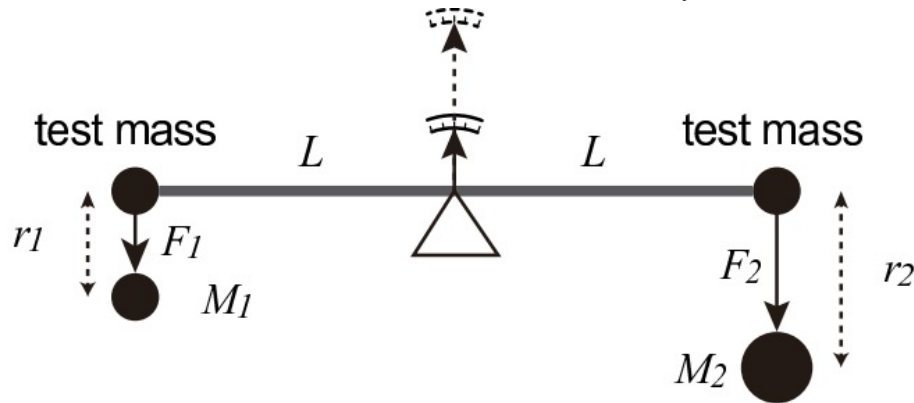
$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

前置き: どのくらい重力をしっているか?

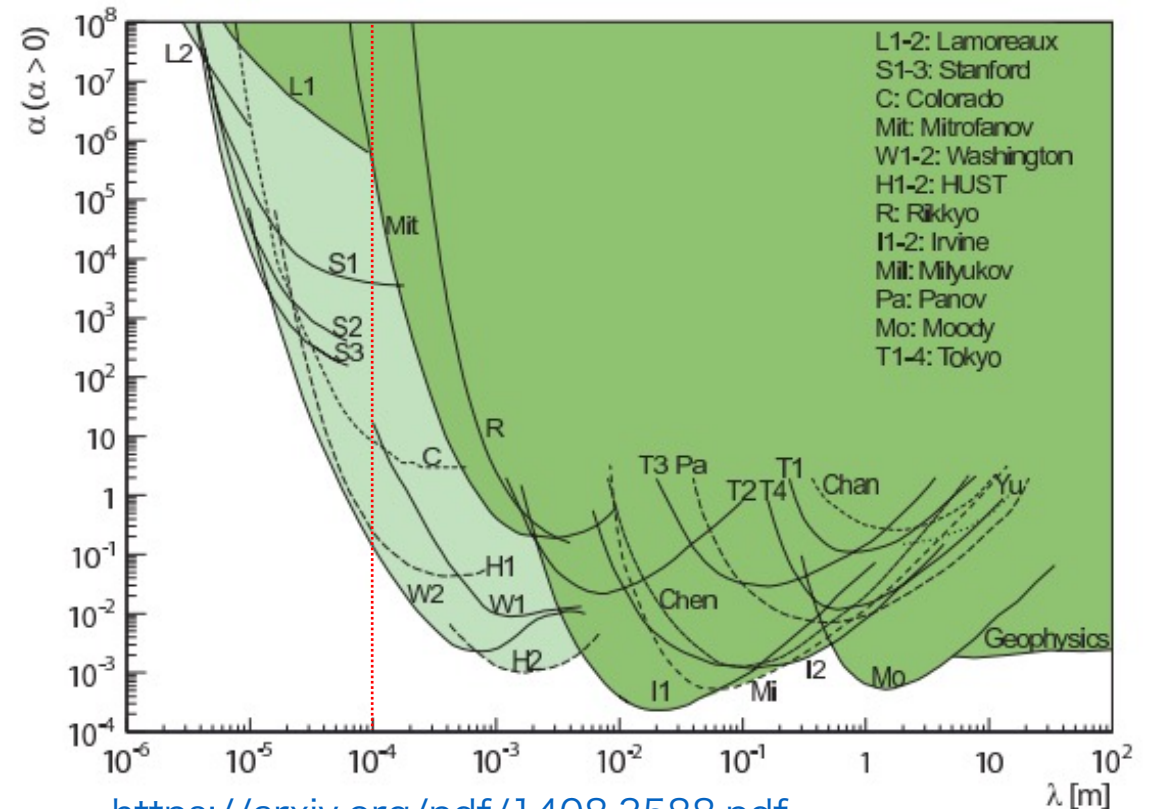
どのくらい小さい距離まで、重力で
ガウスの法則が正しいことを知っているか?

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 GeV = 1.2×10^{-17} 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

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

Handwritten notes on lined paper:

- $p = \hbar k$
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (boxed)
- $pc = \hbar c \frac{2\pi}{\lambda}$ (with "波数と波長" written below)
- $\lambda = \frac{\hbar c}{pc} \cdot 2\pi = \frac{1.2 \text{ GeV}}{\text{運動量}} \rightarrow \text{fm}$ (boxed)
- " $\hbar c = 200 \text{ MeV fm}$ "

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

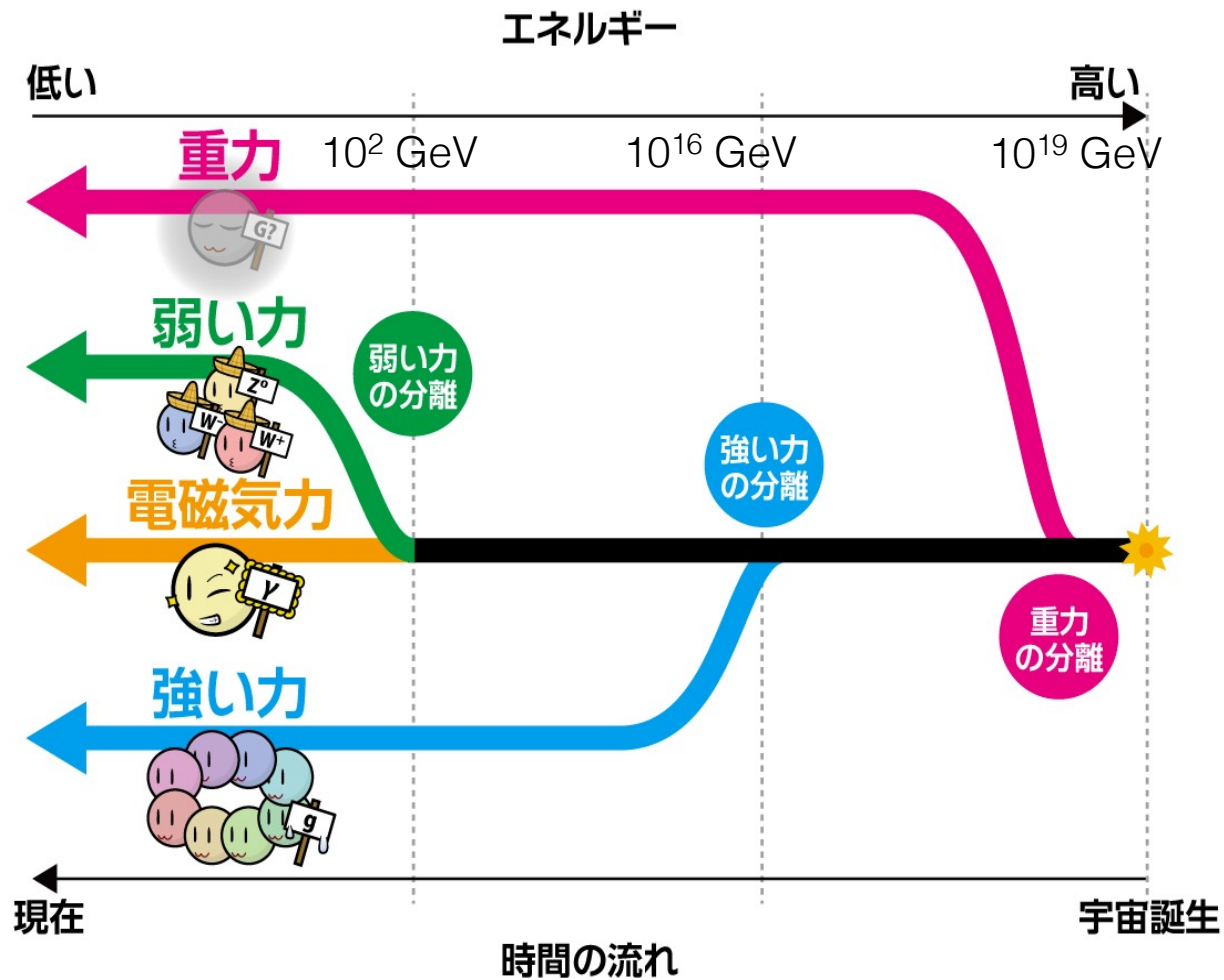
余剰次元はあっても重力だけが感じるものであるべき
少なくとも 10^{-4} m より「コンパクト」であることが必要

- 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)」



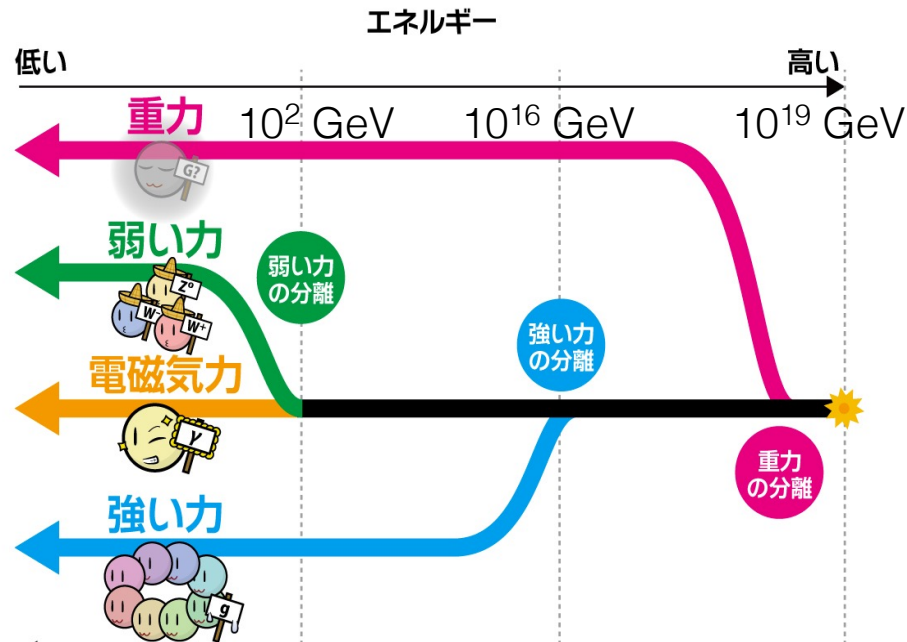
ところで階層性問題

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 (sqrtなのは空間が3次元だから。4次元だったら?)

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

$$G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$e^2 \frac{\hbar c}{r^2}$$



$$G \frac{E_1 E_2}{r^2} = G \frac{(\hbar c)^2}{r^4}$$

量子的力的効果
見ると、 $r^2 = r^3 c$
率は r^4 に逆比例。

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

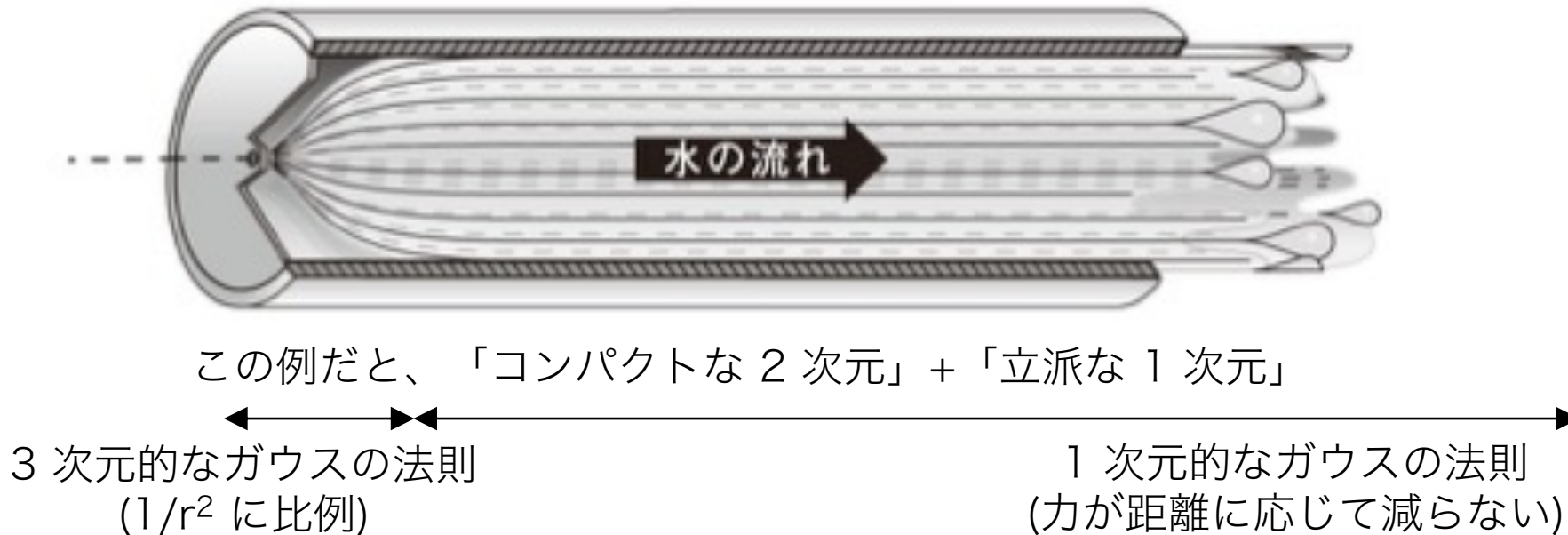
$$R \propto \sqrt{G}$$

$$\text{プランクスケール} \propto \frac{1}{\sqrt{G}}$$

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

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

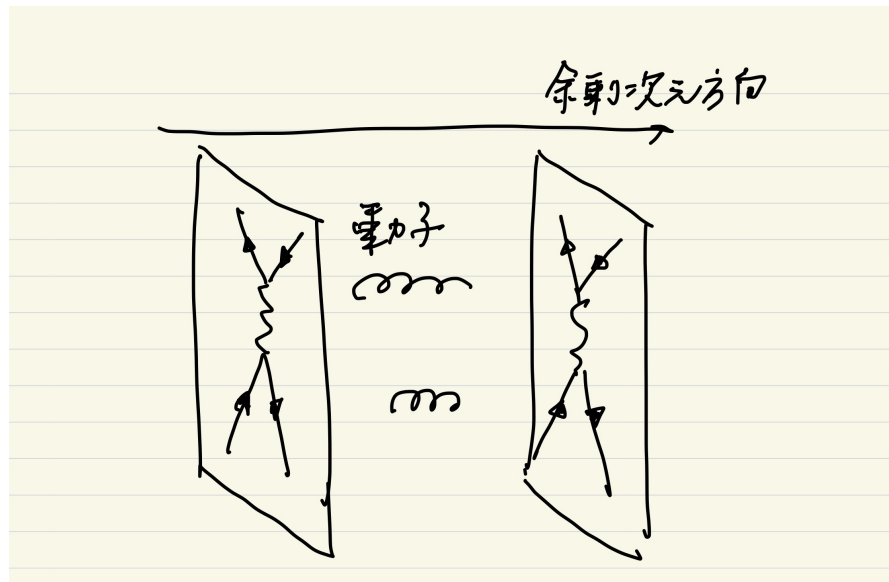
高次元の強い重力

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

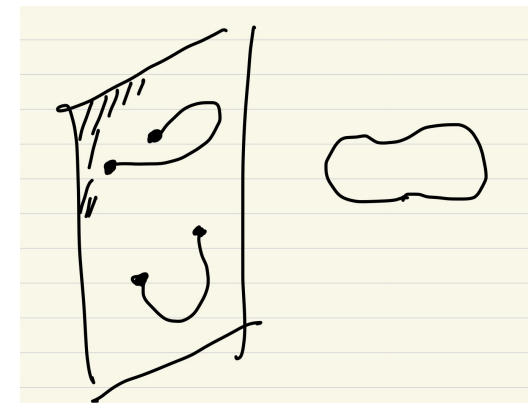
- 真のプランクスケール
- 四次元時空では重力は見かけ上弱く見えるだけ
真のプランクスケールは実は結構低エネルギー → “階層性問題の解決案”
- プランクスケールを TeV まで下げる余剰次元のサイズは？
 - $n=1$: 太陽系サイズ (非現実的), $n=6$: 100 fm (現実的)

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

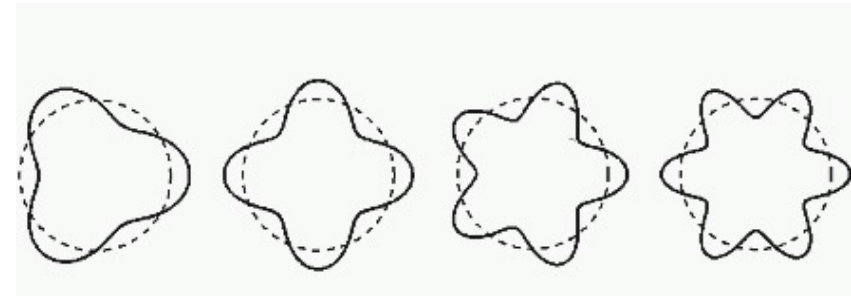
$$p_0^2 - \mathbf{p}^2 = p_\mu p^\mu = \mp p_5^2 \quad p_\mu p^\mu = m^2$$

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

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

$$m_n = n/R$$

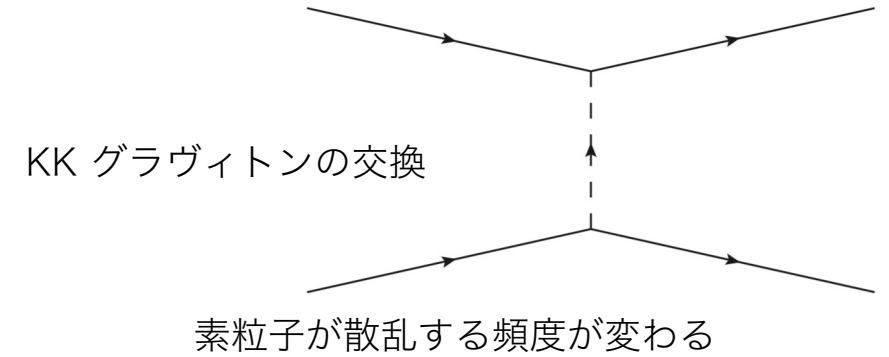
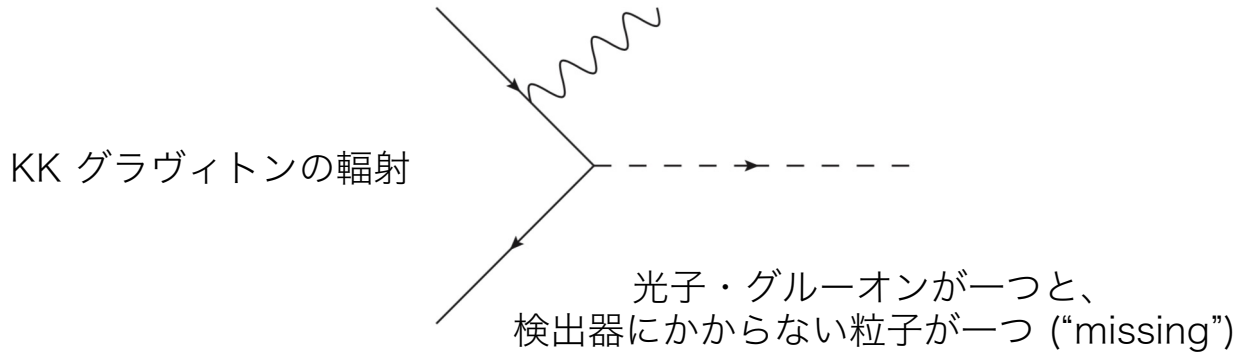


- 余剰次元に運動できる粒子(重力子) はKK モードを持つ

- $1/R$ 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**

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \sum_k^{M_k < \sqrt{s}} \left| \begin{array}{c} \text{Diagram 1} \\ M_k \end{array} \right|^2 \quad \quad \quad |\mathcal{M}|^2 \propto \left| \sum_k^{\infty} \begin{array}{c} \text{Diagram 2} \\ M_k \end{array} \right|^2$$

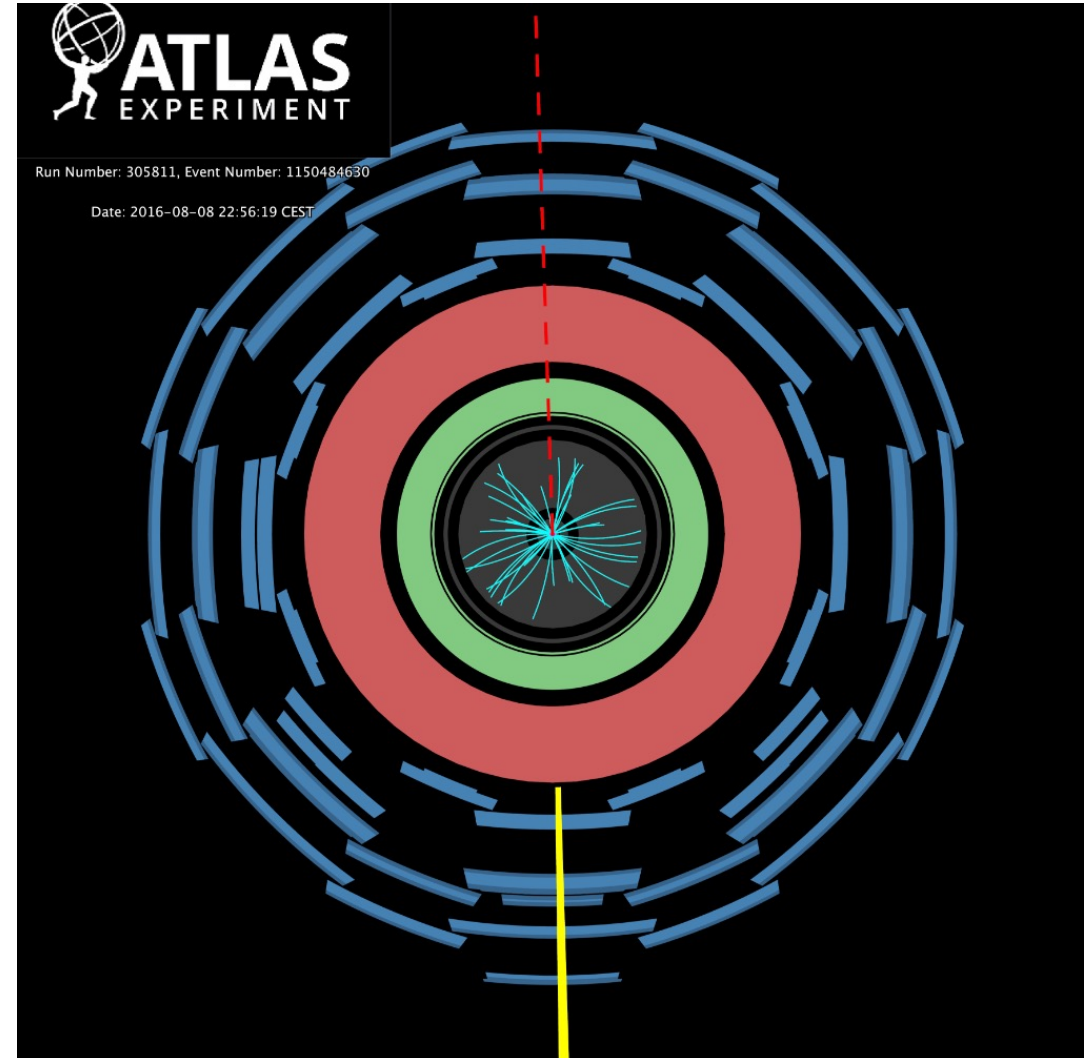
KK グラビトンの輻射探索

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”)

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \sum_k \left. \begin{array}{c} M_k < \sqrt{s} \\ \text{Diagram} \end{array} \right|_2$$

(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



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

• 色々な方法で探索を進行中

- 今の所、余剰次元模型をサポートする十分な結果はでていない

Model	ℓ, γ	Jets [†]	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	0 e, μ	1-4 j	Yes	36.1	M_D 7.7 TeV	$n = 2$ 1711.03301
	ADD non-resonant $\gamma\gamma$	2 γ	-	-	36.7	M_S 8.6 TeV	$n = 3$ HLZ NLO 1707.04147
	ADD QBH	-	2 j	-	37.0	M_{bh} 8.9 TeV	$n = 6$ 1703.09127
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	M_{bh} 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ 1606.02265
	ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	3.6	M_{bh} 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ 1512.02586
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2 γ	-	-	36.7	G_{KK} mass 4.1 TeV	$k/\overline{M}_{\text{Pl}} = 0.1$ 1707.04147
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ$	multi-channel	-	-	36.1	G_{KK} mass 2.3 TeV	$k/\overline{M}_{\text{Pl}} = 1.0$ 1808.02380
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WV \rightarrow \ell\nu qq$	1 e, μ	2 j / 1 J	Yes	139	G_{KK} mass 2.0 TeV	$k/\overline{M}_{\text{Pl}} = 1.0$ 2004.14636
	Bulk RS $g_{KK} \rightarrow tt$	1 e, μ	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	36.1	g_{KK} mass 3.8 TeV	$\Gamma/m = 15\%$ 1804.10823
	2UED / RPP	1 e, μ	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	36.1	KK mass 1.8 TeV	Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)} \rightarrow tt) = 1$ 1803.09678

• 余剰次元は一つの魅力的な一つの可能性

- 今日紹介したものから、LHCの最新結果に興味を広がったらいいいし、
- 他のシナリオ (超対称性等) にもぜひアンテナを張ってみてください。

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

