

Olhando além: em busca de dimensões extras

Werner K. Sauter

Instituto de Física e Matemática - UFPel

Seminários de Grupo



1 Introdução

2 Dimensões Extras

3 Procurando nos experimentos

4 Resultados e Cálculos futuros

5 Sumário e Perspectivas



A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.



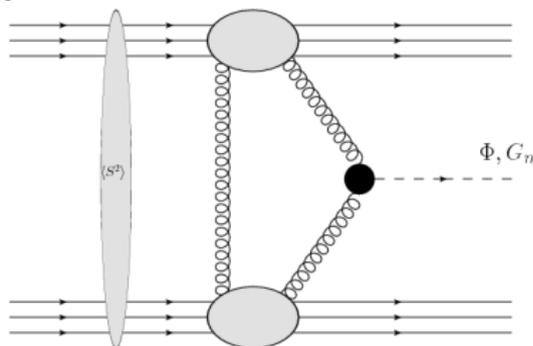
A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.
- Colisões de partículas em aceleradores: SLAC, FermiLab, DESY, BNL, CERN(LEP, LHC).



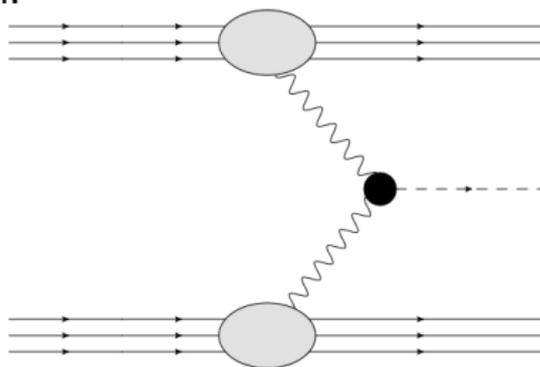
A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.
- Colisões de partículas em aceleradores: SLAC, FermiLab, DESY, BNL, CERN(LEP, LHC).
- Produção central de ressonâncias massivas em colisões hádron-hádron.



A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.
- Colisões de partículas em aceleradores: SLAC, FermiLab, DESY, BNL, CERN(LEP, LHC).
- Produção central de ressonâncias massivas em colisões hádron-hádron.



A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.
- Colisões de partículas em aceleradores: SLAC, FermiLab, DESY, BNL, CERN(LEP, LHC).
- Produção central de ressonâncias massivas em colisões hádron-hádron.

- Ressonâncias: Higgs, mésons, di-fótons, di-léptons, **gravitons e radions.**



A motivação

- Estudo da matéria em altas energias.
- Colisões de partículas em aceleradores: SLAC, FermiLab, DESY, BNL, CERN(LEP, LHC).
- Produção central de ressonâncias massivas em colisões hádron-hádron.

- Ressonâncias: Higgs, mésons, di-fótons, di-léptons, **gravitons e radions**.
- Sinal claro no dectector. Número de eventos razoável



O modelo padrão das partículas elementares

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2				Quarks spin = 1/2			
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge		Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge	
ν_e electron neutrino	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0		u	0.002	2/3	
e	0.000511	-1		d	0.005	-1/3	
ν_μ muon neutrino	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0		s	1.3	2/3	
μ	0.106	-1		c	1.3	-1/3	
ν_τ tauon neutrino	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0		b	173	2/3	
τ	1.777	-1		t	173	-1/3	

*See the neutrino paragraph below.

Data is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ GeV s} = 1.054 \times 10^{-27} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.602×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-10} \text{ joules}$. The mass of the proton is 1.6726 GeV/c² = $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos
Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e, ν_μ, ν_τ labeled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a different quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_1, ν_2, ν_3 but currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may lead powerful clues to particle mass hierarchy and generation and the violation of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol. Matter-antimatter annihilation produces energy and antiparticles have identical mass and spin but opposite charges. Positively electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ , and H^0) but not K^0 are their own antiparticles.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1				Strong (color) spin = 1			
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge		Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	
γ photon	0	0		g	0	0	
W^\pm	80.39	-1					
W^0 boson	80.39	+1					
Z boson	91.188	0					

Color Charge
Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and use these strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
Quarks and gluons cannot be isolated - they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks that combine into hadrons, leave the particles neutral to energy.

Two types of hadrons have been observed in nature: mesons (q and antiquark pairs). Among the many types of baryons observed are the proton (two up quarks, one down quark), neutron (one up quark, two down quarks) and omega (Ω^-) baryon. Quark charges add in such a way as to make the proton have charge +1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ (up, anti-down quark), kaon K^0 (down, anti-up), and η ($u\bar{u}$ and $d\bar{d}$). Their charges are +1, 0, 0, respectively.

Structure within the Atom

If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are given relative to the strength of the electromagnetic force for two quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction	Electromagnetic Interaction (Electroweak)	Strong Interaction
Acts on:	All	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	Quarks, Leptons	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Gravitons (not yet observed)	W^\pm, Z^0	γ	Gluons
Strength at $r = 10^{-16}$ m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at $r = 3 \times 10^{-17}$ m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new windows and startling discoveries. Experiments may soon test extra dimensions of space, non-zero neutrino masses, and/or evidence of string theory.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If so, what experiments need a new force of nature or new laws? Hidden dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we see only matter today for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

Matter and antimatter seem to match so much that the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does the dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will the discovered "boson" be the Higgs boson? If not, what is the Higgs boson? How is the Higgs boson's mass predicted more than one type of Higgs?

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-glow shaded areas represent the cloud of gluons.

$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

A free neutron (n) decays to a proton (p), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β -decay.

$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$

An electron and positron (antimatter) collision at high energy can annihilate to produce μ^+ and μ^- muons via a virtual Z boson or a virtual photon.



O modelo padrão das partículas elementares

Quarks:

$n = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$

Quarks $\text{spin} = 1/2$		
Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3



O modelo padrão das partículas elementares

Hádrons:

Bárion

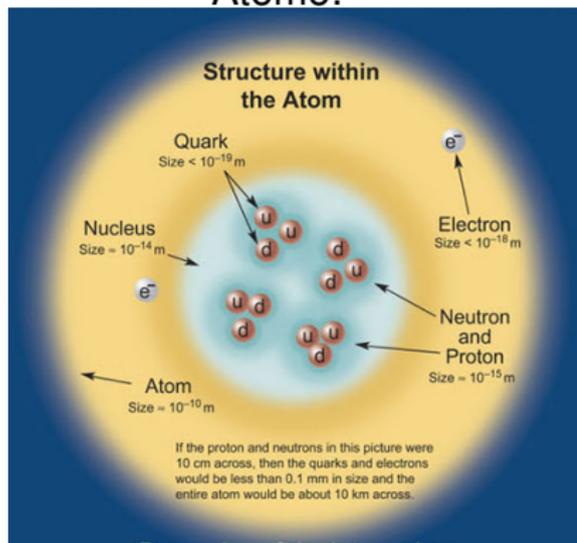


Méson



O modelo padrão das partículas elementares

Átomo:



O modelo padrão das partículas elementares

Quarks:

$n = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

Léptons:

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1



O modelo padrão das partículas elementares

Bósons & férmions:

Fermions		Bosons	
Leptons and Quarks	Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = 1*	Force Carrier Particles
Baryons (qqq)	Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = 0, 1, 2...	Mesons (q \bar{q})
	$\frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$		



O modelo padrão das partículas elementares

Interações:

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60



O modelo padrão das partículas elementares

Bósons de calibre:

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.39	-1	Color Charge Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.		
W^+	80.39	+1			
Z^0 Z boson	91.188	0			



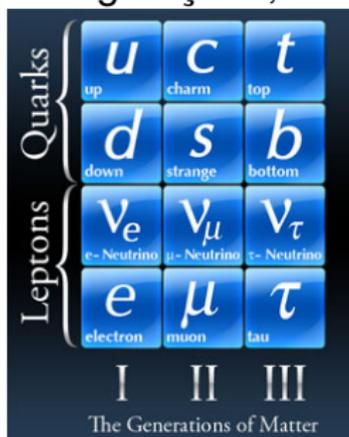
Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;



Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;



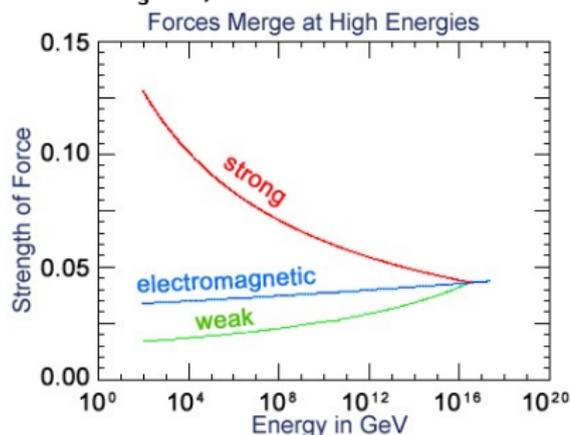
Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;



Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;



Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;
- Supersimetria;



Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;
- Supersimetria;
- Teoria de Cordas;



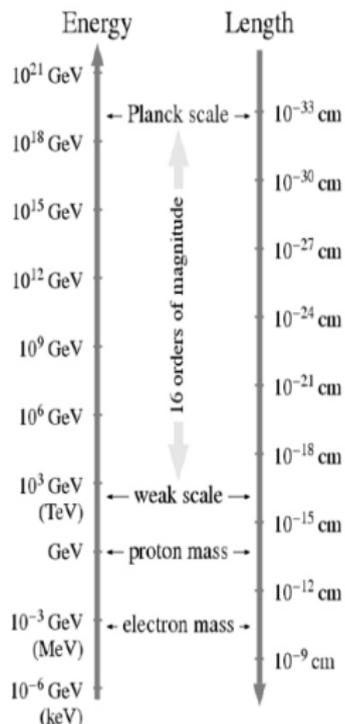
Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;
- Supersimetria;
- Teoria de Cordas;
- Matéria/energia escura;



Questões em aberto:

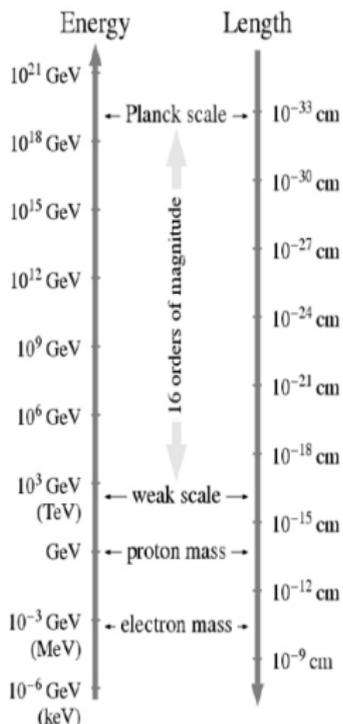
- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;
- Supersimetria;
- Teoria de Cordas;
- Matéria/energia escura;
- Hierarquia;



Questões em aberto:

- Assimetria: Matéria \times Anti-matéria;
- Três gerações;
- Geração de massa: bóson de Higgs;
- Unificação;
- Supersimetria;
- Teoria de Cordas;
- Matéria/energia escura;
- Hierarquia;

Dimensões extras



Um breve histórico

Outras dimensões:

- Riemann (1868): espaços curvos, métrica do espaço;



Um breve histórico

Outras dimensões:

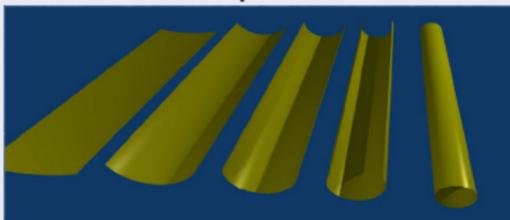
- Riemann (1868): espaços curvos, métrica do espaço;
- Einstein (1916): Teoria Geral da Relatividade;



Um breve histórico

Outras dimensões:

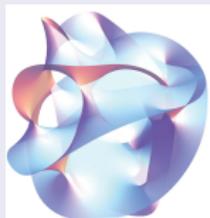
- Riemann (1868): espaços curvos, métrica do espaço;
- Einstein (1916): Teoria Geral da Relatividade;
- Nordström (1914), Kalusta (1921) & Klein (1926): Unificação gravitação e eletromagnetismo via 5a. dimensão espacial de tamanho finito (compacta);



Um breve histórico

Outras dimensões:

- Riemann (1868): espaços curvos, métrica do espaço;
- Einstein (1916): Teoria Geral da Relatividade;
- Nordström (1914), Kalusta (1921) & Klein (1926): Unificação gravitação e eletromagnetismo via 5a. dimensão espacial de tamanho finito (compacta);
- Teoria de Cordas (1970-): somente não apresenta problemas em 6 ou 7 dimensões. Espaço compactificado.



Um breve histórico

Outros Universos:

- Integrais de Caminho de Feynman;



Um breve histórico

Outros Universos:

- Integrais de Caminho de Feynman;
- Intepretação de Muitos Mundos da Mecânica Quântica de Everett-De Witt;



Um breve histórico

Outros Universos:

- Integrais de Caminho de Feynman;
- Intepretação de Muitos Mundos da Mecânica Quântica de Everett-De Witt;
- Cosmologia: multiverso, princípio antrópico, inflação



Fundamentos

A hipótese:

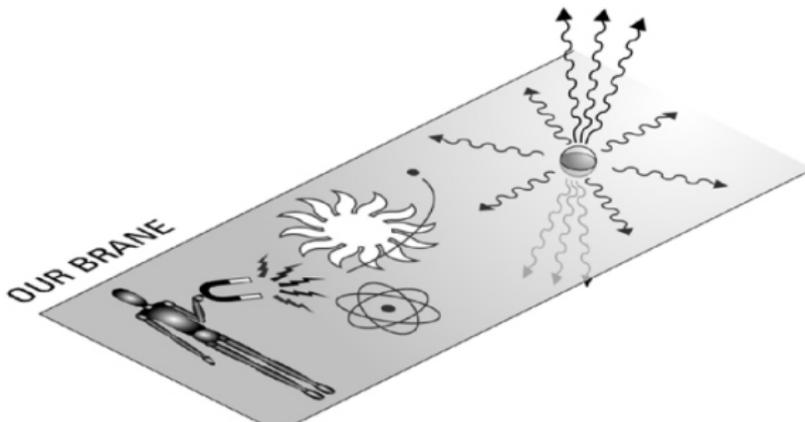
Em um universo de muitas dimensões estamos em uma membrana 3D (“*brana*”) que esta em um espaço maior (o “*bulk*”).



Fundamentos

A hipótese:

Em um universo de muitas dimensões estamos em uma membrana 3D (“*brana*”) que esta em um espaço maior (o “*bulk*”).



Fundamentos

A hipótese:

Em um universo de muitas dimensões estamos em uma membrana 3D (“*brana*”) que esta em um espaço maior (o “*bulk*”).

Da Teoria de Cordas:

p-branas, dualidade, D-branas (condições de contorno).
Partículas SM são cordas abertas sobre uma D-brana.
Gravitons são cordas fechadas que propagam no bulk.



Fundamentos

A hipótese:

Em um universo de muitas dimensões estamos em uma membrana 3D (“*brana*”) que esta em um espaço maior (o “*bulk*”).

Da Teoria de Cordas:

p-branas, dualidade, D-branas (condições de contorno).
Partículas SM são cordas abertas sobre uma D-brana.
Gravitons são cordas fechadas que propagam no bulk.

Uma solução para a hierarquia:

A gravidade é fraca na brana por que está diluta no bulk.



Cenários

ADD

- Proposto por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos e Gia Dvaili;
- Duas D-branas (uma nosso Universo) separadas por dimensões espaciais em forma de toro (plano);
- Partículas SM só na nossa brana: não vemos a outra brana, só os gravitons o fazem;
- Escala de unificação da ordem de TeV;
- Introdúz outra escala de hierarquia.



Cenários

RS

- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;



Cenários

RS

- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;
- Duas branas separadas por uma só dimensão extra (∞ ou não)



Cenários

RS

- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;
- Duas branas separadas por uma só dimensão extra (∞ ou não)
- Espaço-tempo tipo anti-De Sitter (curvatura negativa) pentadimensional;



Cenários

RS

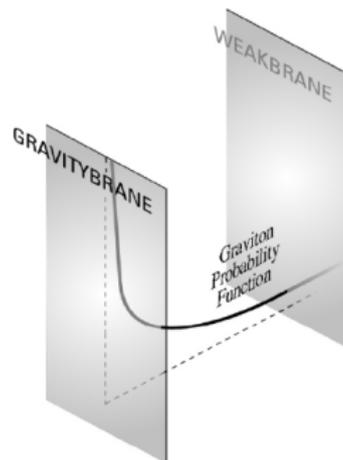
- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;
- Duas branas separadas por uma só dimensão extra (∞ ou não)
- Espaço-tempo tipo anti-De Sitter (curvatura negativa) pentadimensional;
- Bulk empenado (“*warped*”): depende da distância da nossa brana;



Cenários

RS

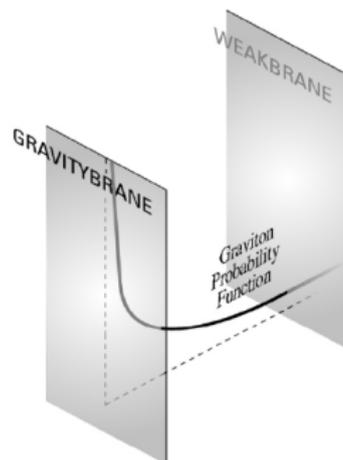
- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;
- Duas branas separadas por uma só dimensão extra (∞ ou não)
- Espaço-tempo tipo anti-De Sitter (curvatura negativa) pentadimensional;
- Bulk empenado (“*warped*”): depende da distância da nossa brana;
- Gravitons longe da nossa brana = gravidade + fraca; na TeV-brana re-escala;



Cenários

RS

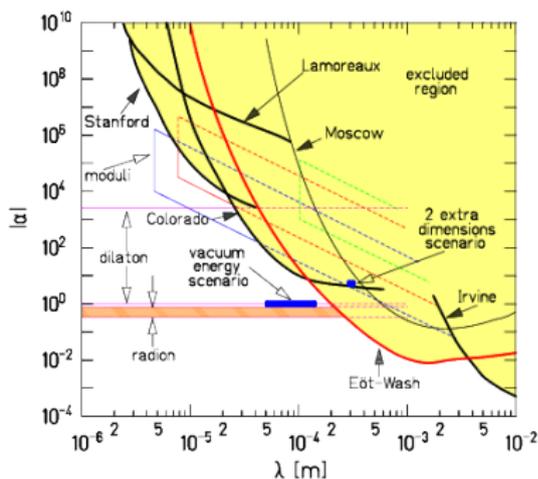
- Proposto por Lisa Randall & Raman Sundrum;
- Duas branas separadas por uma só dimensão extra (∞ ou não)
- Espaço-tempo tipo anti-De Sitter (curvatura negativa) pentadimensional;
- Bulk empenado (“*warped*”): depende da distância da nossa brana;
- Gravitons longe da nossa brana = gravidade + fraca; na TeV-brana re-escala;
- **Radion**: estado excitado do tensor métrico = medida da dimensão extra, semelhante a um escalar em 4-D



Testes gravitacionais

- Várias dimensões extras. Desvios de $1/r^2$: termo tipo Yukawa

$$V(r) = -\frac{1}{M_{Pl}^2} \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$



Testes gravitacionais

- Várias dimensões extras. Desvios de $1/r^2$: termo tipo Yukawa

$$V(r) = -\frac{1}{M_{Pl}^2} \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

- ADD: descata-se poucas DE (Lei de Gauss para dimensões extras) = desvios em distâncias no Sistema Solar;



Sinais nos Colisores

Excitações Kalusta-Klein

Expansão em séries de Fourier

Analogia: corda presa pelas extremidades

Condição de Contorno: compacto (finito) vs. não compacto



Sinais nos Colisores

Graviton:

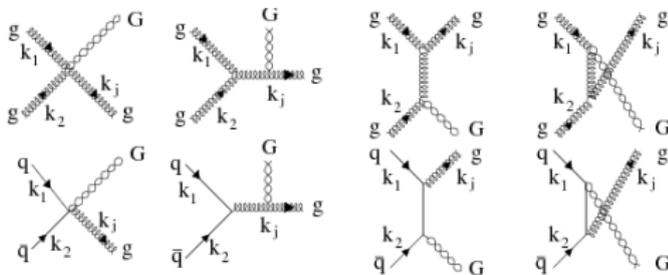
- Graviton acopla com todas partículas SM;
- Produção de Buracos Negros
- Torre de estados KK: (G_1, G_2, \dots)
- Massa dos estados: ADD são próximas. RS são separadas.



Sinais nos Colisores

- Ausência de partículas no colisor (“*missing energy*”).
Eventos de monojato:

$$q\bar{q} \rightarrow g + G_{KK}, \quad gg \rightarrow g + G_{KK}$$

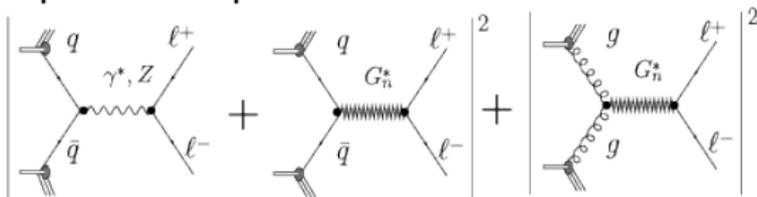


Sinais nos Colisores

- Ausência de partículas no colisor (“*missing energy*”).
Eventos de monojato:

$$q\bar{q} \rightarrow g + G_{KK}, \quad gg \rightarrow g + G_{KK}$$

- Decaimento de excitações Kalusta-Klein em pares de lépton-antilépton.

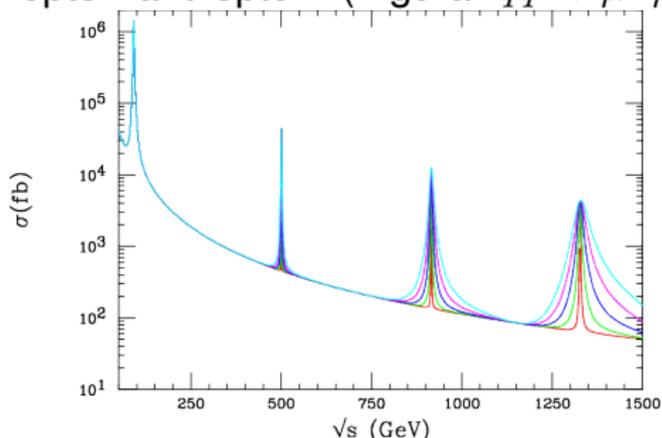


Sinais nos Colisores

- Ausência de partículas no colisor (“*missing energy*”).
Eventos de monojato:

$$q\bar{q} \rightarrow g + G_{KK}, \quad gg \rightarrow g + G_{KK}$$

- Decaimento de excitações Kalusta-Klein em pares de lépton-antilépton. (Figura: $q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ no ILC)



Sinais nos Colisores

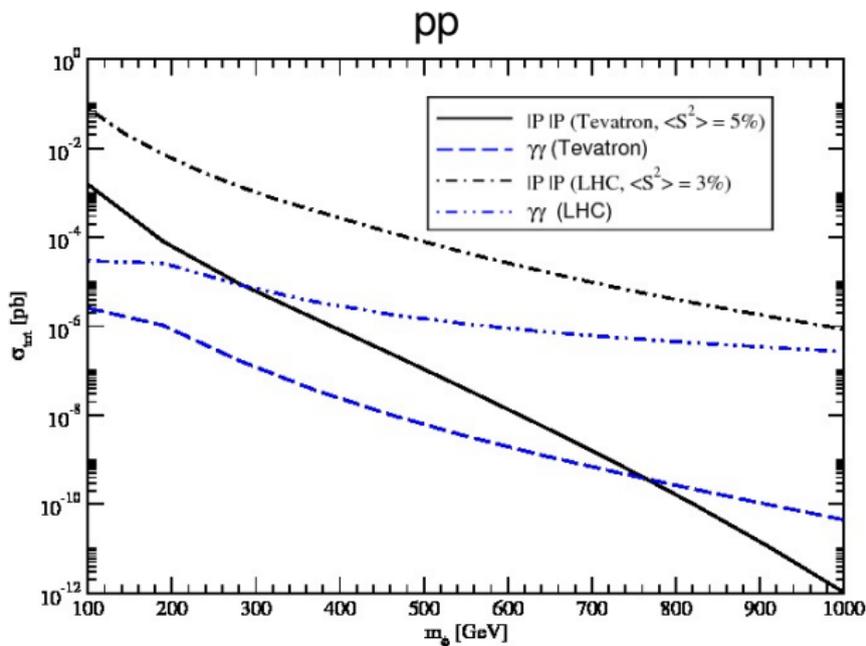
- Ausência de partículas no colisor (“*missing energy*”).
Eventos de monojato:

$$q\bar{q} \rightarrow g + G_{KK}, \quad gg \rightarrow g + G_{KK}$$

- Decaimento de excitações Kalusta-Klein em pares de lépton-antilépton.
- Radion: sinal semelhante ao do bóson de Higgs. Se acopla com partículas SM



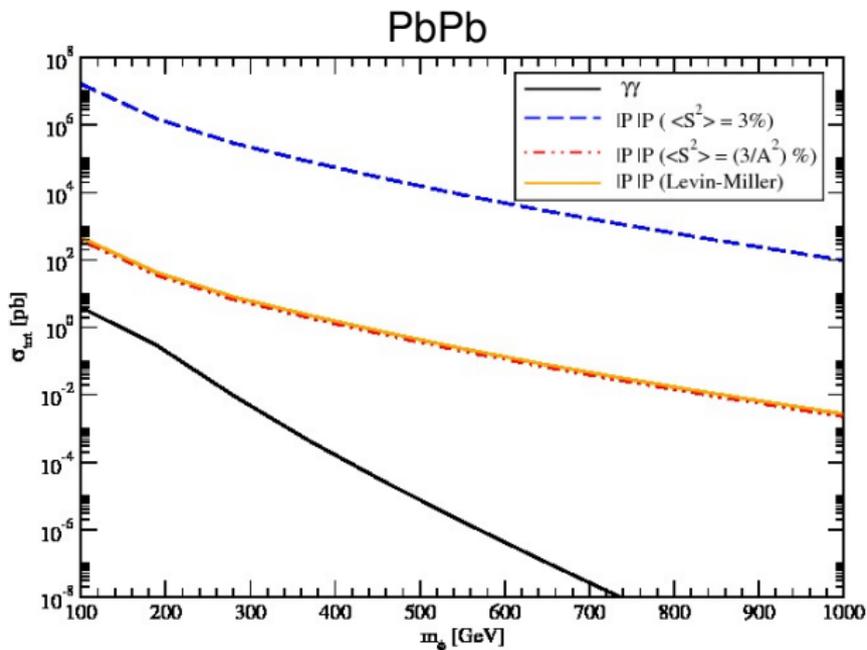
Produção do Radion no LHC¹



¹Phys.Rev. D82 (2010) 056009



Produção do Radion no LHC¹



¹Phys.Rev. D82 (2010) 056009



Produção do Radion no LHC¹

Número de eventos com energias do LHC em um ano:

	$\gamma\gamma$	gg
pp	3.0	700
pPb	4.5×10^{-3}	9×10^{-2}
	3	60
$PbPb$	2.5×10^{-4}	3.5×10^{-1}

¹Phys.Rev. D82 (2010) 056009



Produção do Radion no LHC¹

- a anomalia de traço $\Rightarrow \sigma_{\text{tot}}$ do radion ~ 8 vezes maior que a do Higgs no intervalo de massa no processo de fusão de glúons.:
- o mecanismo de fusão de fótons é um limite inferior para a produção de radion; um aumento de Z^2 para colisões íon-íon.
- produção por fusão de glúon dominante em todos os cenários, como um aumento de A^2 ou A^4 para pPb e $PbPb$. A mudança no SPG induz significativas diferenças.
- dependência crucial na massa do radion e no parâmetro Λ_{Φ} .
- estimativas de números de eventos baixas em colisões pPb e $PbPb$ mas razoáveis em colisões pp .
- embora menor que a produção inclusiva, o sinal é mais “limpo” devido a topologia. Contudo, o “pile-up” de eventos pode diminuir as vantagens da produção exclusiva: vantagem para pPb .



Estimativas de produção de graviton no LHC

Graviton:

$k/\overline{M}_{\text{Planck}} \sim 0,01$, $m_G = 1,0 \text{ TeV}$, energias do LHC:

σ_{tot}	$\gamma\gamma$	$\langle S^2 \rangle$	gg
$pp (\sqrt{s} = 14,0 \text{ TeV})$	$1,2 \times 10^{-9} \text{ pb}$	3%	$3,7 \times 10^{-7} \text{ pb}$
$pPb (\sqrt{s} = 8,8 \text{ TeV})$	$2,1 \times 10^{-4} \text{ pb}$	3%	$3,3 \times 10^{-3} \text{ pb}$
		$3\%/A^2$	$1,6 \times 10^{-5} \text{ pb}$
$PbPb (\sqrt{s} = 5,5 \text{ TeV})$	$2,2 \times 10^{-10} \text{ pb}$	3%	$1,5 \times 10^{+1} \text{ pb}$
		$3\%/A^2$	$3,4 \times 10^{-4} \text{ pb}$

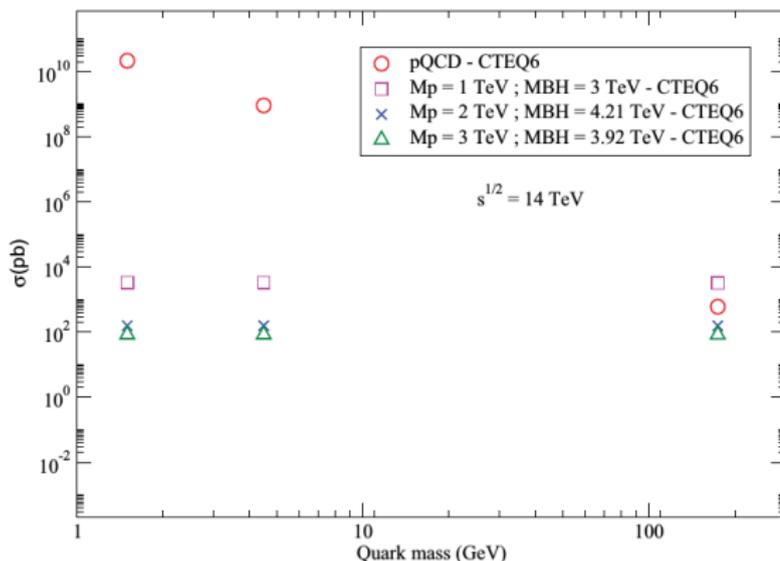
Seção de choque

P/G_1 de graviton, é sempre muito menor que a do radion: um número pequeno de eventos.



Produção de Buracos Negros no LHC²

Produção de quarks pesados em evaporação de buracos negros microscópicos no LHC.

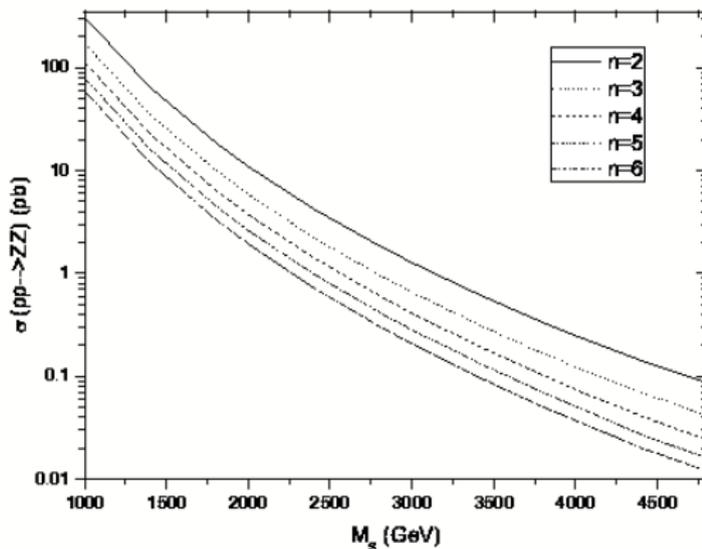


²AIP Conf.Proc. 1520 (2013) 412-414



Produção de ZZ no LHC³

Resultado inclusivo de Gao (mesmo conjunto de parâmetros):

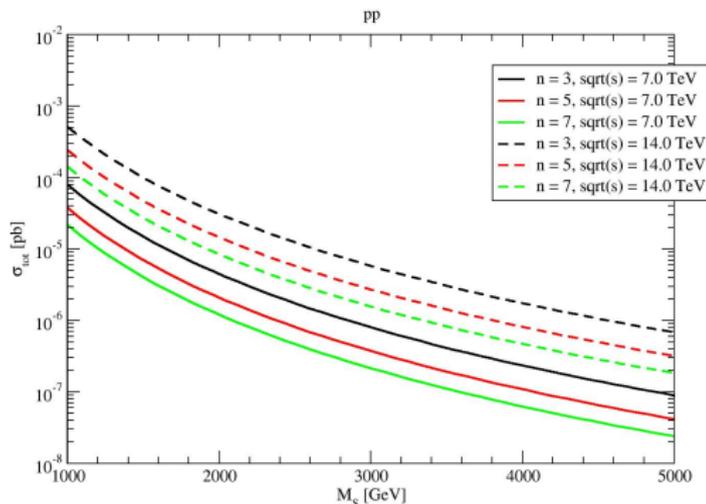


³Phys.Rev. D89 (2014) 7, 076003



Produção de ZZ no LHC³

Resultado exclusivo:



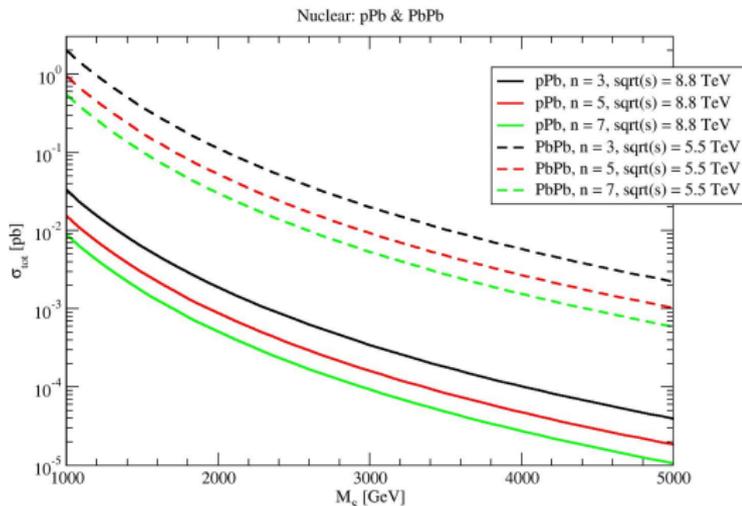
The Oct 4 2004:43 2012

³Phys.Rev. D89 (2014) 7, 076003



Produção de ZZ no LHC³

Resultado exclusivo:



The Oct 4 2010:51 2012

³Phys.Rev. D89 (2014) 7, 076003



Cálculos Futuros

- Produção de W^\pm ;
- Produção de $\gamma\gamma$ em colisões de íons



Resumo

- Predições de limites experimentais para os parâmetros dos cenários/modelos no LHC/Run 1;
- Possibilidade de nova Física, além Modelo-Padrão;
- Nossa contribuição: uso de eventos difrativos para observação.

