

Extra Téridő Dimenziók

Képzelet vagy valóság?

Cynolter Gábor

„ATOMCSILL”, Az atomoktól a csillagokig ,

2009. február 12.

Vázlat

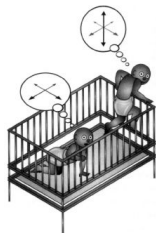
- 1 Hány Dimenziós a Téridő?
 - 3+1 dimenzió
 - Extra dimenziók?
- 2 A 4 Ismert Kölcsönhatás
 - Gravitáció + Elektromágnesesség
 - Extra dimenziók No. 1.
 - Standard Modell
 - Higgs Mechanizmus, Hierarchia Probléma
- 3 Extra Dimenziók újra
 - Húrelmélet, Branek
 - Nagy Extra Dimenziók
- 4 Görbült Extra Dimenziók
 - Görbült Extra Dim-k Prológus
 - Randall-Sundrum

Vázlat

- 1 Hány Dimenziós a Téridő?
 - 3+1 dimenzió
 - Extra dimenziók?
- 2 A 4 Ismert Kölcsönhatás
 - Gravitáció + Elektromágnesesség
 - Extra dimenziók No. 1.
 - Standard Modell
 - Higgs Mechanizmus, Hierarchia Probléma
- 3 Extra Dimenziók újra
 - Húrelmélet, Branek
 - Nagy Extra Dimenziók
- 4 Görbült Extra Dimenziók
 - Görbült Extra Dim-k Prológus
 - Randall-Sundrum

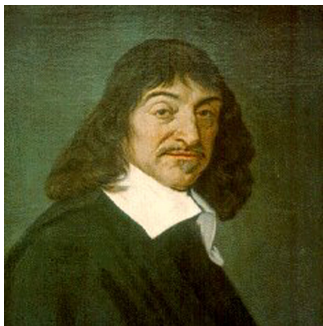
Hány dimenziós a megfigyelt tér(idő)

- Már kisbabaként tapasztaljuk
- 3 tér + 1 idő dimenzió
- Hány irányban tudunk mozogni, hány adat kell egy pont megadásához?

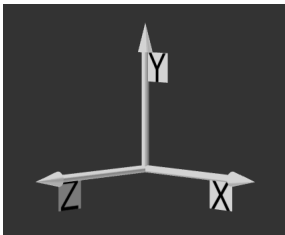


- Legalább 3 dimenzió a kellő bonyolultságért
 - létezzen csomó,
 - 2 dim. állatban nincs végigvonuló bélcsatorna (szétesik)

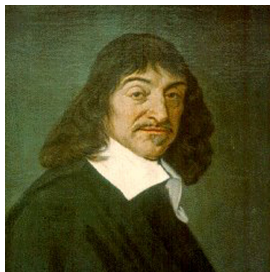
Mi a dimenzió?



Rene Descartes



3D-s térben a pontokat x,y,z
3 Descartes koordináta jellemzi



Rene Descartes

egyenletek ábrák helyett

$$x^2 + y^2 = 1$$



kör

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1$$



gömb

$$x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = 1$$

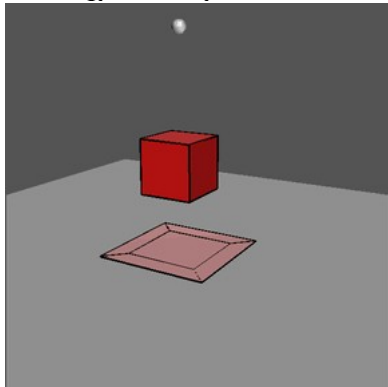
?

hipergömb

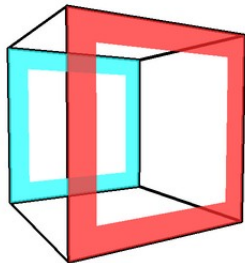
- Az egyenletek használhatók akkor is, ha nem tudjuk elképzelni a 4D, 5D,... objektumokat.

4D tárgyak 3D vetülete

3D tárgy 2D árnyéka



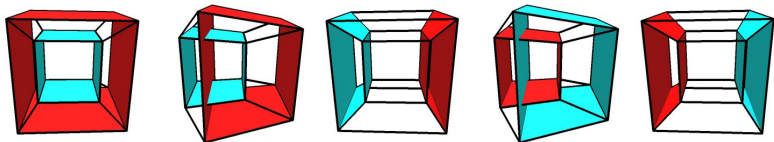
forgó kocka árnyéka olyan, mint
6 egymáson átmenő eltorzult négyzet



2D-s vetületként nehezebb látni

Hiperkocka vetülete

4D hiperkocka 3D-s vetülete olyan, mintha 8 eltozult kocka menne át egymáson



Matematikai szempontból van értelme 4D-ről beszélni !

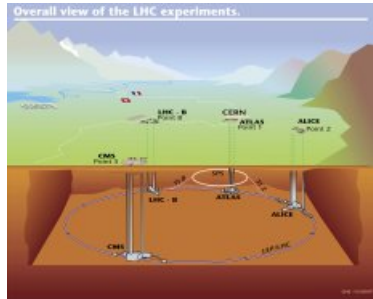
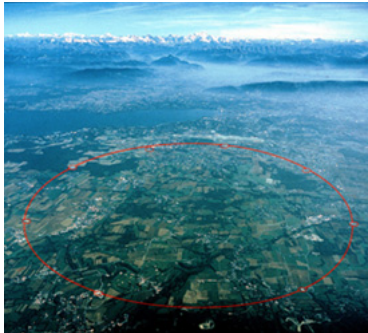
Lehetnek fizikai extra térdimenziók?

Fizikusok spekulálnak extra téridő dimenziók létezésén, mert

- Nincs érvünk ellenük, miért ne létezhetnének.
- Tudjuk, hogyan maradhatnak rejtve.
- Az elméleteink nem ragaszkodnak 3 térdimenzióhoz.
- Nem érzékeljük, nem látjuk ezeket, de ettől még létezhetnek!
- Évtizedes részecskefizikai problémákra adhatnak megoldást.
- LHC-n közvetett bizonyítékaik láthatóvá válhatnak.

LHC Large Hadron Collider 2008-

proton -proton ütközések 7+7 TeV ($1000 \cdot \text{GeV} = \dots = 10^{12} \text{eV}$)



Az LHC (CERN, Svájc) madártávlatból és a szerkezete

Vázlat

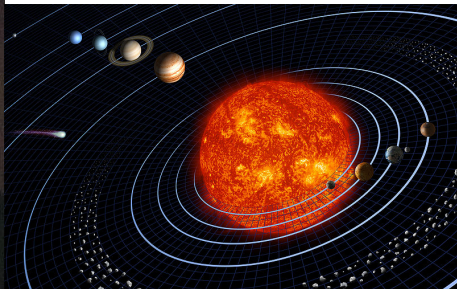
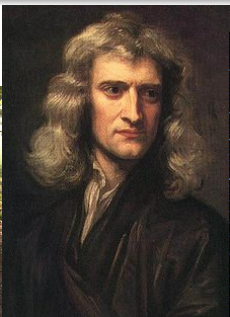
- 1 Hány Dimenziós a Téridő?
 - 3+1 dimenzió
 - Extra dimenziók?
- 2 A 4 Ismert Kölcsönhatás
 - Gravitáció +Elektromágnesesség
 - Extra dimenziók No. 1.
 - Standard Modell
 - Higgs Mechanizmus, Hierarchia Probléma
- 3 Extra Dimenziók újra
 - Húrelmélet, Branek
 - Nagy Extra Dimenziók
- 4 Gömbült Extra Dimenziók
 - Gömbült Extra Dim-k Prológus
 - Randall-Sundrum

Newton-féle gravitációs kölcsönhatás

Egyik legrégebbi, legalapvetőbb, m_1 és m_2 tömegek

$$F(r) = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2} \sim \frac{1}{r^2} \quad (3+1) \text{ dimenzióban}$$

(Első egyesítés: égi - Földi fizika)



Gravitációs állandó dimenziós $G_N = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg s}^2$

Jellemző tömeg (és energia) $1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$, PLANCK TÖMEG
 $12000000000000000000 \cdot M_{proton}$

Newton-féle gravitációs kölcsönhatás

Erővonalakkal jellemezhető, m tömeg



$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -G_N \frac{m}{r^2} \cdot \mathbf{e}_r$$

Tömegeből induló erővonalak egy felületen oszlanak el (Gauss tv.)

d téridő dimenzióban d-1 dimenziós gömbfelületre

téridimenziók d	1	2	3	4	3+n
erőtörvény	const	1/r	1/r ²	1/r ³	1/r ²⁺ⁿ

Példák elektrosztatikából, végtelen töltött sík, fonál,...

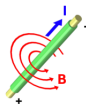
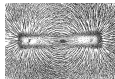
Elektromágneses kölcsönhatások -> Maxwell egyenletek

Elektromos jelenségek



Ben. Franklin és Michael Faraday

Mágneses mező



mágnes

áram

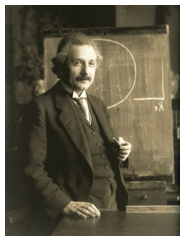


André-Marie Ampère (1775-1836)

Andre. M. Ampere



Egységes leírás: Maxwell-egyenletek (1864)



„Az idő a negyedik dimenzió”

A.Einstein 1905

A fizikai törvényekből következtette
(ma pl. részecskefizikában általános)

Albert Einstein 1921-ben

- Négy dimenziós téridő x, y, z és t
- Univerzális állandó „ c ” a mérések átváltására (tér \leftrightarrow idő)
- $c=299792$ km per másodperc

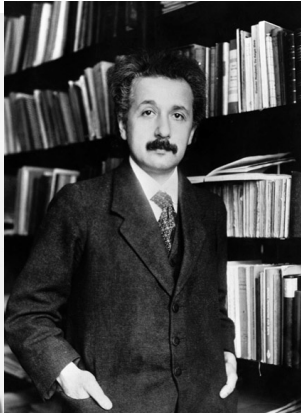
„A térnek van alakja (szerkezete)”

A.Einstein 1911

- a tér görbülete nem rejtett: a háromszögek szögeinek összege árulkodik
- a tér alakját az anyag és energia határozza meg
- a gravitáció nem más, mint a téridő görbülete
- A Newton törvény származtatható az Ált. Relativitáselméletből.
Ugyanaz a dimenziós állandó G_N , vagy M_{PLANCK}

- -> extra dimenziók

Extra dimenziók atyjai

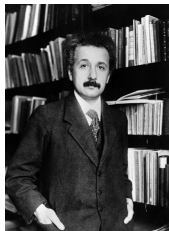




Gunnar Nordstrom

1914-ben G. Nordstrom finn fizikus megmutatta, hogy az elektromágnesség és a gravitáció egyesíthető egyetlen erőként, egy extra térdimenziót tartalmazó elméletben

Einstein elvetette az ötletet talán, mert Nordstrom saját konkurens elméletét használta. A fényelhajlási kísérlet csak később igazolta.



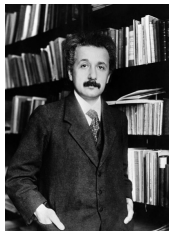
Einstein a bíráló



Theodor Kaluza

1919-ben T. Kaluza lengyel matematikus újra felvetette az ötödik dimenzió gondolatát, de ő Einstein elméletét használta

Einstein eleinte lelkesedett,
de a kézirat 2 évet pihent
az íróasztalában.



ismét Einstein a bíráló

Az ötödik dimenzió kör

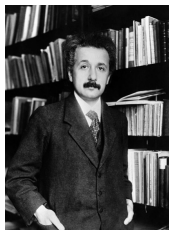
Nordstrom, Kaluza és Einstein azt gondolták, hogy az 5. dimenzió, nem valódi. Különben miért nem láttuk?



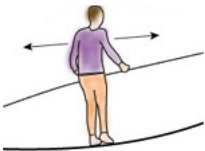
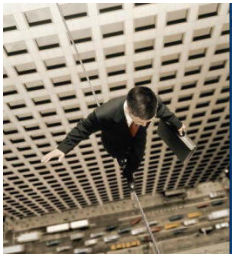
..
Oscar Klein

1926-ban Klein svéd fizikus javaslata:
az ötödik dimenzió valódi, de túl kicsi,
ahhoz, hogy lássuk

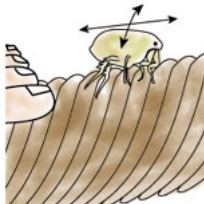
„Klein cikke szép és lenyűgöző”
Alkalmazásokkal próbálkoztak -
kvantummechanika, ...



Feltekeredett Dimenziók



An acrobat can only move in one dimension along a rope..



...but a flea can move in two dimensions.

A kötéltáncos csak 1 D-t érzékel a kötélmentén,
a bolha körbe is tud menni rajta (2 D)



Az eredmény:

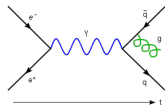
0.00000000000000000000000000000001 cm

A Planck hossz.

El is felejtették az extra dimenziókat 50 évre

Fizikusok keményen dolgoztak: kvantummechanika, részecskék elmélete

- Elektrodinamika kvantumelmélete: kvantumelektrodinamika
1948: Feynmann, Schwinger, Tomonaga (Nobel-díj: 1965)
- Anyagi részecskék: proton, elektron + semleges neutron, neutrínó



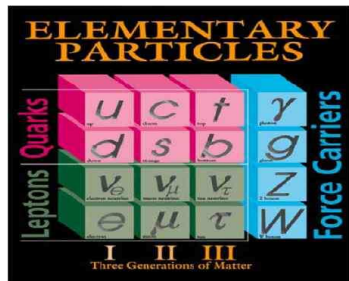
- Kölcsönhatást foton (Einstein 1905) közvetíti :

Lélegzetelállító egyezés: az elektron mágneses momentuma 10 jegyre megegyezik (hibahatáron belül)

$\mu_e = 1.00115965219$	kísérleti eredmény
$\mu_e = 1.00115965215$	elméleti számolás

Gravitáció kívüli 3 kcs = Standard Modell

- 1967- Egységes keretben írja le az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatásokat a QED mintájára.
- Szimmetriák + belső ellentmondásmentesség \rightarrow egyértelmű kölcsönhatások
- Anyagterek - 3 generáció, fermionok (feles sajátperdület, spin)
- Kölcsönhatást közvetítik - bozonok (egész spin), $8 * g$, γ és W^\pm , Z
- + Misztikus Higgs részecske



1979 Nobel díj Glashow, Salam, Weinberg

A Standard Modell Sikerei

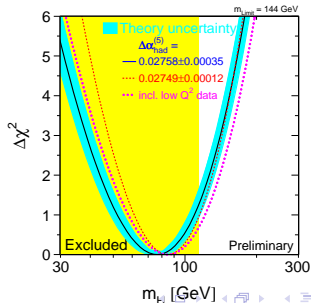
- 1984 kísérleti igazolásért Nobel díj:



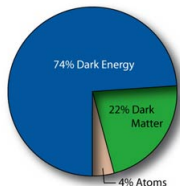
Carlo Rubbia és Simon van der Meer

- Leírja az összes nagyenergiás kísérletet, 10^{-16} cm-ig azaz 0.000000000000000001 cm-ig
- Az összes részecskét direkt megfigyeltük, kivéve a HIGGS BOZONT, tömegek igen különbözők $m_{u,d} \sim 5\text{MeV}$ és $\ll m_{top} = 170.9 \pm 1.8$ GeV, direkt és indirekt korlátok

	Measurement	Fit
$\Delta\alpha_{had}^{(5)}$	0.02758 ± 0.00035	0.02768
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1875
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4957
$\sigma_{had}^{(0)}$ [nb]	41.540 ± 0.037	41.477
R_b	20.767 ± 0.025	20.744
$A_{FB}^{0,b}$	0.01714 ± 0.00095	0.01645
$A_{FB}^{0,c}$	0.1465 ± 0.0032	0.1481
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21586
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1722
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992 ± 0.0016	0.1038
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742
A_b	0.923 ± 0.020	0.935
A_c	0.670 ± 0.027	0.668
$A_f(\text{SLD})$	0.1513 ± 0.0021	0.1481
$\sin^2\theta_{eff}^{(0)}(Q_Z)$	0.2324 ± 0.0012	0.2314
m_W [GeV]	80.398 ± 0.025	80.374
Γ_W [GeV]	2.140 ± 0.060	2.091
m_t [GeV]	170.9 ± 1.8	171.3



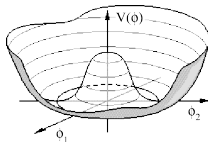
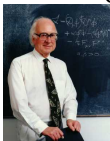
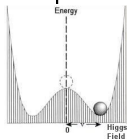
Kb. 1998-tól a kísérleti evidenciák is sokasodnak



- Nem-barionikus sötét anyag
- Sötét energia (\sim kozmológiai konstans)
- Neutrínóknak tömege van (oszcillációból, Nap+atmoszferikus)
- Nem ad magyarázatot az univerzum barion asszimetriájára (Fodor Zoltán, Csikor Ferenc és Katz Sándor , ELTE Elméleti Fizikai Tsz.)

\Rightarrow Valamilyen új fizikának kell lenni a SM-en túl, ezt még nem értük el a gyorsítókban.

- Legtöbb probléma a tömeget adó **HIGGS skalár** részecskével



- Egyetlen tömeges paraméter $v = 254 \text{ GeV} \sim 254 \cdot M_{\text{proton}}$
- HIERARCHIA PROBLÉMA:** Miért sokkal gyengébb a gravitáció az elektroyenge kölcsönhatásnál?
(ha a kvantumkorrekciók összehúzzák őket)
alapvető elméletnek meg kell magyaráznia

$$v_{SM} = 254 \text{ GeV} \ll M_{PLANCK} \sim 12000000000000000000 \text{ GeV}$$

Higgs Mechanizmus, a Közeg

Képzeljünk el ...



...egy termet tele fizikusokkal (sic!), amint nyugodtan beszélgetnek, ez olyan mint a tér kitöltve a Higgs részecske mezőjével...
(David J. Miller és CERN)

Higgs Mechanizmus 2, a részecskék tömege



... híres fizikus besétál, zavart kelt, ahogy halad a teremben, és minden lépésével csodálói egy kisebb csoportját vonzza maga köré...



...a csoportosulás miatt egyre nehezebben mozog, azaz tömeget kap, akárcsak egy részecske, amely a Higgs mezőn halad át...

Higgs Mechanizmus 3, a Higgs tömege



... ha egy pletyka terjed el a teremben, ...



... kis csoportosulást hoz létre, de most a kutatók között.

Az analógiában ezek a csoportosulások a Higgs részecskék.

A részecskefizika változtatása kis távon \sim nagy energián (eddig)

- a Higgs összetett, szerkezete van
- Szuperszimmetria
új szép tulajdonságok védik a kis paramétereket
Legnépszerűbb (Bozon-Fermion párok, 0 kísérlet)
- ...

Vázlat

- 1 Hány Dimenziós a Tériidő?
 - 3+1 dimenzió
 - Extra dimenziók?
- 2 A 4 Ismert Kölcsönhatás
 - Gravitáció + Elektromágnesesség
 - Extra dimenziók No. 1.
 - Standard Modell
 - Higgs Mechanizmus, Hierarchia Probléma
- 3 Extra Dimenziók újra
 - Húrelmélet, Branek
 - Nagy Extra Dimenziók
- 4 Gömbült Extra Dimenziók
 - Gömbült Extra Dim-k Prológus
 - Randall-Sundrum



John Schwartz

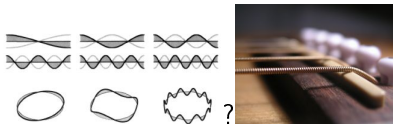


Pierre Ramond



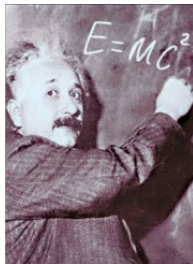
Gabrielle Veneziano

- Eredetileg- az erős kölcsönhatás megértésére
- Alapobjektum részecske \rightarrow húrok, mikroszkopikus húr különböző rezgési adják a változatos részecskéket.
- TOE - Mindenség Elméletére jelölt



- Mint gitár húr: rugalmasak, feszültség, saját rezgései-húr módusok
- Mások: nem állnak semmiből, magukat feszítik, nyújtják ki
- Kvantummechanika: állandóan izegnek-mozognak

A húrok mikorszopikus rezgéseit nem látjuk, részecskének látjuk Energiáját, impulzusát tömegként értelmezzük

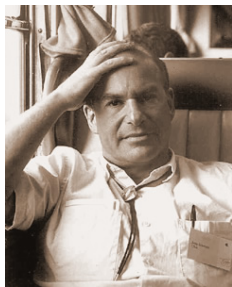


- „részecske” tömegét adja meg a rezgő húr energiájának, impulzusának függvényében

$$E^2 - (p_x c)^2 - (p_y c)^2 - (p_z c)^2 = (mc^2)^2$$

Gond: nulla tömegű részecskékhez kiejtés kell
NEM MŰKÖDÖTT!

$$E^2 - (p_x c)^2 - (p_y c)^2 - (p_z c)^2 \neq 0$$



Húrok kvantum vibrációit 2 módon változtathatjuk

- Szuperszimmetriát bevezetni
 - Térszerű dimenziók számát növelni (ahol a szuperhúrok rezeghetnek)
- Csak $9=3+6$ térdimenzióval kapjuk a részecskéinket vissza

$$E^2 - (p_x c)^2 - (p_y c)^2 - (p_z c)^2 = 0$$

- 90-es évek közepe
- 5-féle húrelmélet + 11D-s szupergravitáció
- Húrok mellett új dinamikai objektumok

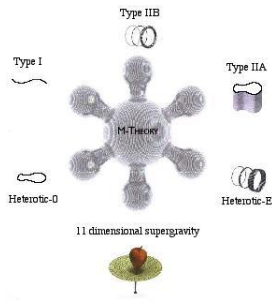
Általánosított membránok=BRANEK

0-brane	1-brane	2-brane	3-brane
pont	húr	membrán	3-brane

- magasabb dim. sokaságba ágyazott p-térszerű dim-ú felület.

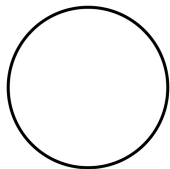
Világunk 3-brane. Fal egy szobán

- Húrelmélet: részecskénk a branekre lokalizálódhatnak



Hogyan észleljük az extra dimenziókat?

- Hiába a szép elmélet, fizika=kísérleti alátámasztás.
- Hogyan vannak rejtve?
- Kezdjük (Kaluza-) Klein ötletével.
1 dimenzió van és nem látjuk, mert kicsi!



R sugarú kör.

$$p_5 = n \cdot \frac{1}{R}$$

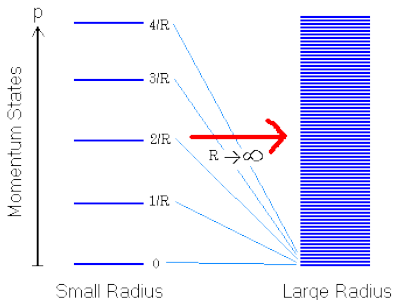
Mint a húr rezgéseket ezt is tömegként értelmezzük, mert csak a 3D-s baloldalt mérjük

- elektron mozog az apró 5. D-ban
- lesz 5.D-s impulzusa is
- kvantummechanika=hullámmechanika az elektron hullámja egészben ráférjen a körre, mint egy állóhullám
- Kül. állóhullámokhoz határozott energia és impulzus tartozik
- Kicsi az extra dimenzió ezt nem látjuk

$$E^2 - (p_x c)^2 - (p_y c)^2 - (p_z c)^2 = (p_5 c)^2 + (m c^2)^2$$

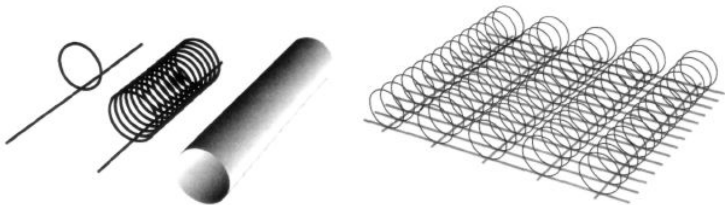
Kaluza-Klein módusok, torony

- Az elektron sokkal nehezebb kiadását mérhetjük
- Ez egy Kaluza-Klein módus
- $m_n^2 = m_e^2 + \frac{n^2}{R^2}$
- Minél kisebb az extra dim. sugár, annál nagyobbak a tömegek
- Közel egyenletes részecske-sorozat: Kaluza-Klein torony

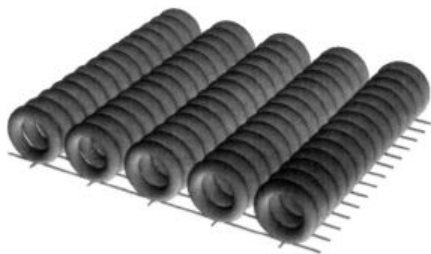


Feltekeredett Dimenziók

Minden téridő pontban (+1 dimenzió)



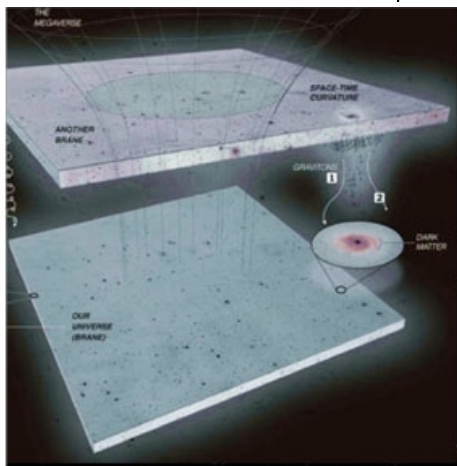
+2 dimenzió (tórusz=fánk)



Az extra dimenzió(k) lakói

Milyen részecskék Kaluza-Klein módusait keressük?

Húrelmélet: BRANEK, csapdába ejthetik az ismert részecskéket



BRANEVILÁG

- csak a teret kifestítő (Einstein) gravitáció van az extra dimenzióban
- Gravitációt a gravitonok közvetítik
- Esetleg egzotikus (sose látott) részecskék
- Ekkor az közöségek részecskék a brane foglyai és nem mozoghatnak az extra dimenzióban

De: az extra dimenziók lehetnek nagyok is!

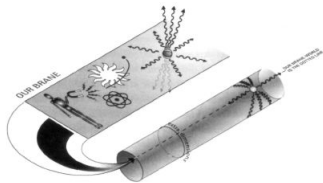


ADD= Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali 1998

Hierarchia Probléma megoldása a GRAVITÁCIÓ megváltoztatásával
kis távolságon, nagy energián.

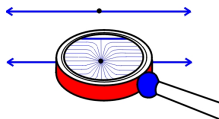
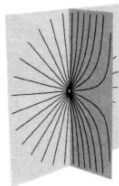
A gravitációról kis távolságon keveset tudunk (\sim mm-ig OK).

- Csak a **gravitáció** érzi az extra dim-kat csak gravitonnak lesz Kaluza-Klein módusa.
- $4+n$ dimenzió, extra dim-k véges \mathbf{R} méretűek.
- SM+emberek a $4+n$ dimenzió határán egy 3-BRANEN élünk
- Kísérletekben csak $v = 254 \text{ GeV} \rightarrow$ LEHET EGYETLEN?



R sugarú kör,...

Miért gyenge a gravitáció, miért $1/r^2$ erőtvény?



Az erővonalak eloszlának az extra dim-ba, de miután kitöltötték szokásosan mennek (telítődés).

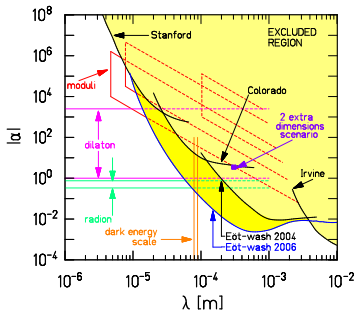
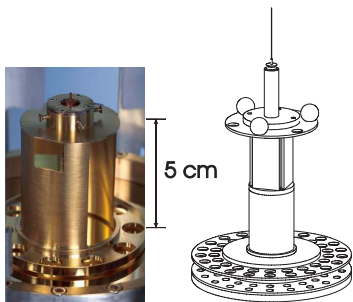
Arkani-Hamed, Dimopoulos és Dvali kiszámolták

n	R	KK tömeg	státusz
1	10^{14} cm		kizárva
2	$\sim 1 \text{ mm}$	10^{-4} eV	? ->
3	10^{-4} mm	$\sim \text{eV}$	OK

- Miért nagy az extra dim. és végtelen a 4 dim?
- $n=2$ -t lehet mérni a gravitáció rövid távú viselkedésében

$1/r^2$ Gravitációs mérések

Kísérleti következmény grav.erőtörvény megváltozik kis távon.

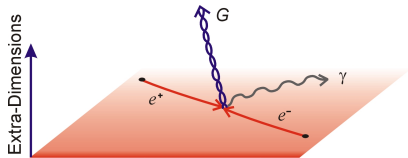


$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right) \text{ Yukawa potencial}$$

Eöt-wash kísérlet, Washington University, USA

Az extra dimenzióban élő graviton Kaluza-Klein módusainak hatása jelentős lehet

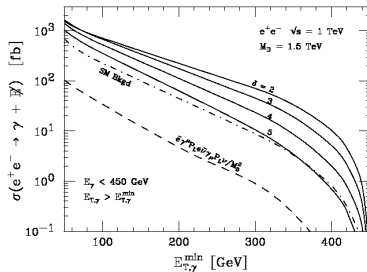
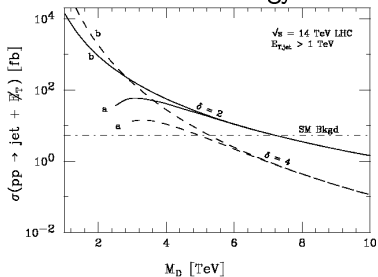
- $e^+e^- \rightarrow \gamma + \text{hiányzó } E_T$
- $q\bar{q} \rightarrow \text{jet} + \text{hiányzó } E_T$



A nyoma hiányzó energia, impulzus.

- +nehéz új részecskék ($m > 1000 * M_{proton}$ modellfüggő)

Jóslatok a következő gyorsítókra

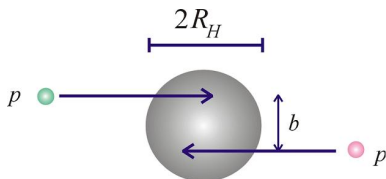


LHC Jet+semim (ILC $e^+e^- \rightarrow \gamma + \text{semim}$ jobbra) hatáskeresztmet.
 $M_D = M_*$ függvényében, δ extra dim-k száma

Kvantumgravitáció LHC-n, Fekete Lyukak

ADD -> LHC-n Kvantumgravitáció, fekete lyuk!

BH (Fekete Lyuk) kialakul, ha elegendő tömeg a horizonton belül
Föld 6000 km \rightarrow 8 mm



BH kialakul, ha ütközésnél $b < r_H(\sqrt{s})$

$M_{BH} \sim \sqrt{s}$ ütközés energiája

LHC ütközésszámmal $\sim 10^7$ BH/ év
keletkezhet

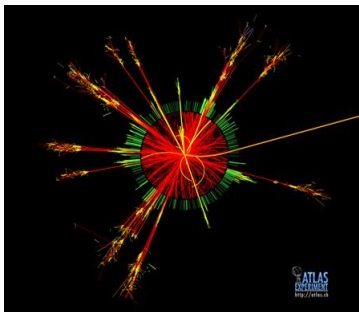
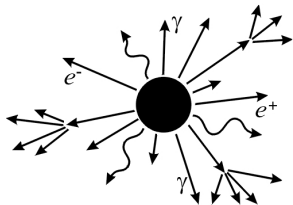
Sok fekete lyuk, mert csak kis b kell

Nem stabilak, nem nyelnek el mindent, nem válnak kis gömböccé!

Fekete Lyuk Bomlás Hawking Sugárzással

Hawking: fekete lyuk hőmérséklete $T \sim 1/M$, $\left(\frac{\hbar c^3}{8\pi k G_N} \cdot \frac{1}{M_*} \right)$
Stefan-Boltzman törvény, sugároz $\sim \sigma T^4 \sim 1/M_*^4$

- Kvantummechanikai folyamat \Rightarrow egyformán kelt minden részecskét



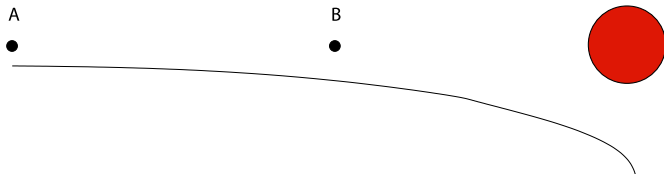
LHC ATLAS jóslat: tűzijáték

Vázlat

- 1 Hány Dimenziós a Térdő?
 - 3+1 dimenzió
 - Extra dimenziók?
- 2 A 4 Ismert Kölcsönhatás
 - Gravitáció + Elektromágnesesség
 - Extra dimenziók No. 1.
 - Standard Modell
 - Higgs Mechanizmus, Hierarchia Probléma
- 3 Extra Dimenziók újra
 - Húrelmélet, Branek
 - Nagy Extra Dimenziók
- 4 Göbült Extra Dimenziók
 - Göbült Extra Dim-k Prológus
 - Randall-Sundrum

Jelenség: GRAVITÁCIÓS VÖRÖS ELTOLÓDÁS

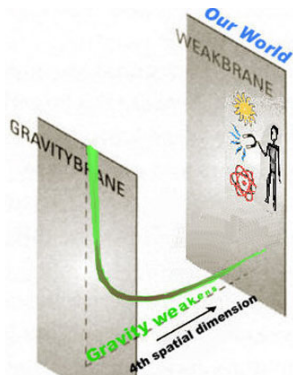
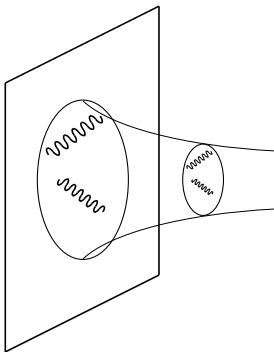
- HIERARCHIA PROBLÉMA: $M_Z, v_{Higgs} \ll M_{PLANCK}$.
- Ismerünk energiát csökkentő folyamatot, gyalog fel az emeletre!
- Foton $E = h\nu$, ν a frekvenciája



- Csillag közelében azonos folyamatból 2 foton A, B-ben
- $B \rightarrow A$ menve a B-ben keletkezett foton energiája (frekvenciája) csökken, amíg kimászik a (potenciál-) gödörből
- Távolról nézve a csillaghoz közelebb kibocsátott foton mélyebb potenciálgödörből mászik ki $\nu_B < \nu_A$

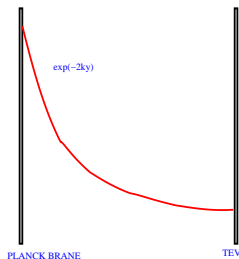
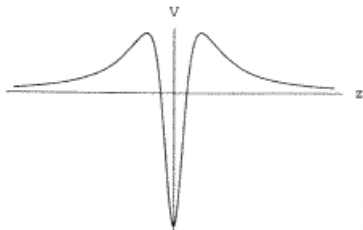
Randall-Sundrum Modell 1999

- Egy görbült extra dim. ($y=0..r_c$),
Nagy energiasűrűség= $\Lambda < 0$ kozmológiai
konstans
- Két 3-brane, köztük görbült anti de Sitter
tér AdS_5 , olyan mintha az egyik fal mögött
óriási csillag lenne



Kvantumgravitáció TeV skálán

- AdS tér olyan, mint egy hatalmas nagyító!
- A gravitáció jellemző tömege világunkból nézve $1000 * M_{proton}$
- Egyszerű kvantummechanikai egyenletet (Schrödinger) írja le vulkán brane potenciállal a távoli branen
Megoldás: 4D $m = 0$ graviton + $n * TeV$ KK



Hierarchia probléma Megoldásai ADD vs. RS

Gravitáció Gyenge

ADD, Nagy Extra Dim-k

Erővonalak (fluxus) kifolyik az extra dimenziókba

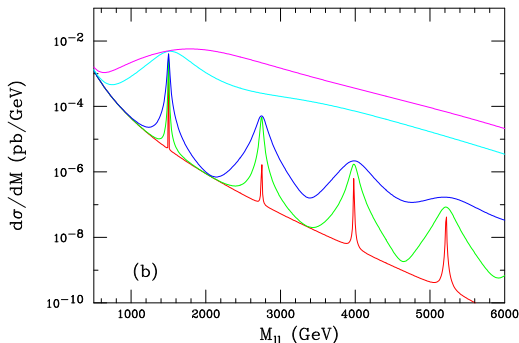
Randall Sundrum, Gömbült Extra Dim-k

Speciális graviton hullámfüggvény e^{-2ky}

Gravitáció távol (másik brane-re) lokalizálódik

Graviton KK módusok keltés LHC-n

Randall Sundrum modellben egyenként, rezonanciaként kelthető módusok ismert részecskékre (leptonok, kvarkok) bomlanak

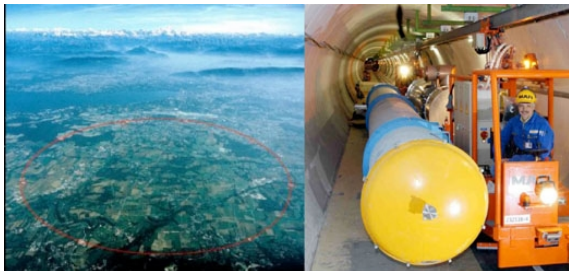


$m=1500$ GeV KK graviton Drell-Yan folyamat
 $k/M_{(5)} = 1, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1$ felülről lefelé

A keresés tart és folytatódik



2009-től LHC-ben



- Az extra dimenziók megjelentek a tudományos gondolkodásban.
- A Standard Modell nem lehet végső, fundamentális elmélet.
- Extra dimenziók megmagyarázhatják, hogy miért gyenge a gravitáció a többi kölcsönhatáshoz képest.
- Az **LHC-n tesztelhetők, mérhetők** a modellek jóslatai. **Fekete Lyukak** keletkezhetnek, gyorsan elpárolognak. Hatással lehetnek a Higgs keresésre.
- Extra dimenziók kiváló teret adnak **új ötletek** kipróbálására.



- Stephen W. Hawking: Az idő rövid története



- Stephen W. Hawking: A Világegyetem dióhéjban



- Brian Greene: Az elegáns Univerzum (húrelméletről)



- Lisa Randall: Warped passages (angolul)



- Michio Kaku: Hipertér ...

- Az atomoktól csillagokig előadásai (<http://www.atomcsill.elte.hu/>)
 - Dávid Gyula: Relativisztikus paradoxonok
 - Katz Sándor: Az elemi részek fizikája és az anyag ... (2007)
 - Veres Gábor: Milyen eszközökkel figyelhetők meg ... (2007)