Szeged, Elméleti Fizikai Tanszék,

2015. február 12.

A mérték/gravitáció (AdS/CFT) dualitás

Z. Bajnok

Wigner Fizikai Kutatóközpont,

MTA-Lendület Holografikus Kvantumtérelmélet Kutatócsoport

Szeged, Elméleti Fizikai Tanszék,

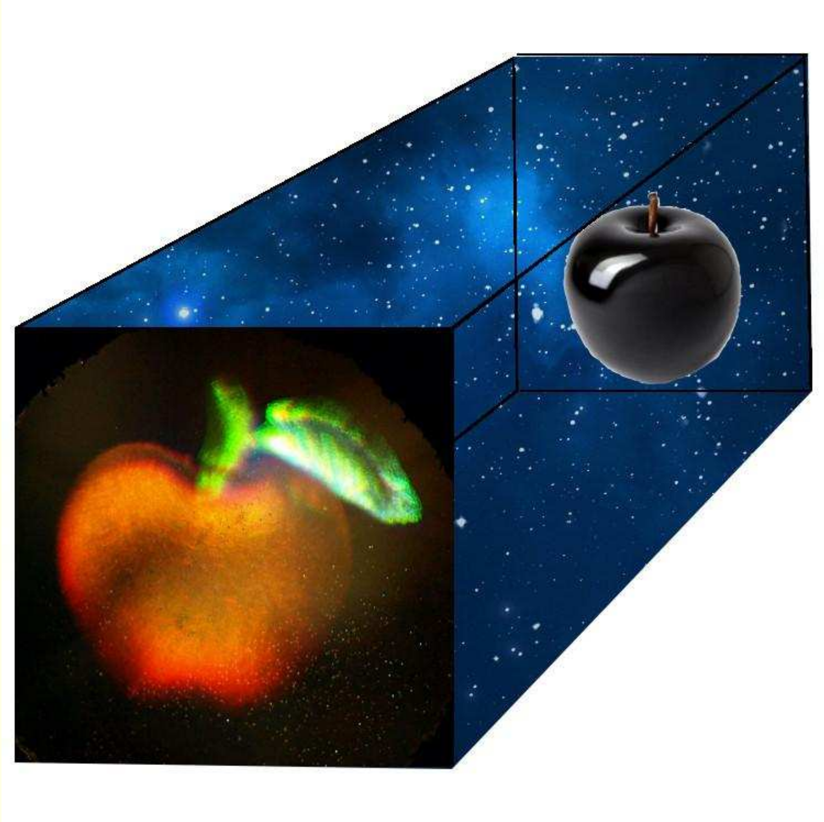
2015. február 12.

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 10000 hivatkozás

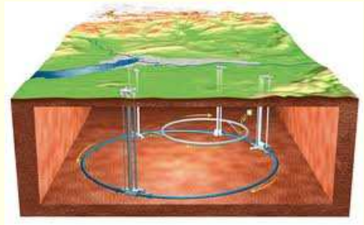
Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?

Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?

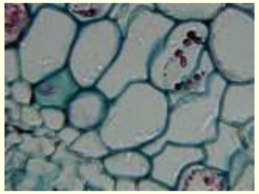
mikroszkóp

elektronmikroszkóp

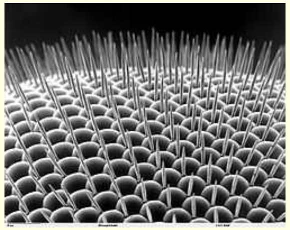
szinkrotron



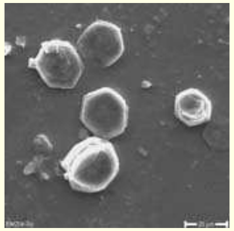
LHC



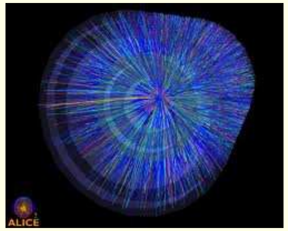
mikrométer



nanométer



sok atom



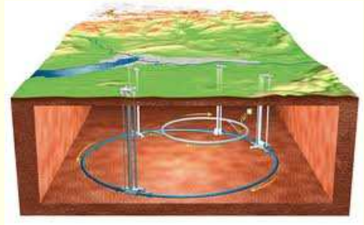
kvarkok,leptonok

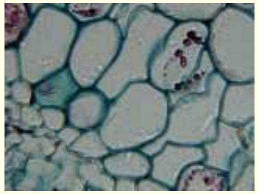
Miből áll a világ és hogyan hat kölcsön?


mikroszkóp

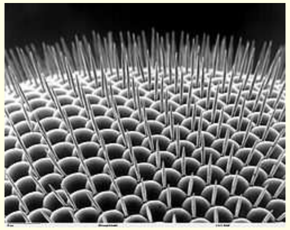

elektronmikroszkóp

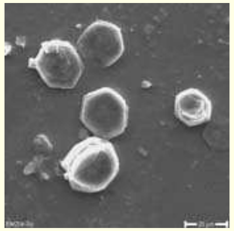

szinkrotron

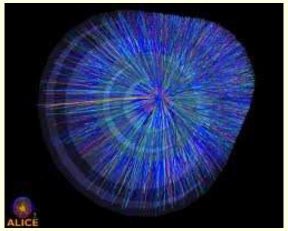

LHC


mikrométer

periódusos rendszer

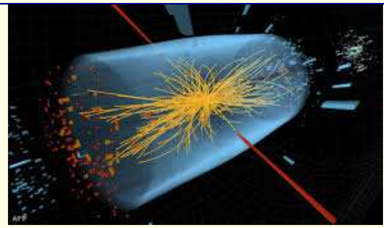

nanométer


sok atom

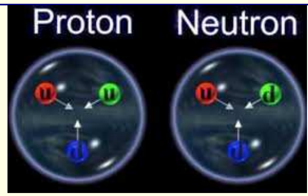


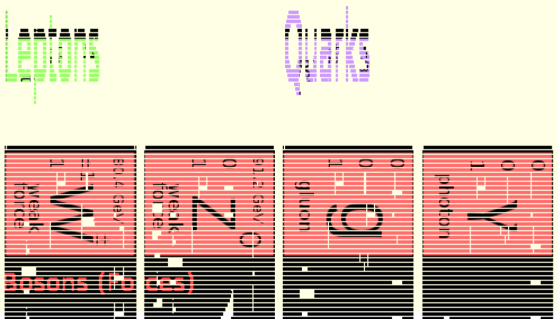
kvarkok,leptonok

Higgs



anyag





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

Kvantumelektrodinamika

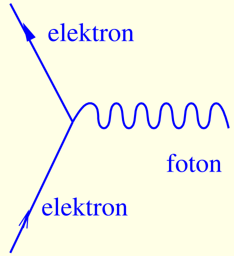
Feynman: *If you want to learn about nature, to appreciate nature, it is necessary to understand the language that she speaks in.*

Kvantumos mértékelmélet

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

+Kvantumelmélet→kvantumelektrodinamika

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



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

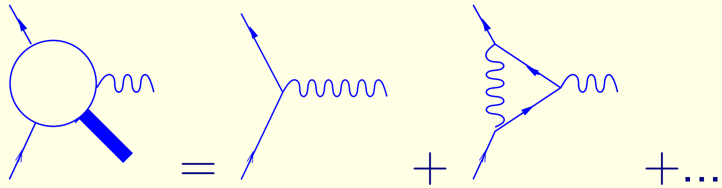
kísérleti eredmény: $\underline{\mu} = g\frac{e\hbar}{2mc}\underline{s}$ ahol $g = 2(1+a)$

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

perturbáció számítás:

Feynman gráfok

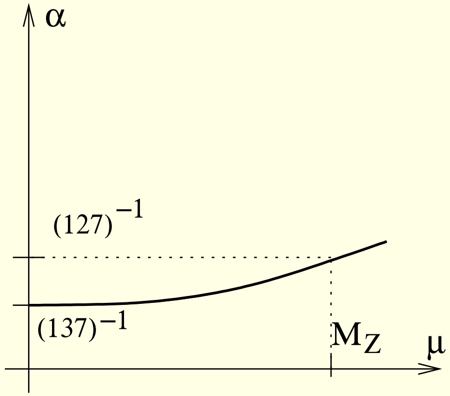
$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{e^2}{2\pi\hbar c} = 0.001161$



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

impulzusfüggő csatolás:

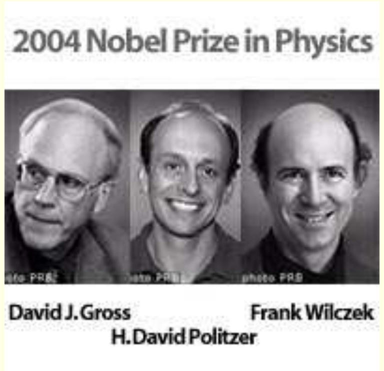
$\beta(\alpha) = \mu\frac{\partial\alpha}{\partial\mu} > 0$



Kvantumszíndinamika

Kvantum-mértékelmélet

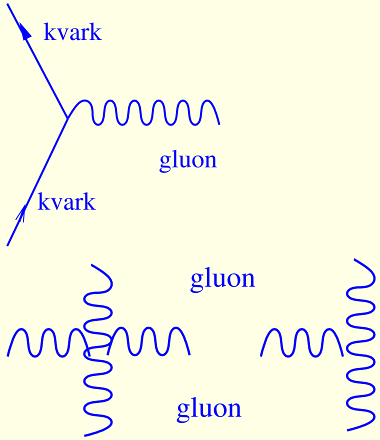
aszimptotikus szabadság



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

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

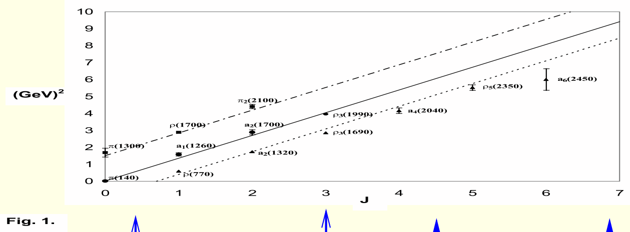
$SU(3)$ mértékelmélet: $G_\mu \rightarrow g^{-1} G_\mu g + g^{-1}\partial_\mu g$



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

kísérleti eredmény:

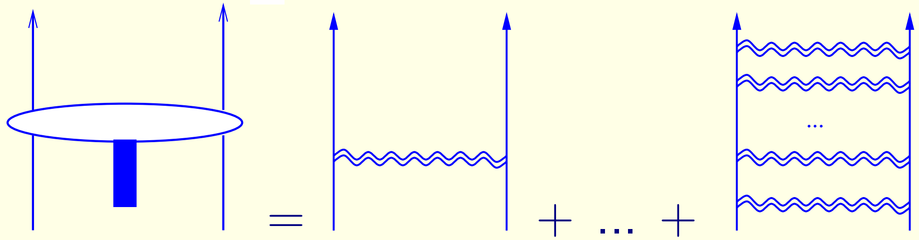
hadron spektrum



perturbáció számítás:

Feynman gráfok

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

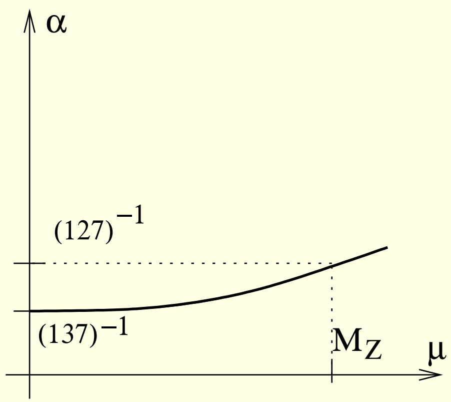


impulzusfüggő csatolás:

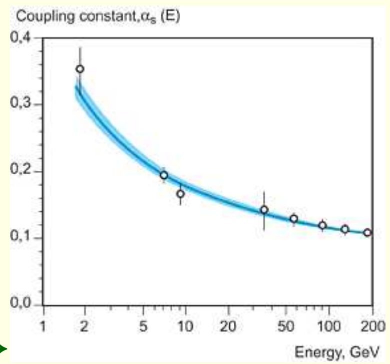
$\beta(\alpha_s) = \mu \frac{\partial \alpha_s}{\partial \mu} < 0$

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:

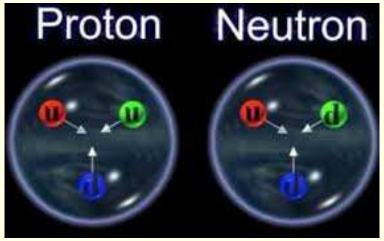
The simplicities of natural laws arise through the complexities of the language we use for their expression.

Alacsony energia: nemperturbatív fizika

bezárás

hadronspektrum,

nehézion ütközés



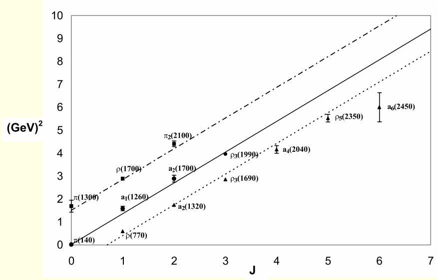
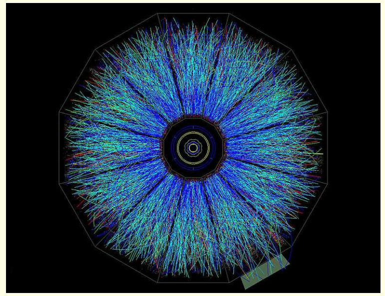
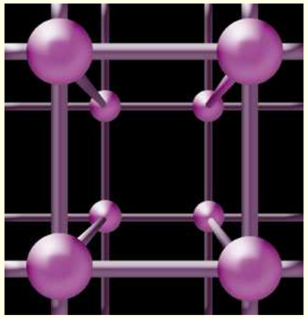


Fig. 1.



Rácsmértékelmélet: világ 32^4

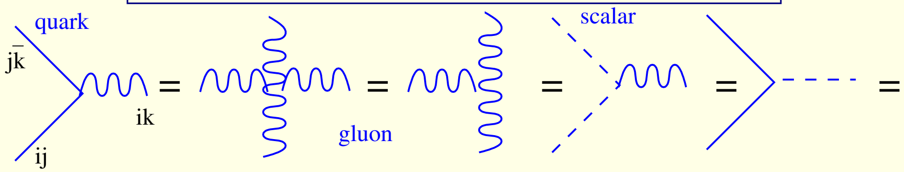


protontömeg $\surd$nehézionütközés?

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

egyszerűsített modell

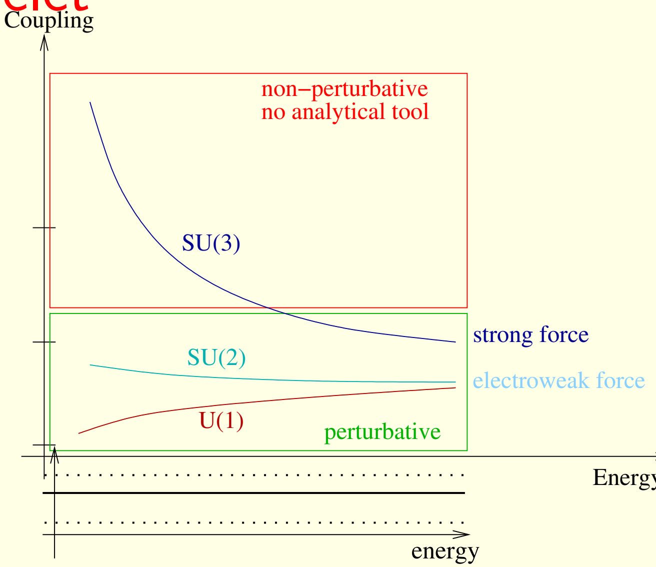
$$\boxed{\mathcal{N} = 4 \text{ D=4 } SU(N) \text{ SYM}}$$



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

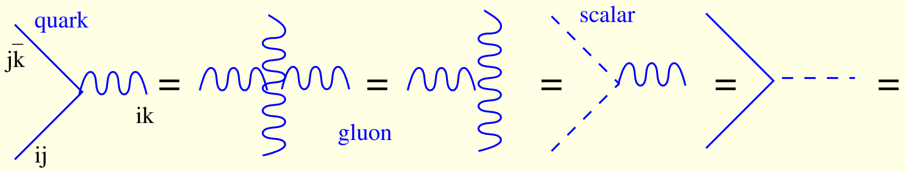
$$V(\Phi, \Psi) = \frac{1}{4}[\Phi, \Phi]^2 + \overline{\Psi}[\Phi, \Psi]$$

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)

$$\begin{array}{ccccc} Q_{1,2,3,4} & & \Psi^{ij}_{1,2,3,4} & & Q_{1,2,3,4} \\ & \nearrow & \circlearrowleft & \searrow & \\ A^{ij}_\mu & & su(4)=so(6) & \circlearrowleft & \Phi^{ij}_{1,2,3,4,5,6} \\ & \searrow & \circlearrowleft & \nearrow & \\ Q^\dagger_{1,2,3,4} & & \overline{\Psi}^{ij}_{1,2,3,4} & & Q^\dagger_{1,2,3,4} \end{array}$$

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

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

$\beta=0$ →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 $psu(2,2|4)$

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

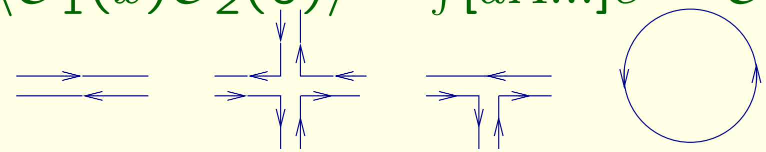
CFT: Fizikai mennyiségek

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

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

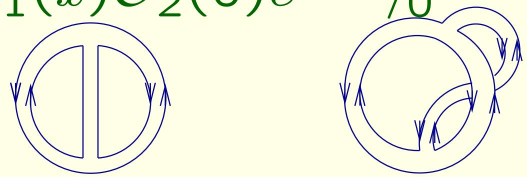
korrelátorok: $\langle \mathcal{O}_1(x) \mathcal{O}_2(0) \rangle = \int [dA...] e^{-i\mathcal{S}} \mathcal{O}_1(x) \mathcal{O}_2(0) = \langle \mathcal{O}_1(x) \mathcal{O}_2(0) e^{-iV} \rangle_0$

perturbatíven:



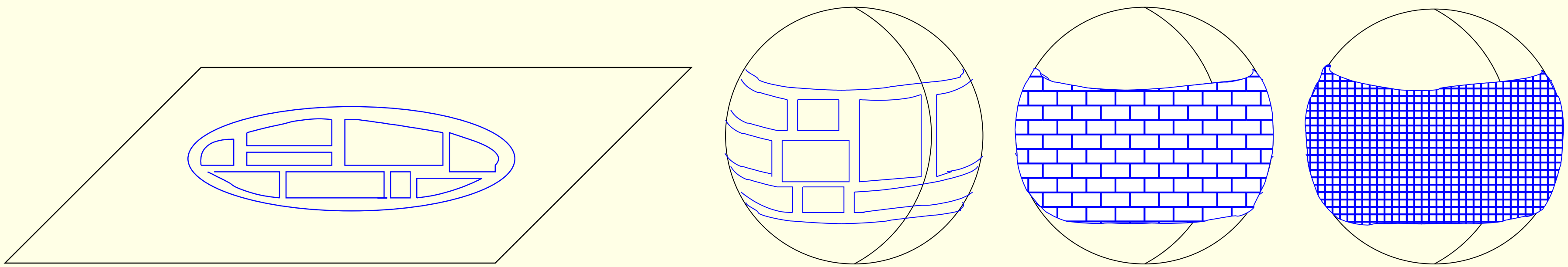
g^2_{YM} $\quad g^{-2}_{YM}$ $\quad g^{-2}_{YM}$ $\quad N$

génusz kifejtés

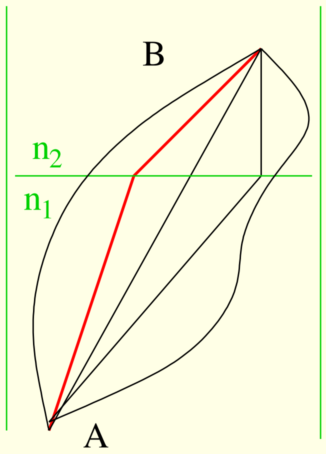
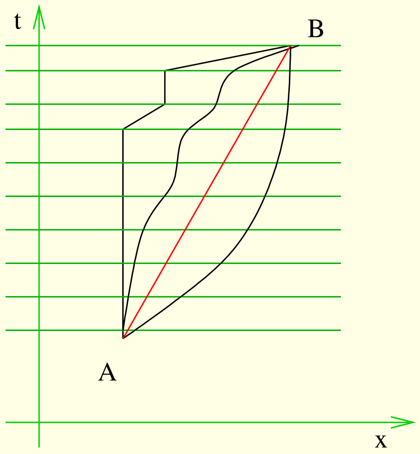
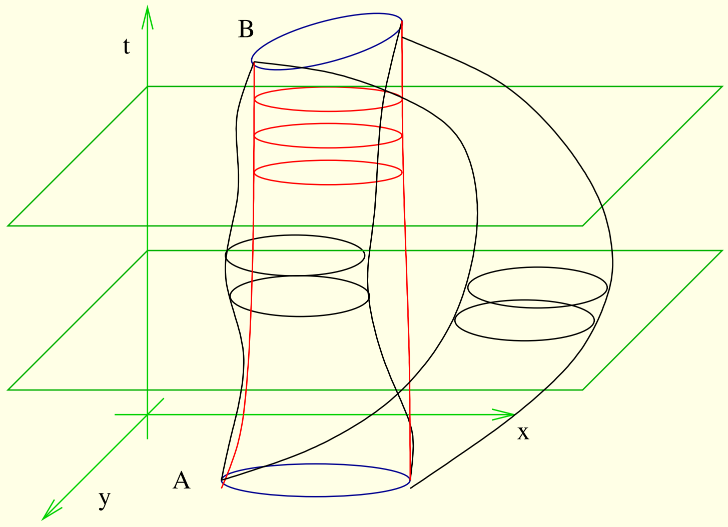


$g^2_{YM} N^3 = N^2 \lambda \qquad \lambda = g^2_{YM} N$

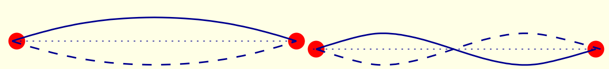
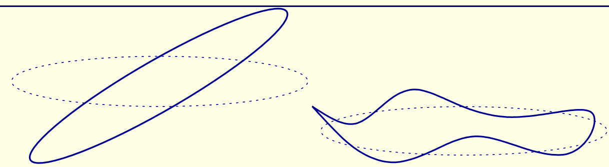
partíciós függv. $Z(\lambda, \frac{1}{N}) = N^2 \sum_g (\frac{1}{N})^{2g} \sum_n \alpha(g, n) \lambda^n$ húrelmélet? (t' Hooft)



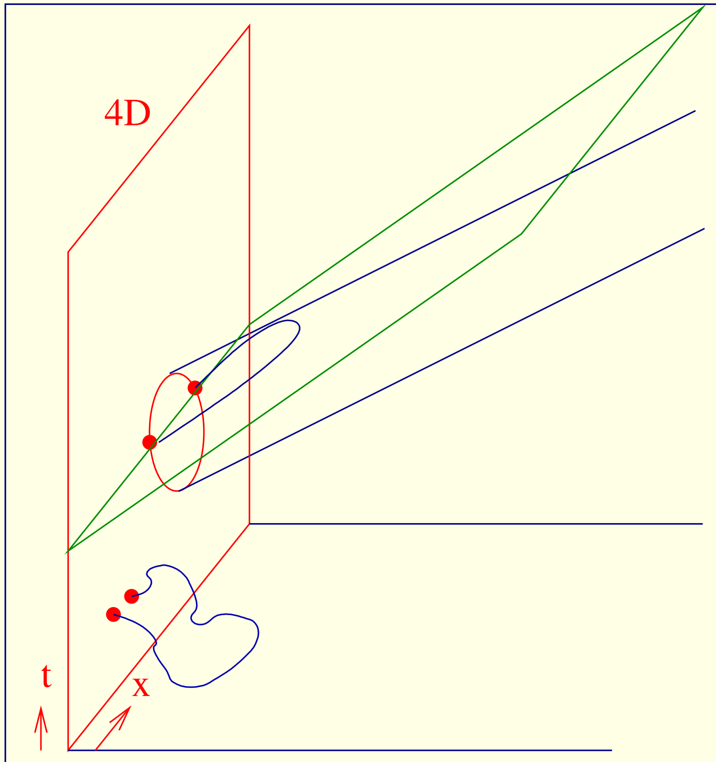
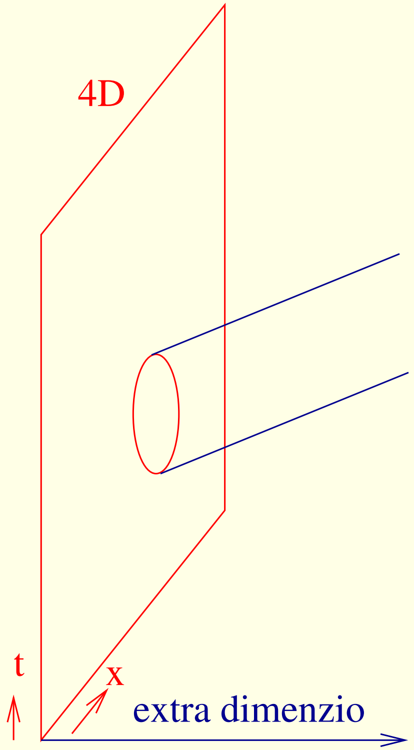
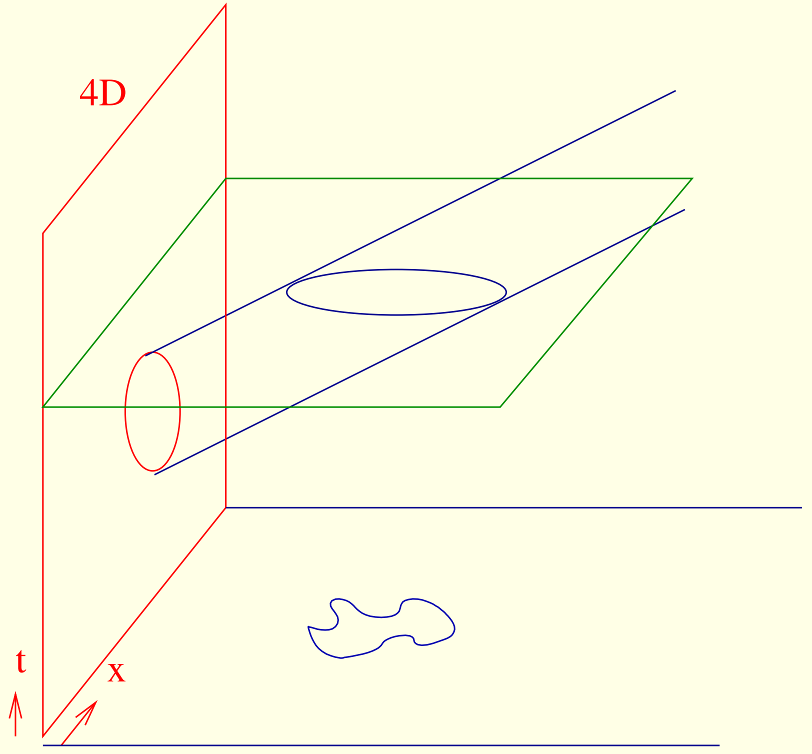
Húrok klasszikus dinamikája

fény	pontrészecske	húr
Fermat elv	téridő (x, t)	téridő (x, y, t)
		
idő minimális	téridő út minimális	téridő felület minimális

Kvantum húrok spektruma

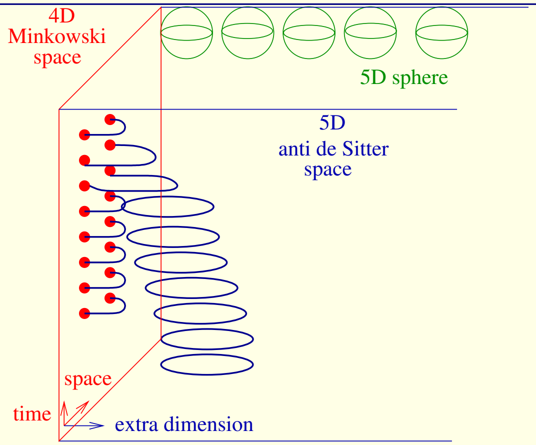
nyílt húr		zárt húr
		
foton, mértékbozon, elektron, kvarkok+...		graviton+...
mértékelmélet anyaggal		gravitáció

Mérték/gravitáció dualitás

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

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

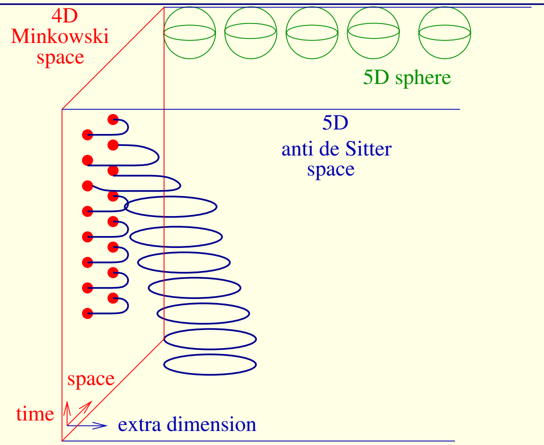
$$psu(2,2|4) \supset su(2,2) \otimes su(4)$$

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

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

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

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

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

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

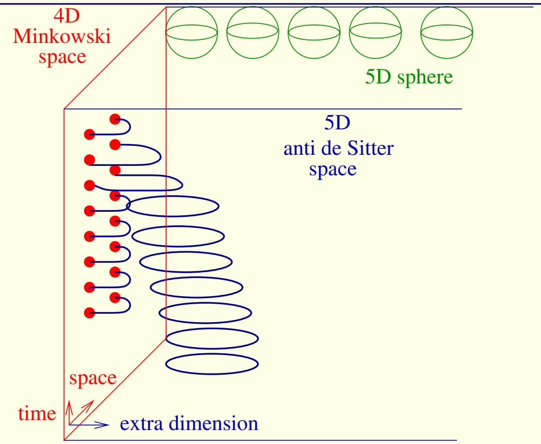
$$\langle \mathcal{O}_n(x)\mathcal{O}_m(0)\rangle = \frac{\delta_{nm}}{|x|^{2\Delta_n(\lambda)}}$$

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

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

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

$\beta = 0$ szuperkonform

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

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

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

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 $\Delta(\lambda)$

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

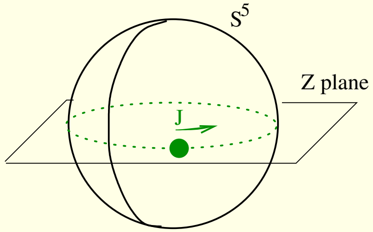
2D integrálható QFT

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

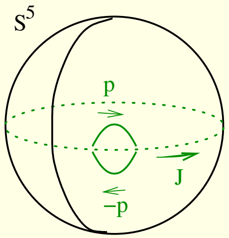
Egzakt szórásmátrix: $S_{Q_1 Q_2}(p_1, p_2, \lambda)$

AdS/CFT: energiák és skáladimenziók

BPS húr konfiguráció:BMN



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



klasszikus energia+hurok korrekciók

$\leftrightarrow$

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

szuperszimmetrikus (BPS) operátor

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

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

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

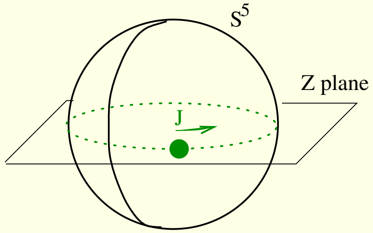
$$\Delta_{BPS} = J$$

nem szuperszimmetrikus: Konishi

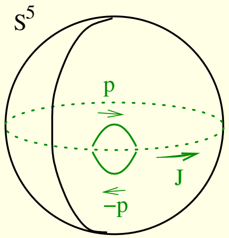
$$\mathcal{O}_K = \mathrm{Tr}(ZYZY + \ldots) \leftrightarrow |\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\rangle + .$$

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

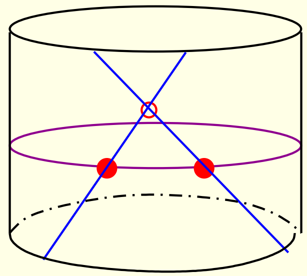
Konishi: kétrészecske állapot

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

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

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

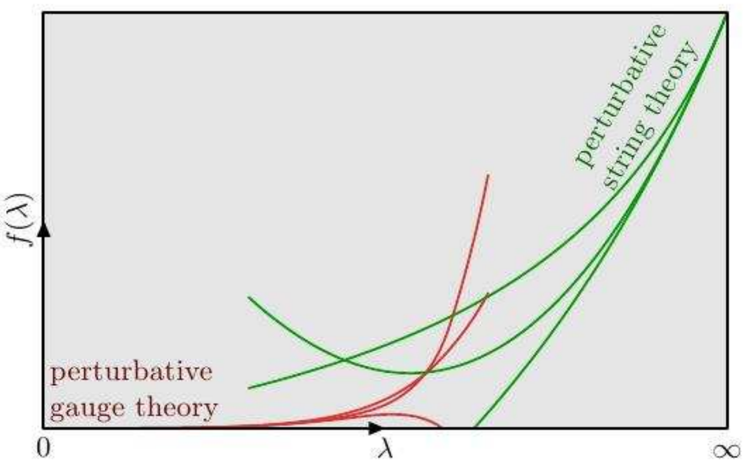
$$E_{FSC} = \sum_Q \int \frac{dq}{2\pi} S_{Q1}(q,p) S_{Q1}(q,-p) e^{-\epsilon_Q L} + \ldots = E_{TBA}$$

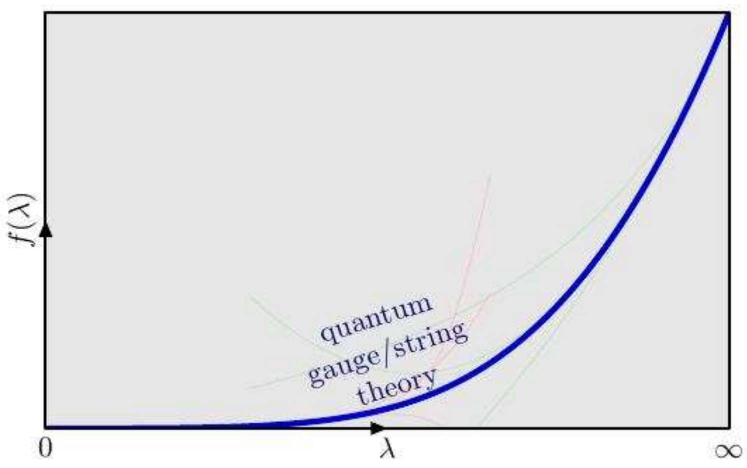


AdS/CFT spektrális probléma

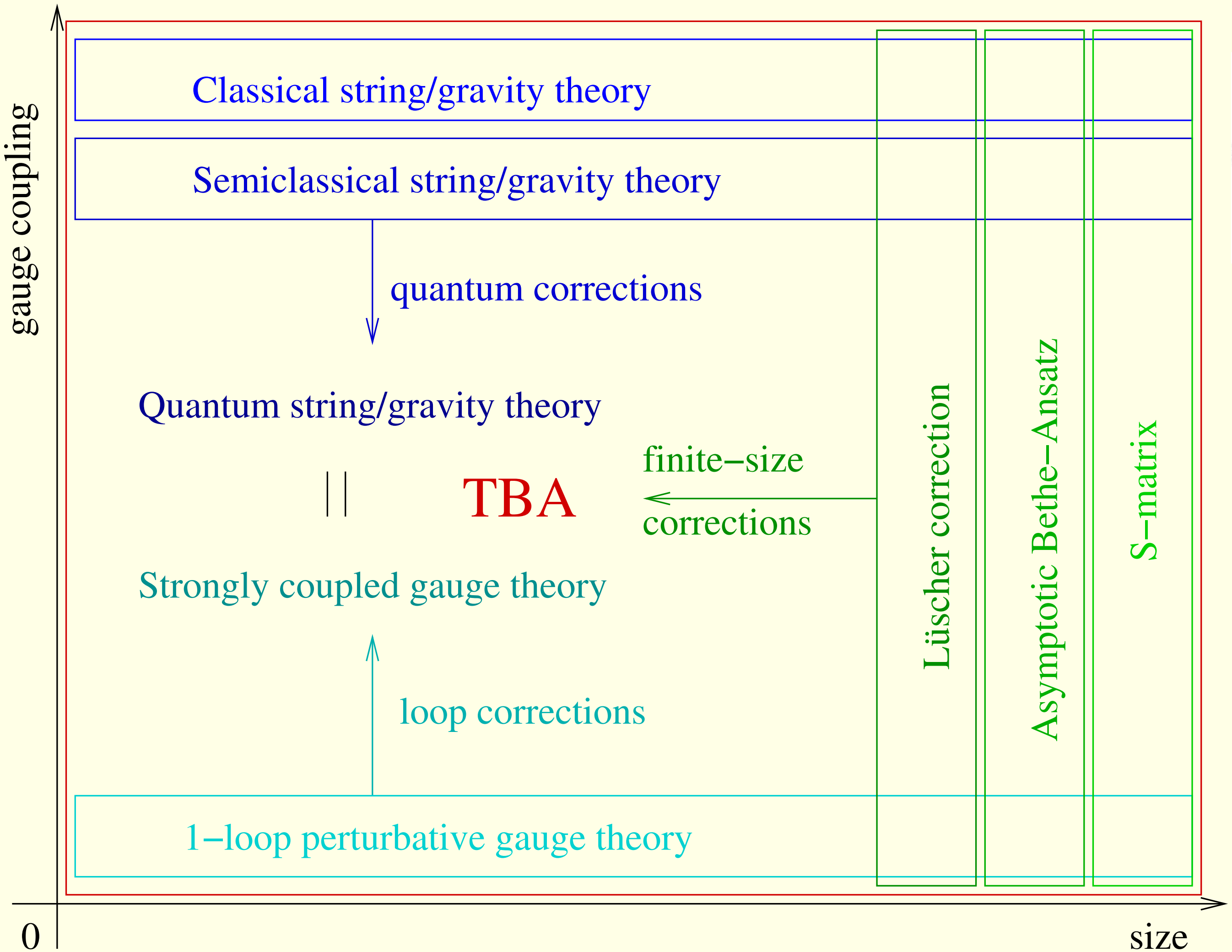
AdS/CFT spektrális probléma

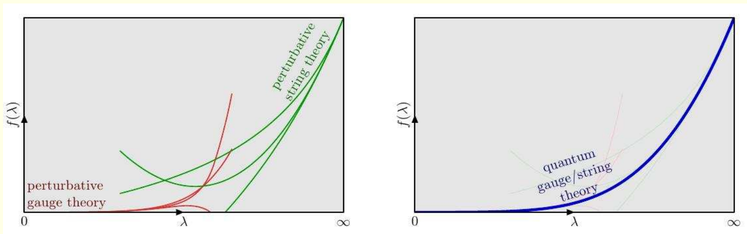
Konishi skáladimenzió: Tr$(ZXZX - ZZXX)$



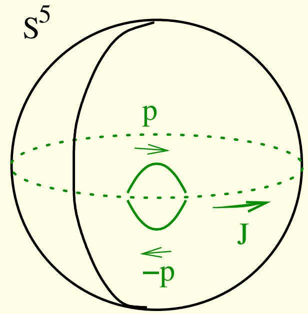


AdS/CFT spektrális probléma





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

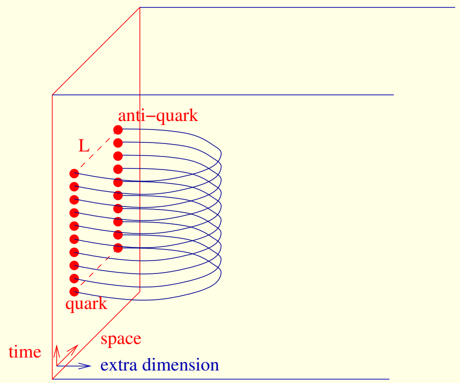
Konishi op. $\mathcal{O}_K = \mathrm{Tr}(\Phi_i^2)$

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

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 $\lambda \to \infty$

$\equiv$

kvark-antikvark potenciál

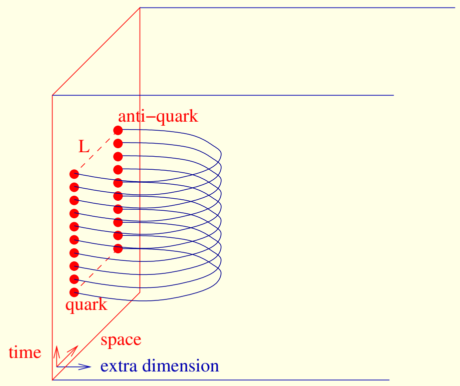
Wilson hurok: $\langle \oint_C A_\mu dx^\mu \rangle$

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 $\lambda \to \infty$

$\equiv$

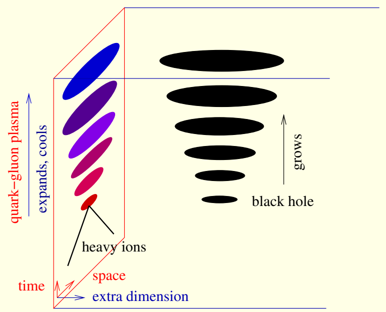
$\boxed{\text{kvark-antikvark potenciál}}$

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

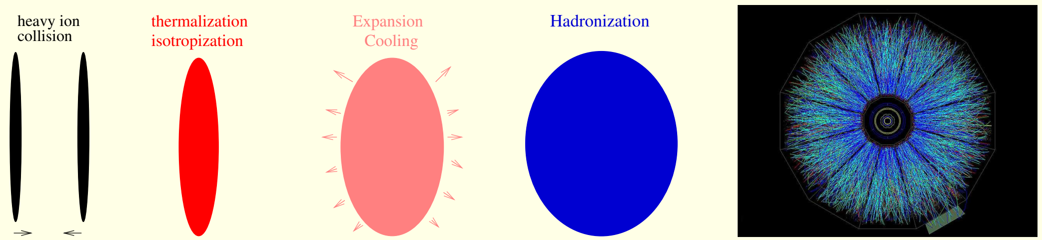
$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R - 6g_{ab} = 0$$

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

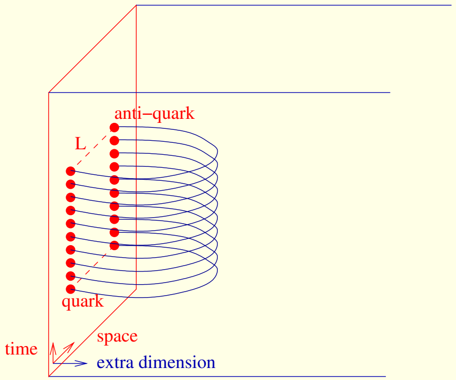
$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$ és $T_\mu^\mu = 0$

viszkózus kvark-gluon plazma

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

AdS/CFT: $q - \bar{q}$ potenciál

kvark-antikvark potenciál



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

$\equiv$

Wilson hurok:

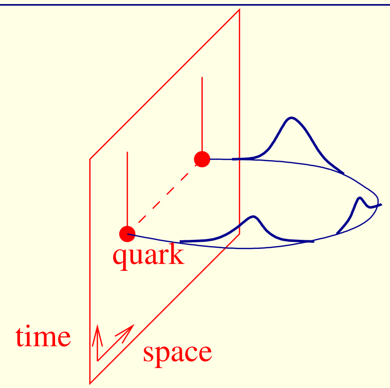
$$\langle \mathcal{P} e^{\oint_C A_\mu dx^\mu + \vec{\Phi}\vec{n}|\dot{x}|ds} \rangle \propto e^{-\frac{T}{L} V_{q\bar{q}}(\lambda,\theta)}$$

erős csatolás

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

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]

Konkluzió: 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