Ortvay kollokvium,

2013. november 20.

A mérték/gravitáció (AdS/CFT) dualitás

Z. Bajnok

Wigner Fizikai Kutatóközpont,

MTA-Lendület Holografikus Kvantumtérelmélet Kutatócsoport

Ortvay kollokvium,

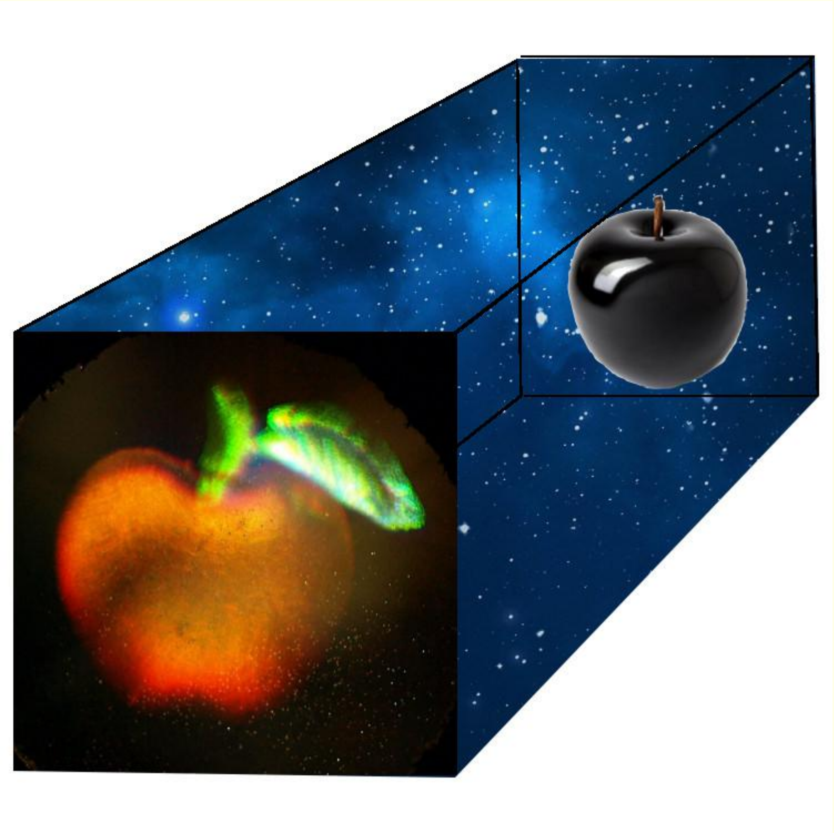
2013. november 20.

A mérték/gravitáció (AdS/CFT) dualitás

Z. Bajnok

Wigner Fizikai Kutatóközpont,

MTA-Lendület Holografikus Kvantumtérelmélet Kutatócsoport



Motiváció: AdS=CFT

J. Polchinski: TASI lectures, arXiv:1010.6134: Physics World, közvéleménykutatás:

Melyik a fizikai legszebb egyenlete?

Motiváció: AdS=CFT

J. Polchinski: TASI lectures, arXiv:1010.6134: Physics World, közvéleménykutatás:

Melyik a fizikai legszebb egyenlete?

Leonhard Euler (1707-1783)

$$e^{i\cdot\pi} + 1 = 0$$

$i, \pi, e, 1, 0$ and $+, \cdot, \hat{}$

James Clerk Maxwell (1831-1879)

$$d \star F = j \quad ; \quad dF = 0$$

egyesítés: elektromágnesség

Motiváció: AdS=CFT

J. Polchinski: TASI lectures, arXiv:1010.6134: Physics World, közvéleménykutatás:

Melyik a fizikai legszebb egyenlete?

Leonhard Euler (1707-1783)

$$e^{i\cdot\pi}+1=0$$

$i, \pi, e, 1, 0$ and $+, \cdot, \hat{}$

James Clerk Maxwell (1831-1879)

$$d\star F=j \quad ; \quad dF=0$$

egyesítés: elektromágnesség

Juan Martín Maldacena (1968-)

$$AdS=CFT$$

egyesítés: erők+ kvantumelmélet

Motiváció: AdS=CFT

J. Polchinski: TASI lectures, arXiv:1010.6134: Physics World, közvéleménykutatás:

Melyik a fizikai legszebb egyenlete?

Leonhard Euler (1707-1783)

$e^{i\cdot\pi} + 1 = 0$

$i, \pi, e, 1, 0$ and $+, \cdot, \hat{}$

James Clerk Maxwell (1831-1879)

$d \star F = j \quad ; \quad dF = 0$

egyesítés: elektromágnesség

Juan Martín Maldacena (1968-)

$AdS = CFT$

egyesítés: erők+ kvantumelmélet

J. Maldacena, Adv.Theor.Math.Phys. 2 (1998) 231-252: mára több mint 9300 hivatkozás

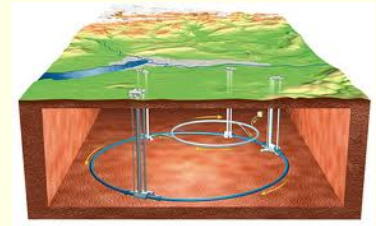
Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?

Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?

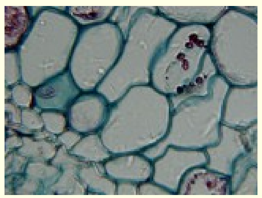
mikroszkóp

elektronmikroszkóp

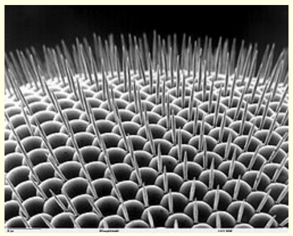
szinkrotron



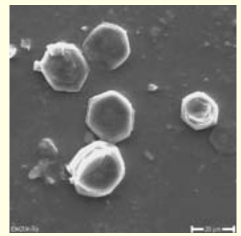
LHC



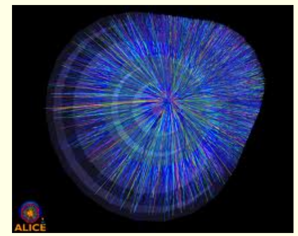
mikrométer



nanométer



sok atom



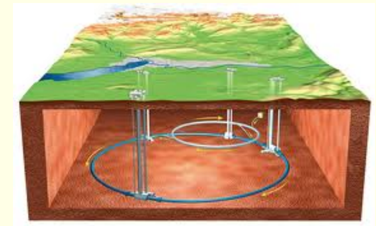
kvarkok,leptonok

Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?

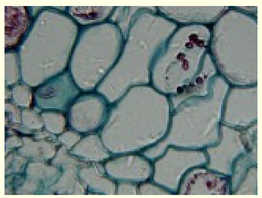
mikroszkóp

elektronmikroszkóp

szinkrotron

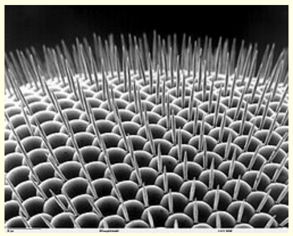


LHC

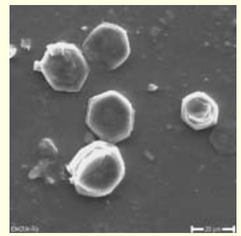


mikrométer

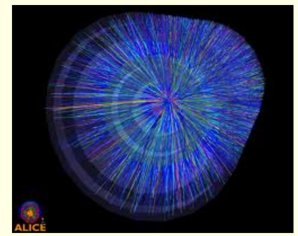
periódusos rendszer



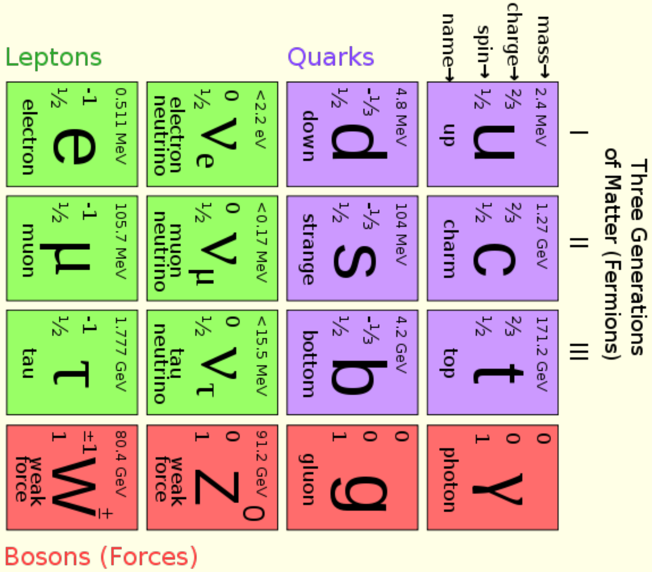
nanométer



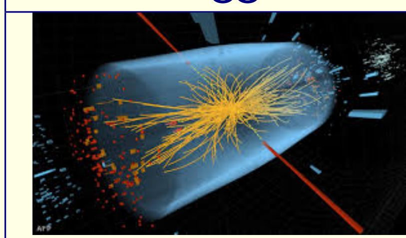
sok atom



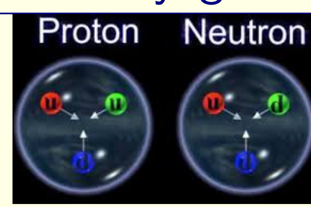
kvarkok,leptonok



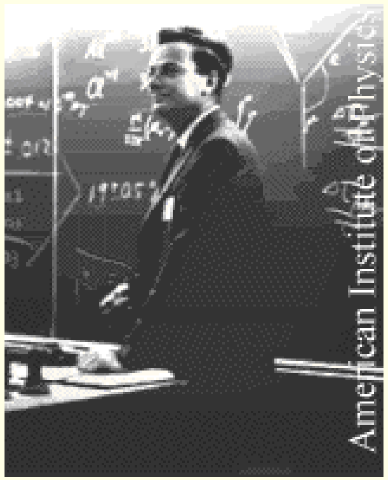
Higgs



anyag



	Kölcsönhatás
γ	elektromágneses
$W^{\pm}, Z$	gyenge
g	erős
gr	gravitációs



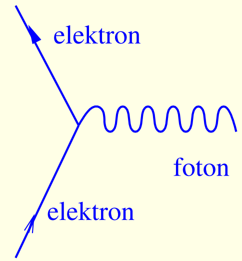
Feynman: *If you want to learn about nature, to appreciate nature, it is necessary to understand the language that she speaks in.*

Kvantumos mértékelmélet

Elektromos + mágneses kh: $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$

+Kvantumelmélet→kvantumelektrodinamika

$U(1)$ mértékelmélet: $A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \Lambda$



$$\boxed{\mathcal{L} = -\tfrac{1}{4}F^2 + \bar\Psi(i\not\partial - m)\Psi - e\bar\Psi \not A \Psi}$$

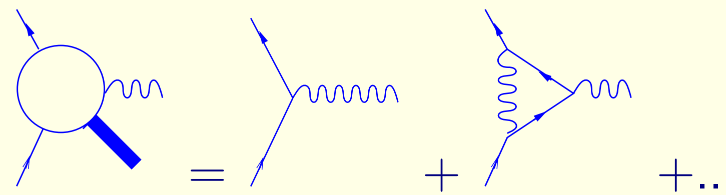
kísérleti eredmény: $\underline{\mu} = g\frac{e\hbar}{2mc}\underline{s}$ ahol $g = 2(1+a)$

[Gabrielse 2006]: $a = 1159652180.85(.76) \times 10^{-12}$

perturbáció számítás:

Feynman gráfok

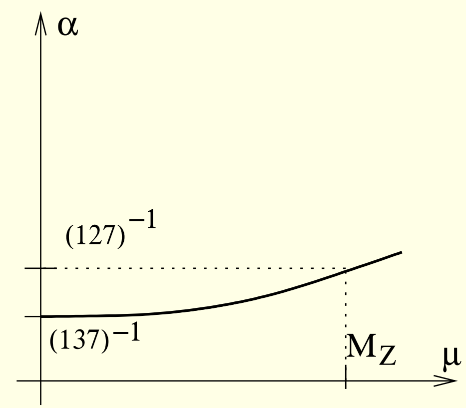
$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{e^2}{2\pi\hbar c} = 0.001161$



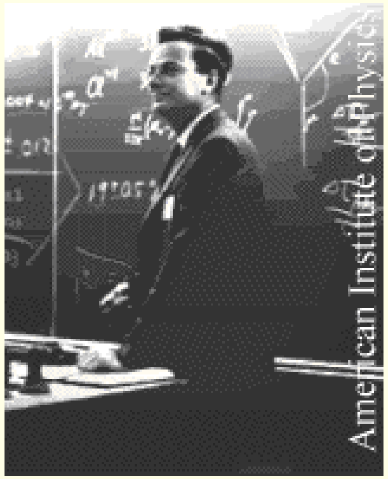
$\frac{g}{2} = 1 - 1.3140\frac{\alpha}{2\pi} + \dots$

impulzusfüggő csatolás:

$\beta(\alpha) = \mu\frac{\partial\alpha}{\partial\mu} > 0$

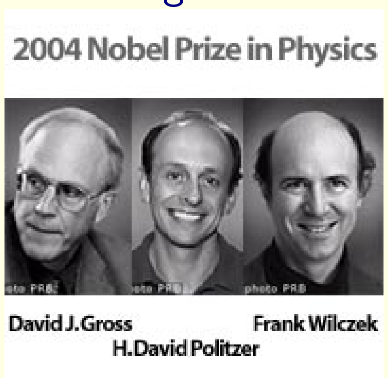


Kvantumszíndinamika



Kvantum-
mértékelmélet

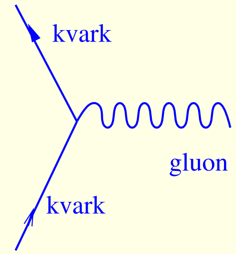
aszimptotikus
szabadság

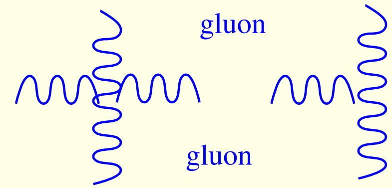


foton $A_\mu \leftrightarrow G_\mu^{1..8}$ gluon $\rightarrow F_{\mu\nu}^{1..8}$

elektron $\Psi_e \leftrightarrow \Psi_{kvark}$ kvark

$SU(3)$ mértékelmélet: $G_\mu \rightarrow g^{-1}G_\mu g + g^{-1}\partial_\mu g$





$$\boxed{\mathcal{L} = -\tfrac{1}{4}F^2 + \bar{\Psi}(i\partial\!\!\!/ - m)\Psi - g\bar{\Psi}G\!\!\!/\Psi}$$

kísérleti eredmény:

hadron spektrum

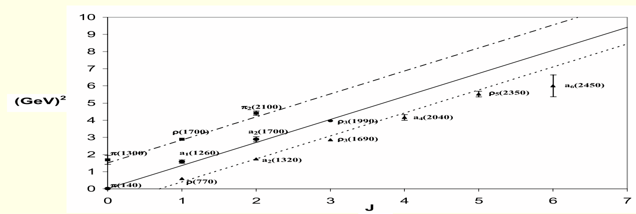
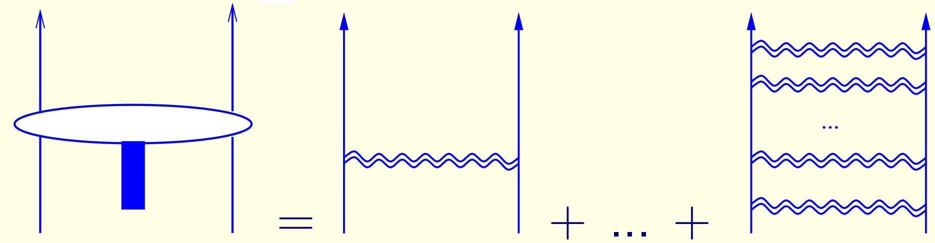


Fig. 1.

perturbáció számítás:

Feynman gráfok

$0.001 = \frac{\alpha}{2\pi} \leftrightarrow \frac{\alpha_s}{4\pi} = O(1)$

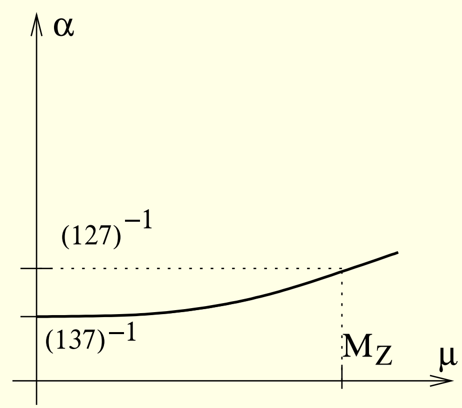


impulzusfüggő csatolás:

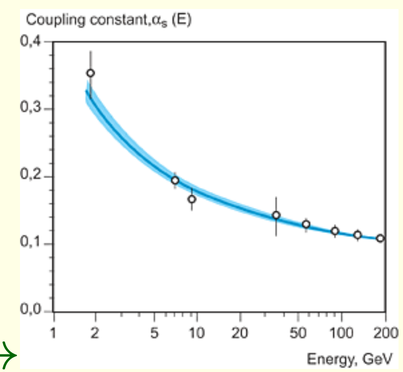
$\beta(\alpha_s) = \mu\frac{\partial\alpha_s}{\partial\mu} < 0$

aszimptotikus szabadság

bezárás



$\leftrightarrow$



Erős kölcsönhatás=kvantumszíndinamika

SU(3) mértékelmélet

$$\boxed{\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^2 + \bar{\Psi}(i\not{\partial} - m)\Psi - g\bar{\Psi}\not{G}\Psi}$$

Wigner Jenő:

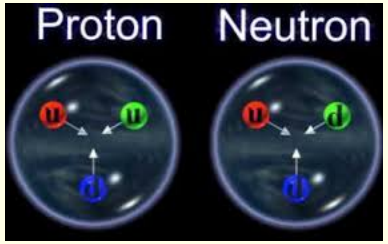
The simplicities of natural laws arise through the complexities of the language we use for their expression.

Alacsony energia: nemperturbatív fizika

bezárás

hadronspektrum,

nehézion ütközés



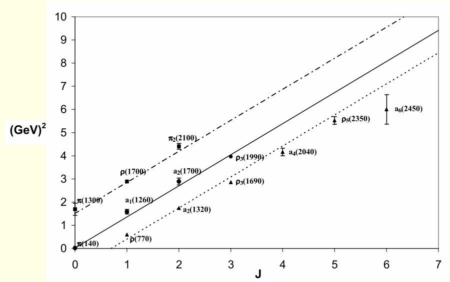
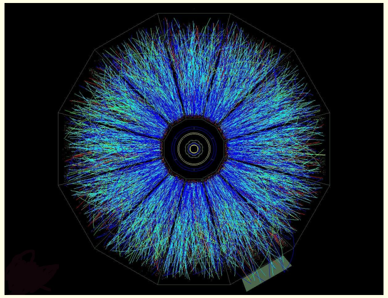
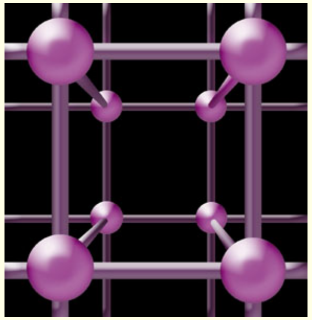


Fig. 1.



Rács-mértékelmélet: világ 32^4

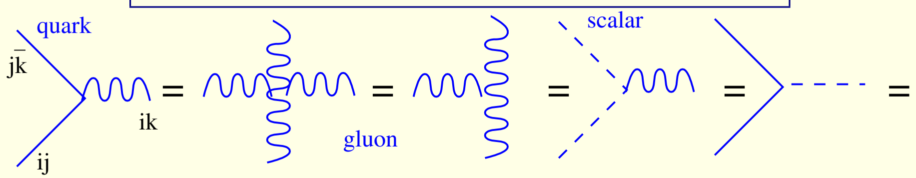


protontömeg $\surd$nehézionütközés?

Wigner:It is nice to know that the computer understands the problem. But I would like to understand it too.

egyszerűsített modell

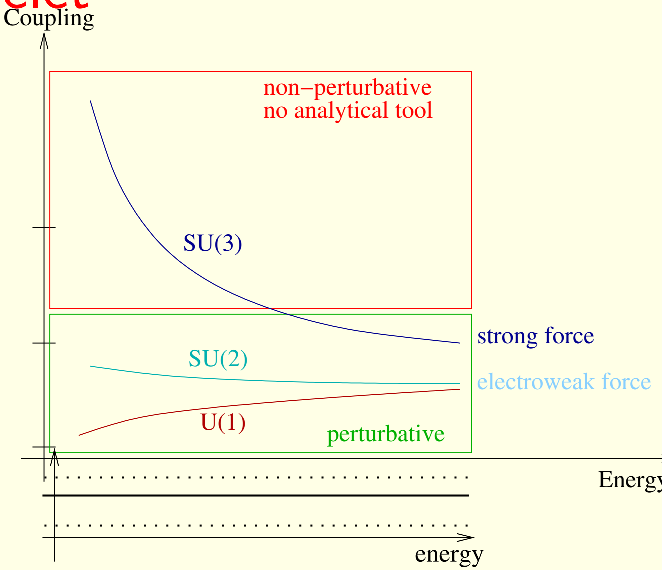
$$\boxed{\mathcal{N} = 4 \text{ D=4 } SU(N) \text{ SYM}}$$



$$\frac{2}{g^2_{YM}}\int d^4x \mathrm{Tr}\left[-\frac{1}{4}F^2 - \frac{1}{2}(D\Phi)^2 + i\overline{\Psi}\not{D}\Psi + V\right]$$

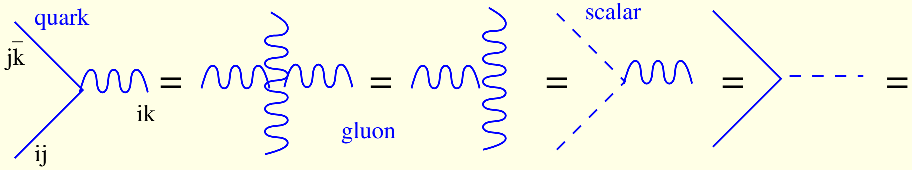
$$V(\Phi,\Psi) = \frac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

Maximálisan (szuper)szimmetrikus mértékelmélet



Alapvető kölcsönhatások

kölcsönhatás	részecskék	mértékcsoport
elektromgáneses	foton+elektron	$U(1)$
elektrogyenge	$W^{\pm}, Z \quad \mu,\nu$+Higgs	$SU(2)\times U(1)$
erős	gluon+kvark	$SU(3)$
MaxSzim. SYM	gluon A_μ+kvark Ψ+skalar Φ	$SU(N)$



minden tér N^2-1 komponensű mátrix (i,j)

$$Q_{1,2,3,4} \qquad \Psi^{ij}_{1,2,3,4} \qquad Q_{1,2,3,4}$$

$$A^{ij}_\mu \quad \nearrow \searrow \quad su(4)=so(6) \quad \circlearrowright \quad \searrow \nearrow \quad \Phi^{ij}_{1,2,3,4,5,6}$$

$$Q^\dagger_{1,2,3,4} \qquad \overline{\Psi}^{ij}_{1,2,3,4} \qquad Q^\dagger_{1,2,3,4}$$

$$\mathcal{L}=\frac{2}{g^2_{YM}}\int d^4x \mathrm{Tr}\left[-\frac{1}{4}F^2-\frac{1}{2}(D\Phi)^2+i\overline{\Psi}\not{D}\Psi+V\right]$$

$$V(\Phi,\Psi)=\frac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2+\overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

$\beta=0$ →skálainvariancia $m=0$

paraméterek: N, g_{YM}

szuperkonform CFT

Szimmetriák:

belső: $su(4)=so(6)$

téridő: konform⊃Lorentz

$so(4,2)=su(2,2)$

szuper $psu(2,2|4)$

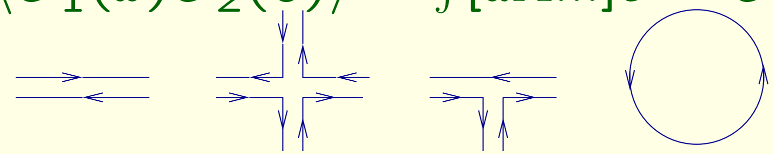
$$\begin{pmatrix} su(2,2) & Q \\ Q^\dagger & su(4) \end{pmatrix}$$

CFT: Fizikai mennyiségek

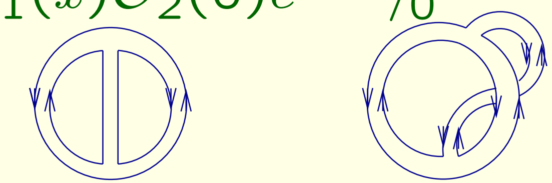
max. szimmetrikus mértékelmélet
$\Psi_{1,2,3,4}$
A $\quad \Phi_{1,2,3,4,5,6}$ fields $SU(N)$ matrices
$\overline{\Psi}_{1,2,3,4}$
$\mathcal{S} = \frac{2}{g_{YM}^2} \int d^4x \mathrm{Tr}\left[-\frac{1}{4}F^2 - \frac{1}{2}(D\Phi)^2 + i\overline{\Psi}\not{D}\Psi + V\right]$
$V(\Phi,\Psi) = \frac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$

fizikai mennyiségek (g_{YM}, N)
particiós függvény
mértékinvariáns operátorok
$\mathcal{O}(x) = \mathrm{Tr}(A^{L_1}\Psi^{L_2}\Phi^{L_3}..)$
Wilson loop, determinánsok
korrelátorok: $\langle \mathcal{O}_1(x)\mathcal{O}_2(0)\rangle$

korrelátorok: $\langle \mathcal{O}_1(x)\mathcal{O}_2(0)\rangle = \int [dA...] e^{-i\mathcal{S}} \mathcal{O}_1(x)\mathcal{O}_2(0) = \langle \mathcal{O}_1(x)\mathcal{O}_2(0) e^{-iV}\rangle_0$

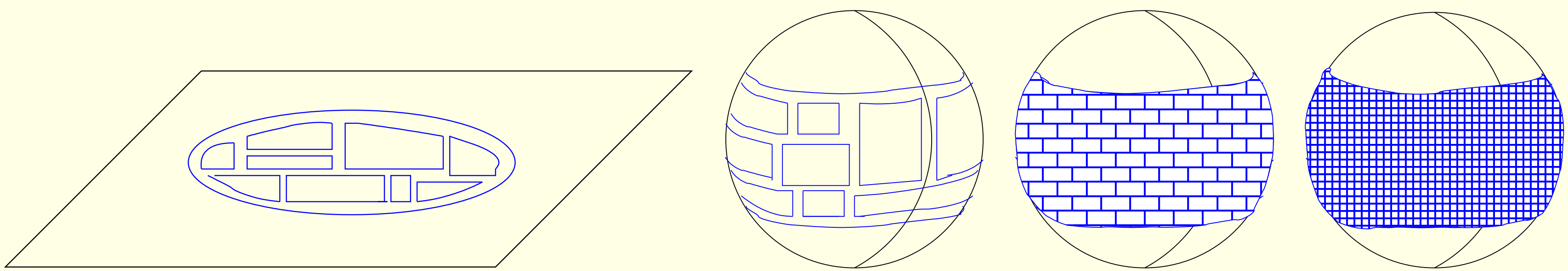
perturbatíven: 

g_{YM}^2 $\quad g_{YM}^{-2}$ $\quad g_{YM}^{-2}$ $\quad N$

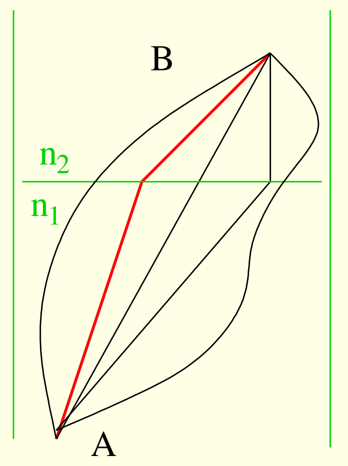
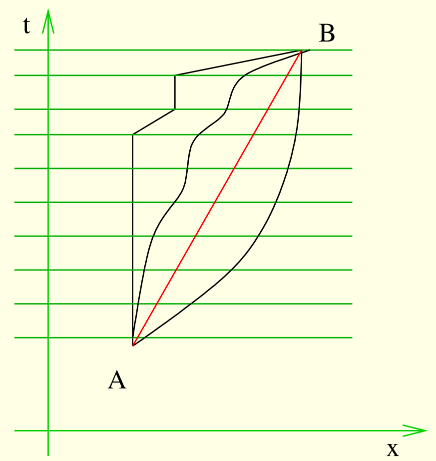
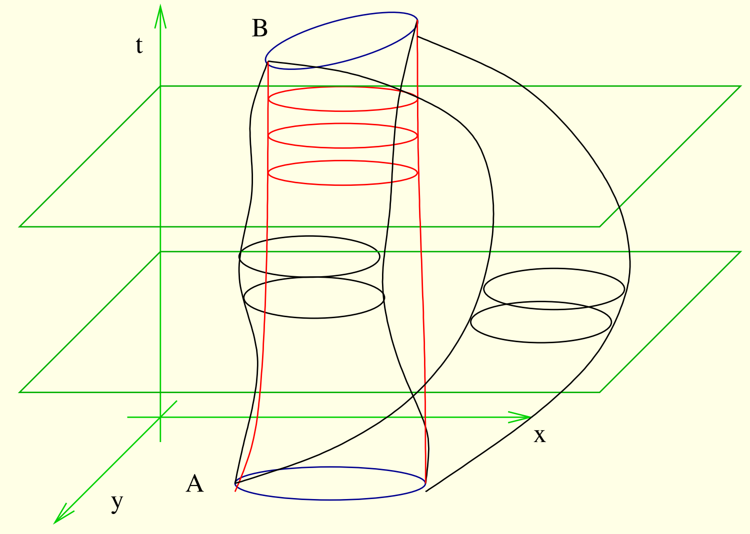
génusz kifejtés 

$g_{YM}^2 N^3 = N^2\lambda \quad \lambda = g_{YM}^2 N$

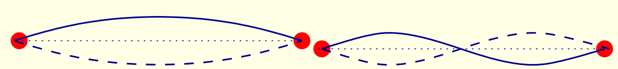
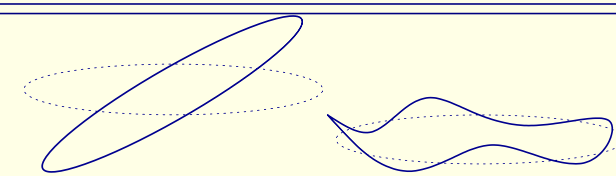
partíciós függv. $Z(\lambda, \frac{1}{N}) = N^2 \sum_g (\frac{1}{N})^{2g} \sum_n \alpha(g,n)\lambda^n$ húrelmélet? (t' Hooft)



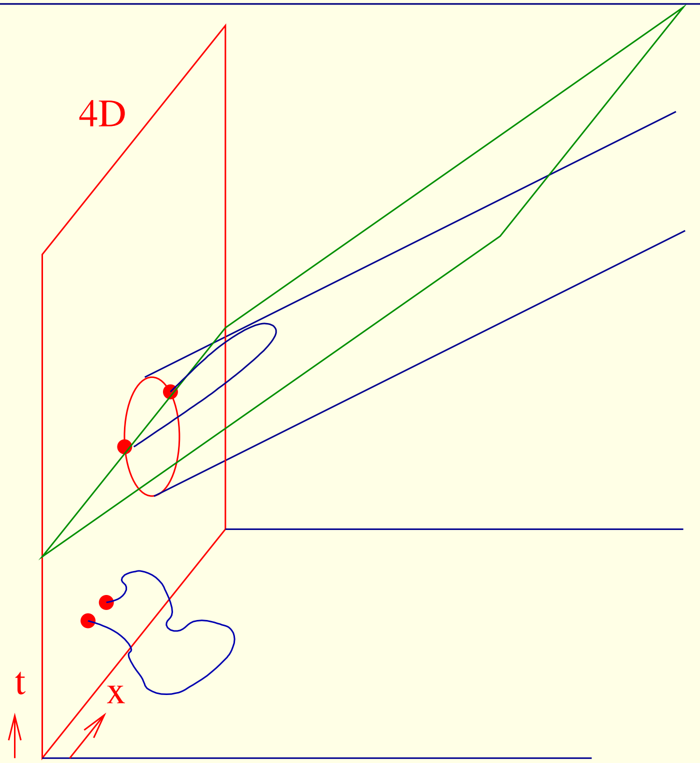
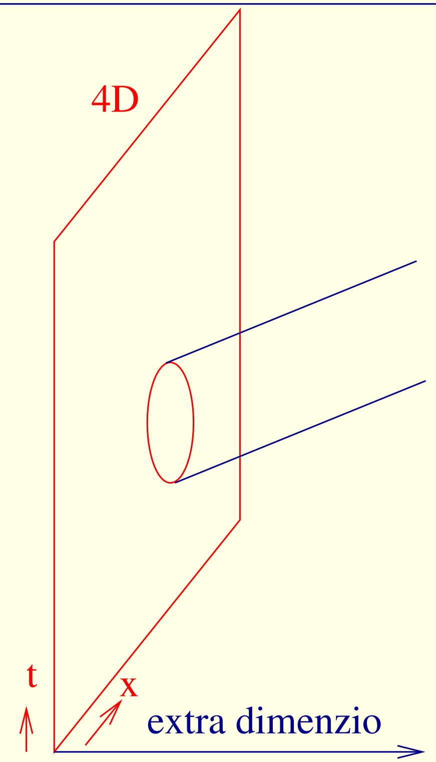
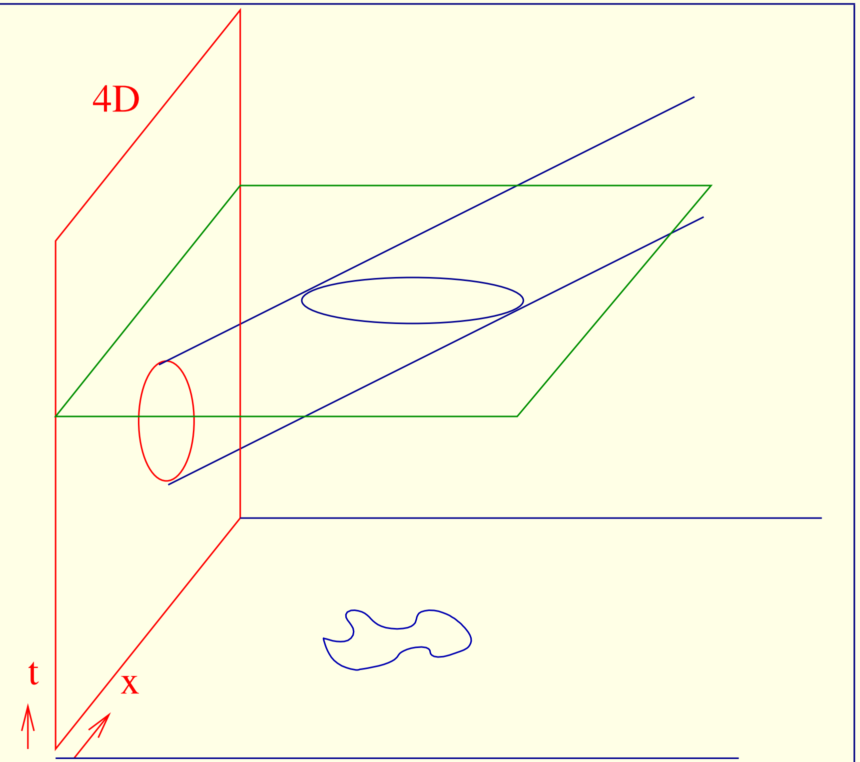
Húrok klasszikus dinamikája

<table>
<tr><td>fény</td><td>pontrészecske</td><td>húr</td></tr>
<tr><td>Fermat elv</td><td>téridő (x, t)</td><td>téridő (x, y, t)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>idő minimális</td><td>téridő út minimális</td><td>téridő felület minimális</td></tr>
</table>

Kvantum húrok spektruma

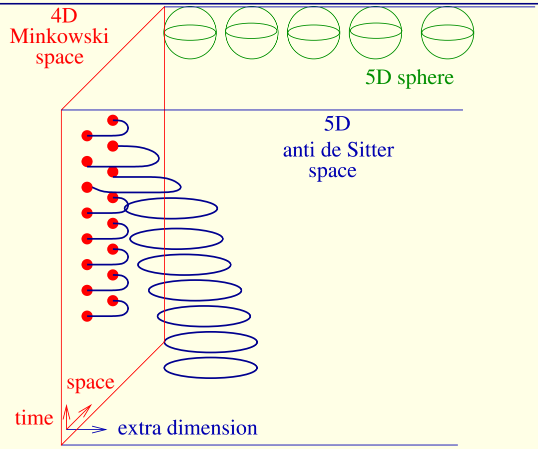
<table>
<tr><td>nyílt húr</td><td></td><td>zárt húr</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>foton, mértékbozon, elektron, kvarkok+...</td><td></td><td>graviton+...</td></tr>
<tr><td>mértékelmélet anyaggal</td><td></td><td>gravitáció</td></tr>
</table>

Mérték/gravitáció dualitás

nyílt húr	idő relatív	zárt húr
		
nyílt húr folyamat		zárt húr folyamat
mértékelmélet	=	gravitáció

AdS/CFT dualitás (Maldacena 1998)

$\boxed{\mathrm{II}_B \text{ szuperhúr } AdS_5 \times S^5 \text{ háttéren}}$



$$\sum_1^6 Y_i^2 = R^2 \qquad -++++- = -R^2$$

$$\frac{R^2}{\alpha'} \int \frac{d\tau d\sigma}{4\pi} \left(\partial_a X^M \partial^a X_M + \partial_a Y^M \partial^a Y_M \right) + \dots$$

$$\equiv$$

$\boxed{\mathcal{N} = 4 \text{ D=4 } SU(N) \text{ SYM}}$

$$\frac{2}{g_{YM}^2} \int d^4x \mathrm{Tr} \left[-\frac{1}{4} F^2 - \frac{1}{2} (D\Phi)^2 + i \overline{\Psi} \not{D} \Psi + V \right]$$

$$V(\Phi, \Psi) = \frac{1}{4} [\Phi, \Phi]^2 + \overline{\Psi} [\Phi, \Psi]$$

$\beta = 0$ szuperkonform

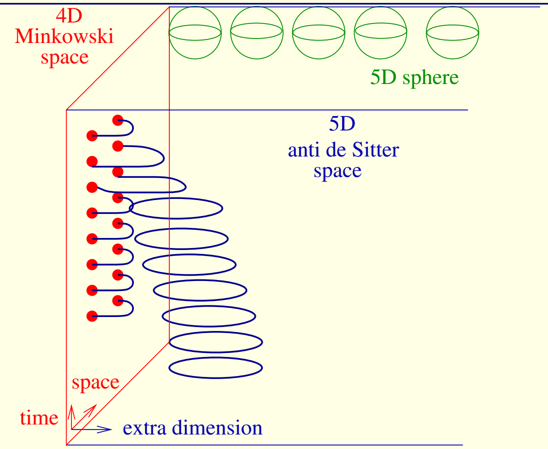
$$psu(2,2|4) \supset su(2,2) \otimes su(4)$$

$$su(2,2) = so(4,2) \qquad su(4) = so(6)$$

mértékinv.: $\mathcal{O} = \mathrm{Tr}(\Phi^2), \det(\ ), \mathrm{Tr}(P e^{\int A})$

AdS/CFT dualitás (Maldacena 1998)

II_B szuperhúr $AdS_5 \times S^5$ háttéren



$$\sum_1^6 Y_i^2 = R^2 \qquad -++++- = -R^2$$

$$\frac{R^2}{\alpha'} \int \frac{d\tau d\sigma}{4\pi} \left(\partial_a X^M \partial^a X_M + \partial_a Y^M \partial^a Y_M\right) + \dots$$

$\equiv$

$\mathcal{N} = 4$ D=4 $SU(N)$ SYM

$$\frac{2}{g_{YM}^2} \int d^4x \mathrm{Tr}\left[-\tfrac{1}{4}F^2 - \tfrac{1}{2}(D\Phi)^2 + i\overline{\Psi}\not{D}\Psi + V\right]$$

$$V(\Phi,\Psi) = \tfrac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

$\beta = 0$ szuperkonform

$$psu(2,2|4) \supset su(2,2) \otimes su(4)$$

$$su(2,2) = so(4,2) \quad su(4) = so(6)$$

mértékinv.: $\mathcal{O} = \mathrm{Tr}(\Phi^2), \det(\ ), \mathrm{Tr}(Pe^{\int A})$

Szótár

Csatolás: $\sqrt{\lambda} = \frac{R^2}{\alpha'}$, $g_s = \frac{\lambda}{N} \to 0$

2D QFT

Húr energia szintek: $E(\lambda)$

$$E(\lambda) = E(\infty) + \frac{E_1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{E_2}{\lambda} + \dots$$

erős$\leftrightarrow$gyenge

$\Downarrow$

$\lambda = g_{YM}^2 N$, $N \to \infty$ lapos limesz

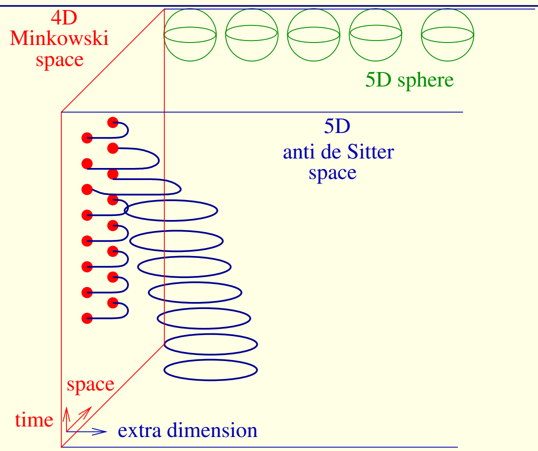
$$\langle \mathcal{O}_n(x) \mathcal{O}_m(0) \rangle = \frac{\delta_{nm}}{|x|^{2\Delta_n(\lambda)}}$$

Skáladimenzió $\Delta(\lambda)$

$$\Delta(\lambda) = \Delta(0) + \lambda\Delta_1 + \lambda^2\Delta_2 + \dots$$

AdS/CFT dualitás (Maldacena 1998)

II_B szuperhúr $AdS_5 \times S^5$ háttéren



$$\sum_1^6 Y_i^2 = R^2 \qquad -++++-- = -R^2$$

$$\frac{R^2}{\alpha'}\int \frac{d\tau d\sigma}{4\pi}\left(\partial_a X^M \partial^a X_M + \partial_a Y^M \partial^a Y_M\right) + \dots$$

$\equiv$

$\mathcal{N} = 4$ D=4 $SU(N)$ SYM

$$\frac{2}{g_{YM}^2}\int d^4x \mathrm{Tr}\left[-\frac{1}{4}F^2 - \frac{1}{2}(D\Phi)^2 + i\overline{\Psi}\not{D}\Psi + V\right]$$

$$V(\Phi,\Psi) = \frac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

$\beta = 0$ szuperkonform

$$psu(2,2|4) \supset su(2,2) \otimes su(4)$$

$$su(2,2) = so(4,2) \quad su(4) = so(6)$$

mértékinv.:$\mathcal{O} = \mathrm{Tr}(\Phi^2), \det(\ ), \mathrm{Tr}(Pe^{\int A})$

Szótár

Csatolás: $\sqrt{\lambda} = \frac{R^2}{\alpha'}$, $g_s = \frac{\lambda}{N} \to 0$

2D QFT

Húr energia szintek: $E(\lambda)$

$$E(\lambda) = E(\infty) + \frac{E_1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{E_2}{\lambda} + \dots$$

erős$\leftrightarrow$gyenge

$\Downarrow$

$\lambda = g_{YM}^2 N$, $N \to \infty$ lapos limesz

$$\langle \mathcal{O}_n(x)\mathcal{O}_m(0)\rangle = \frac{\delta_{nm}}{|x|^{2\Delta_n(\lambda)}}$$

Skáladimenzió $\Delta(\lambda)$

$$\Delta(\lambda) = \Delta(0) + \lambda\Delta_1 + \lambda^2\Delta_2 + \dots$$

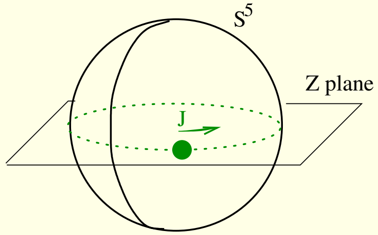
2D integrálható QFT

spektrum: $Q = 1, 2, \dots, \infty$ diszperzió: $\epsilon_Q(p) = \sqrt{Q^2 + \frac{\lambda}{\pi^2}\sin^2\frac{p}{2}}$

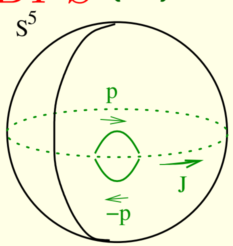
Egzakt szórásmátrix: $S_{Q_1Q_2}(p_1, p_2, \lambda)$

AdS/CFT: energiák és skáladimenziók

BPS húr konfiguráció:BMN



$$E_{BPS}(\lambda) = J$$



klasszikus energia+hurok korrekciók

$\leftrightarrow$

$$V(\Phi,\Psi) = \tfrac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

szuperszimmetrikus (BPS) operátor

$$Z = \Phi_5 + i\Phi_6, Y = \Phi_3 + i\Phi_4$$

$$X = \Phi_1 + i\Phi_2$$

$$\mathcal{O}_{BPS} = \mathrm{Tr}(Z^J) \leftrightarrow |\uparrow\uparrow \ldots \uparrow\rangle$$

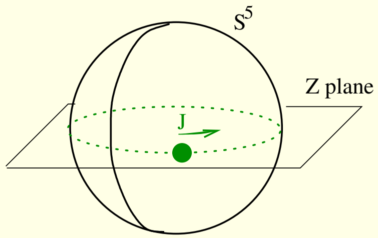
$$\Delta_{BPS} = J$$

nem szuperszimmetrikus: Konishi

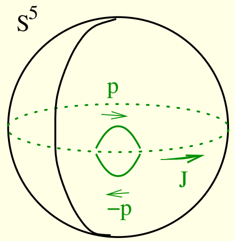
$$\mathcal{O}_K = \mathrm{Tr}(ZYZY + \ldots) \leftrightarrow |\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\rangle + .$$

AdS/CFT: energiák és skáladimenziók

BPS húr konfiguráció:BMN



$$E_{BPS}(\lambda) = J$$



klasszikus energia+hurok korrekciók

$$\leftrightarrow$$

$$V(\Phi,\Psi) = \tfrac{1}{4}[\Phi,\Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi,\Psi]$$

szuperszimmetrikus (BPS) operátor

$$Z = \Phi_5 + i\Phi_6, Y = \Phi_3 + i\Phi_4$$

$$X = \Phi_1 + i\Phi_2$$

$$\mathcal{O}_{BPS} = \mathrm{Tr}(Z^J) \leftrightarrow |\uparrow\uparrow\ldots\uparrow\rangle$$

$$\Delta_{BPS} = J$$

nem szuperszimmetrikus: Konishi

$$\mathcal{O}_K = \mathrm{Tr}(ZYZY + \ldots) \leftrightarrow |\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\rangle + .$$

2D integrable QFT

szuperszimmetrikus alapállapot $E_0(J) = \Delta(\lambda) - J = 0$

Konishi: kétrészecske állapot

$$E = E_{BPS} + E_{BA} + E_{FSC}$$

Bethe Ansatz: $e^{ipJ}S(p,-p) = 1$

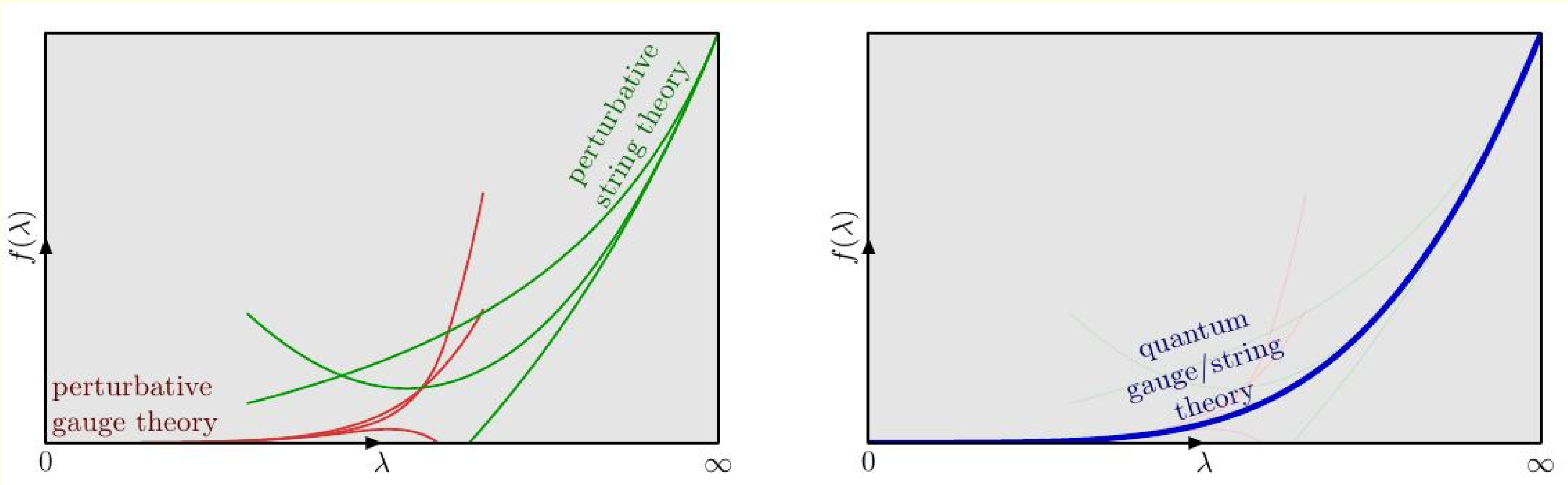
$$E_{BA} = 2E(p,\lambda) = 2\sqrt{1 + \tfrac{\lambda}{\pi^2}(\sin\tfrac{p}{2})^2}$$

$$E_{FSC} = \sum_Q \int \frac{dq}{2\pi} S_{Q1}(q,p)S_{Q1}(q,-p)e^{-\epsilon_Q L} + \ldots = E_{TBA}$$

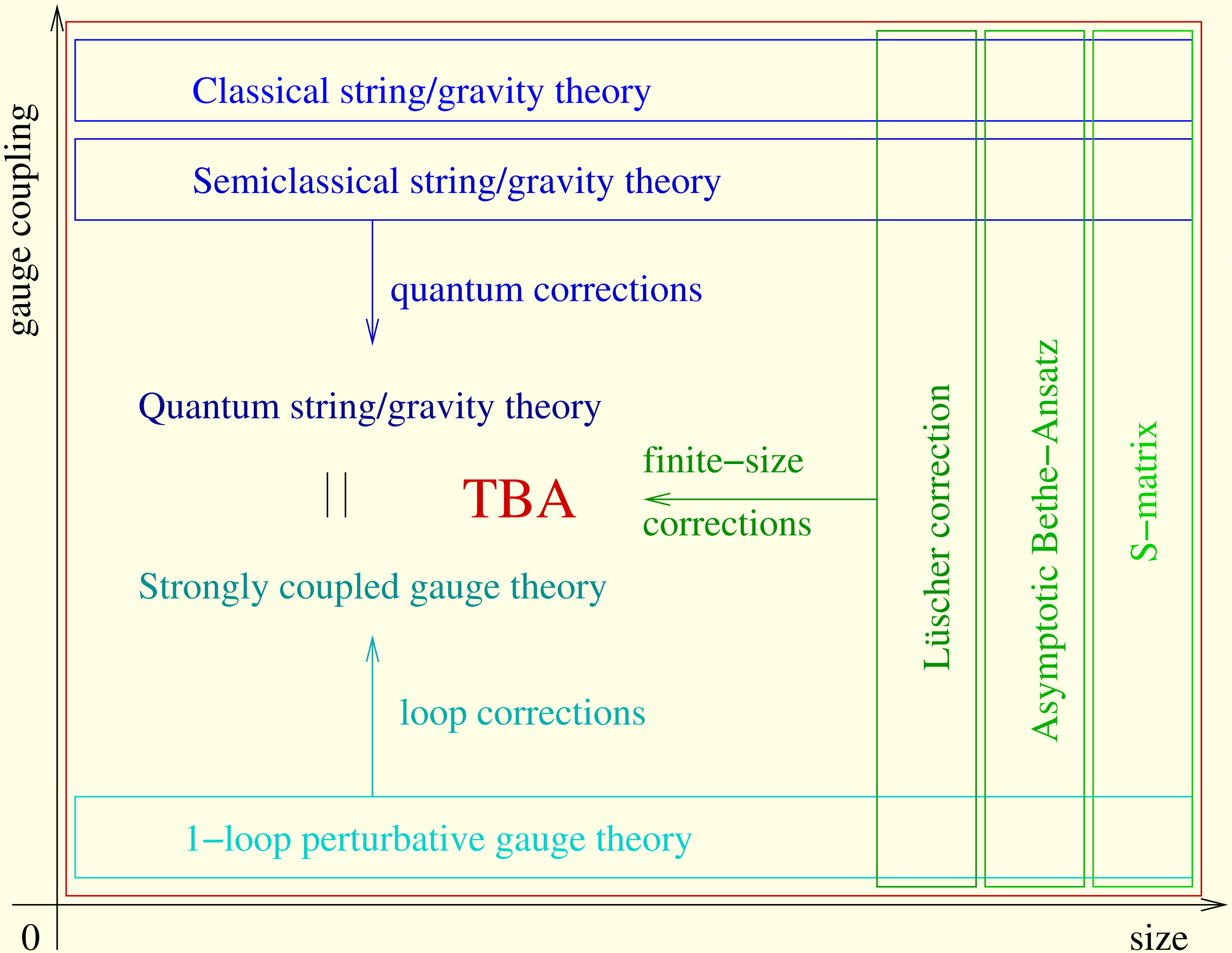
AdS/CFT spektrális probléma

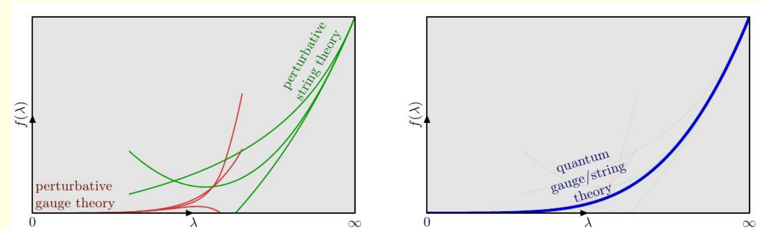
AdS/CFT spektrális probléma

Konishi skáladimenzió: $\mathrm{Tr}(ZXZX - ZZXX)$

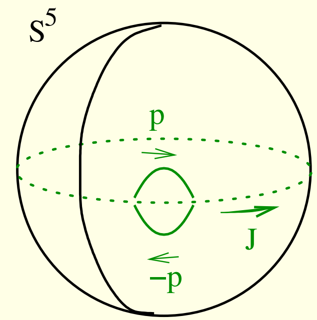


AdS/CFT spektrális probléma





Konishi skáladimenzió



Konform 2pt függvény: $\langle \mathcal{O}_i(x)\mathcal{O}_j(0)\rangle = \frac{\delta_{ij}}{|x|^{2\Delta_i}}$ skálidimenzió: Δ_i

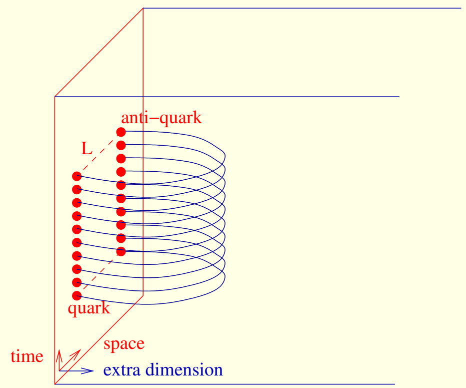
Konishi op. $\mathcal{O}_K = \mathrm{Tr}(\Phi_i^2)$

$$\Delta = 2 + 12g^2 - 48g^4 + 336g^6 +$$

loop	4	5	6	7	8	9
Δ	$96(-26+6\zeta_3-15\zeta_5)$	$-96(-158-73\zeta_3+$ $54\zeta_3^2+90\zeta_5-315\zeta_7)$				
mérték	[Fiamberti,Sieg, A. Santambrogio, Zanon 08] [Velizhanin09]	[Eden, Heslop, Korchemsky, Smirnov, Sokatchev 12]	[Smirnov 14?]			
Lüscher	[Bajnok, Janik 08]	[Bajnok,Hegedus, Janik,Lukowski 09]	[Bajnok,	Janik 12]		
TBA	[Kazakov, Gromov, Vieira 09]	[Balog, Hegedűs 10]				
FiNLIE	[Leurent,	Serban,	Volin 12]	[Leurent, Volin 13]		[Volin 13]

AdS/CFT: alkalmazások

Minimális AdS felület



egzakt erős csatolásra $\lambda \to \infty$

$\equiv$

$\boxed{\text{kvark-antikvark potenciál}}$

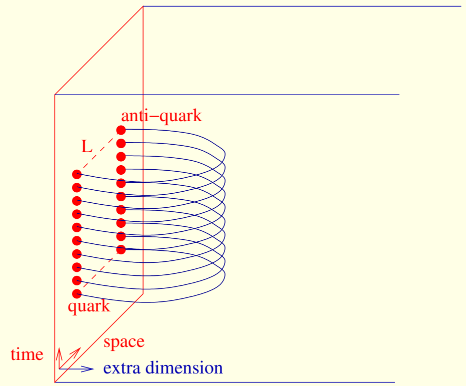
Wilson hurok: $\langle \oint_C A_\mu dx^\mu \rangle$

erős csatolás, nemperturbatív

$$V(r) = -\frac{4\pi^2\sqrt{2\lambda}}{\Gamma(\frac{1}{4})^4}\frac{1}{r}$$

AdS/CFT: alkalmazások

Minimális AdS felület



egzakt erős csatolásra $\lambda \to \infty$

$\equiv$

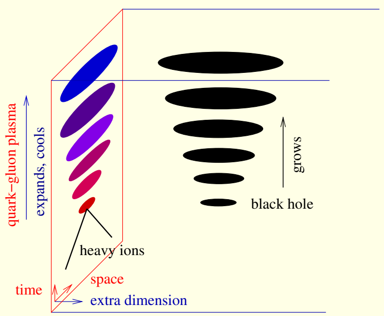
$\boxed{\text{kvark-antikvark potenciál}}$

Wilson hurok: $\langle \oint_C A_\mu dx^\mu \rangle$

erős csatolás, nemperturbatív

$$V(r) = -\frac{4\pi^2\sqrt{2\lambda}}{\Gamma(\frac{1}{4})^4}\frac{1}{r}$$

growing black hole



metrika $\delta g(x,0) \propto \langle T_{\mu\nu} \rangle$

$$ds^2 = \frac{1}{z^2}(g(x,z)_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu + dz^2)$$

Einstein egyenlet

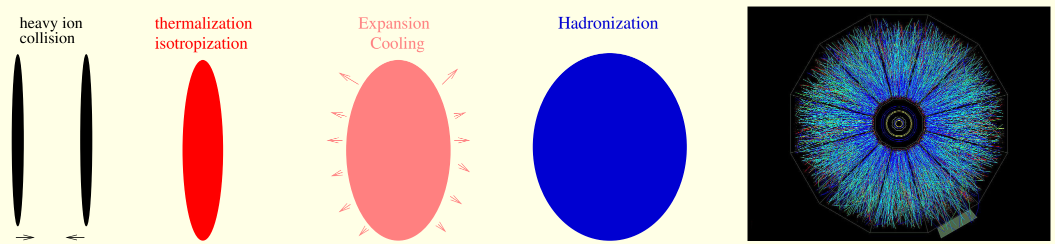
$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R - 6g_{ab} = 0$$

növekvő fekete lyuk

$$g_{tt} = -\frac{(1-z^4/z_0^4)^2}{(1+z^4/z_0^4)^2}\,;\; g_{xx} = 1 + \frac{z^4}{z_0^4}$$

$\equiv$

Nehézion ütközés: tágulás



$\langle T_{\mu\nu} \rangle$ anyageloszlás

relativisztikus hidrodinamika

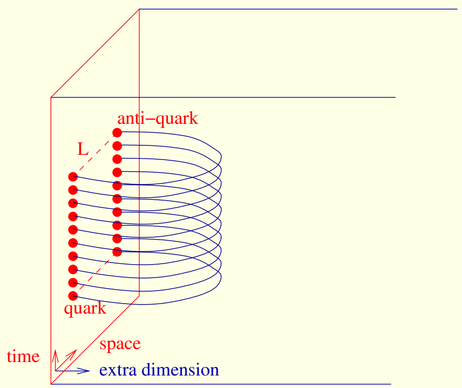
$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$ és $T^\mu_\mu = 0$

viszkózus kvark-gluon plazma

tágulás: tökéletes folyadék $+\ \frac{\eta}{s} = \frac{1}{4\pi}\ + \ldots$

AdS/CFT: $q-\bar{q}$ potenciál

kvark-antikvark potenciál



$$V(L)=\frac{-\lambda}{4\pi L}+\ldots$$ 4 hurokig

$\equiv$

Wilson hurok:

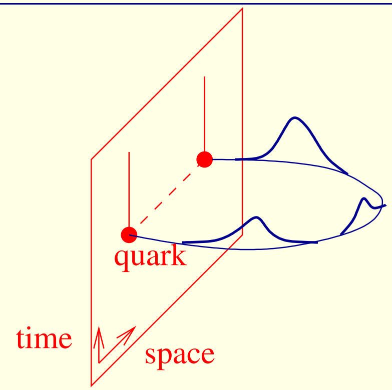
$$\langle \mathcal{P}e^{\oint_C A_\mu dx^\mu + \vec{\Phi}\vec{n}|\dot{x}|ds}\rangle \propto e^{-\frac{T}{L}V_{q\bar{q}}(\lambda,\theta)}$$

erős csatolás

$$V(r)=-\frac{4\pi^2\sqrt{2\lambda}}{\Gamma(\frac{1}{4})^4}\frac{1}{L}(1-\frac{1.3359}{\sqrt{\lambda}}+\ldots)$$

minimális AdS felület+fluktuációk

Peremes integrálható rendszer



$$E_0(L)=\int\frac{d\tilde{k}}{2\pi}\log(1-R_-(\tilde{k})R_+(-\tilde{k})e^{-\tilde{\epsilon}(\tilde{k})})$$

2 hurok [Bajnok et. al 13]

Konklúzió: AdS=CFT

Melyik a fizikai legszebb egyenlete?

Leonhard Euler (1707-1783)

$e^{i\cdot\pi} + 1 = 0$

$i, \pi, e, 1, 0$ and $+, \cdot, \hat{}$

James Clerk Maxwell (1831-1879)

$d \star F = j \quad ; \quad dF = 0$

egyesítés: elektromágnesség

Juan Martín Maldacena (1968-)

$AdS = CFT$

egyesítés: erők+ kvantumelmélet

J. Maldacena, Adv.Theor.Math.Phys. 2 (1998) 231-252: mára több mint 9300 hivatkozás