

(Fundamentalna) Fizika Elementarnih Čestica

Dan 10: Superstringovi i kosmologija

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

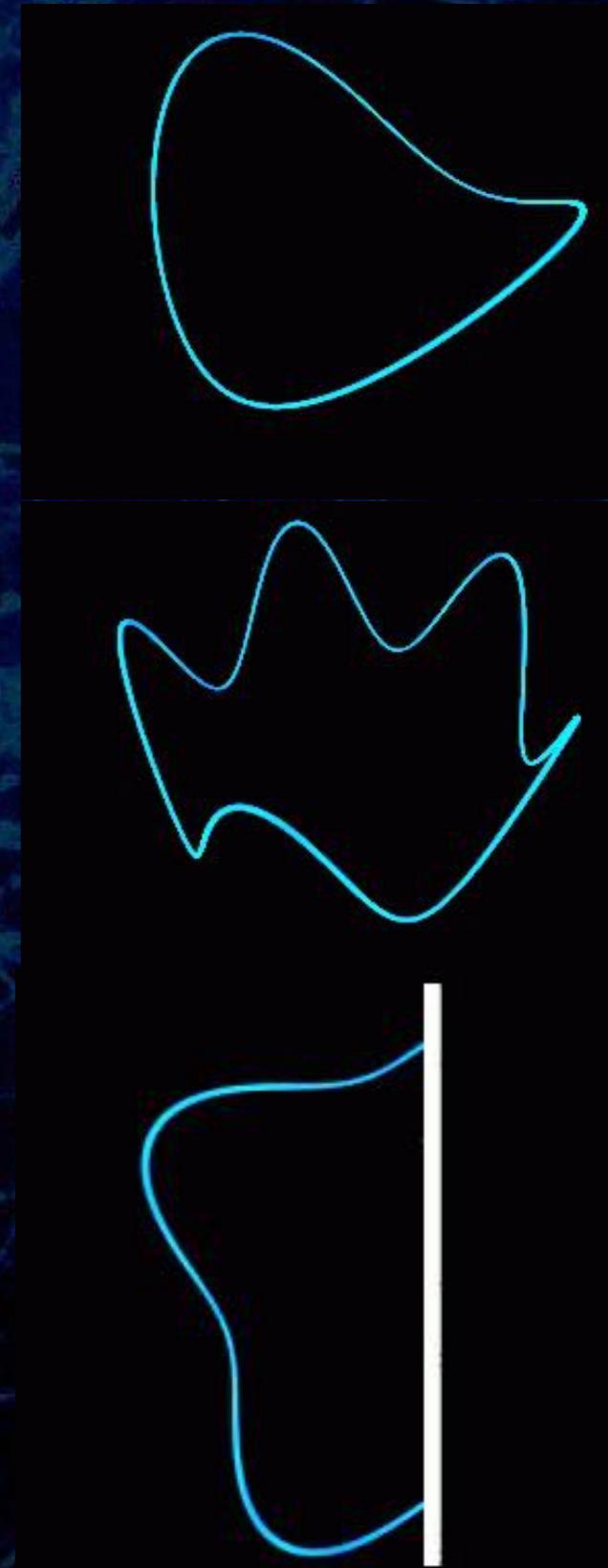
Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>

Superstringovi i kosmologija

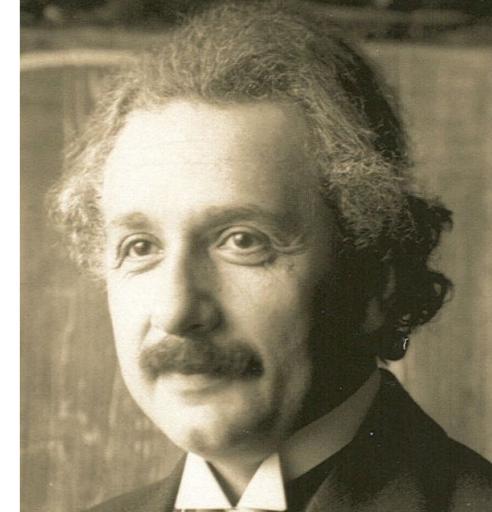
Program za danas:

- Fundamentalni paradoks XX veka
 - Zašto je kvantna gravitacija tako teška?
- Stringovi
 - Prva (naiwna?) predodžba
 - => Sigma-modeli
- Superstringovi
 - Integracija po istorijama à la Feynman & Hibbs
 - Ujedinjenje svih mogućih Svetova
- Novi “Svetonazor” ... i šire



Superstringovi

Fundamentalni paradoks XX veka

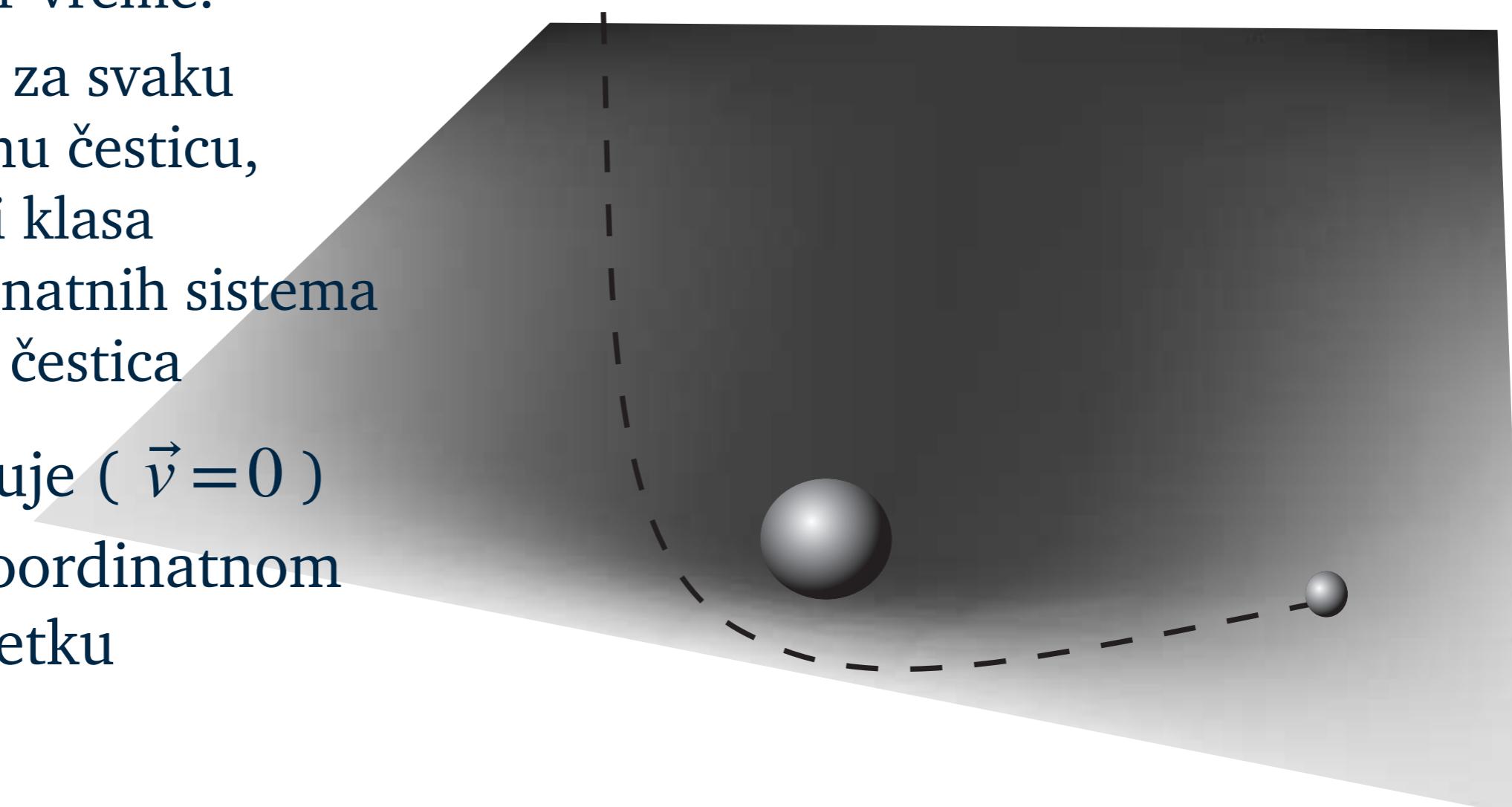


- Einstein-ove jednačine
...znače da prisustvo materije zakriviljuje prostor-vreme.

Stoga, za svaku masivnu česticu, postoji klasa koordinatnih sistema gde ta čestica

- miruje ($\vec{v} = 0$)
u koordinatnom početku

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$



Superstringovi

Fundamentalni paradoks XX veka

- Heisenberg-ove relacije neodredjenosti



*I pozicija i impuls
(tj. talasna dužina) se ne mogu
simultano odrediti savršeno
precizno!*

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

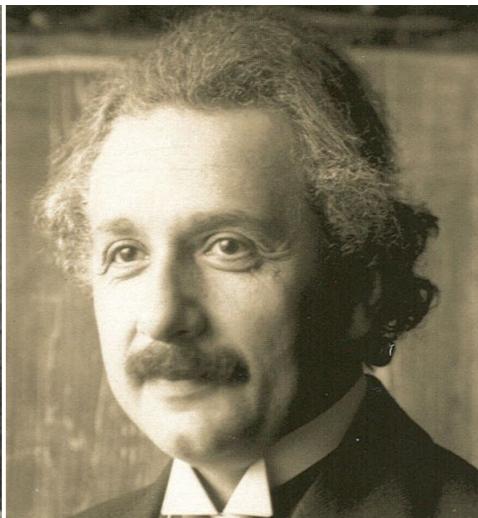
Kanonički
konjugovane
veličine

Univerzalna
Planck-ova
konstanta



Superstringovi

Fundamentalni paradoks XX veka



- Gravitacija

- Prisustvo materije zakriviljuje prostor;
- U takvom prostoru se zna gde je k. početak;
- Ni k. početak (ni čestica) se ne pomeraju

- Kvantna fizika

- Heisenberg-ove relacije neodredjenosti važe;
- I mesto i brzina kretanja bilo kojeg objekta...
...se ne može znati savršeno precizno!

Protivurečnost?!

A vrlo dobro znamo da Priroda jeste i kvantna, i da ima gravitaciju!
i da je jedna jedina.

Superstringovi

Hmm...

Digresija

- U klasičnoj mehanici — *Haos*
 - Opšti problem **3** tela nije rešiv
- U Kvantnoj mehanici — *Potencijali*
 - Opršti problem **2** tela nije rešiv
- U klasičnoj teoriji polja — *Povratna sprega*
 - Opršti problem **1** tela nije rešiv
- U kvantnoj teoriji polja — *Fluktuacije vakuma*
 - Opršti problem **0** tela nije rešiv

Superstringovi

Hmm... II

- Zaključak:
 - **Tačkaste** čestice su krive za sve.
 - I, onda?
 - Pa, valja nam koristiti **stringove** umesto tačkastih čestica.
 - (Džinovski korak unapred!)
- *Prva najjednostavija opcija,
posle tačkaste čestice*



Digresija



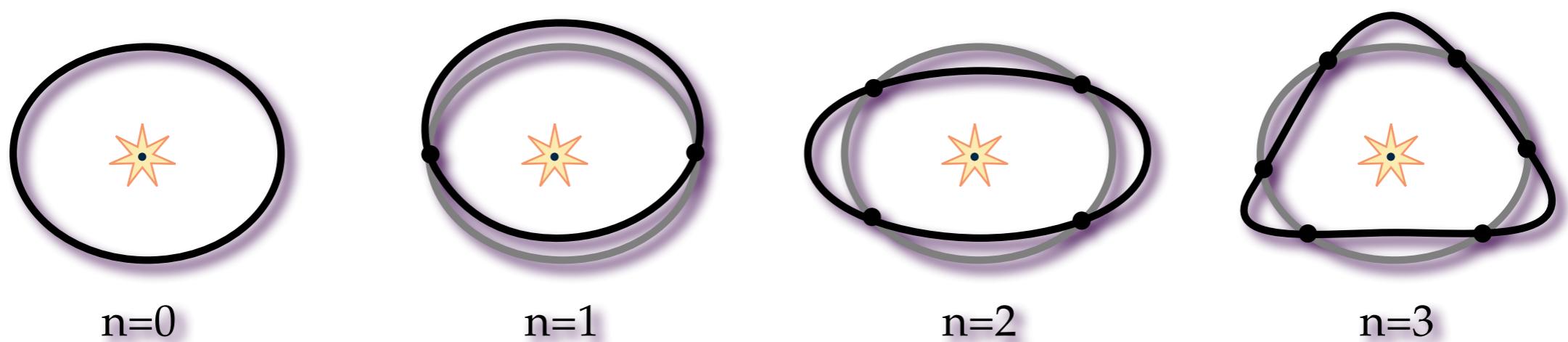
Don't Panic !

Don't Panic !

Superstringovi

Razrešenje paradoksa

- U teoriji stringova (fundamentalnih struna, niti,...),
- ...stringovi osciluju:

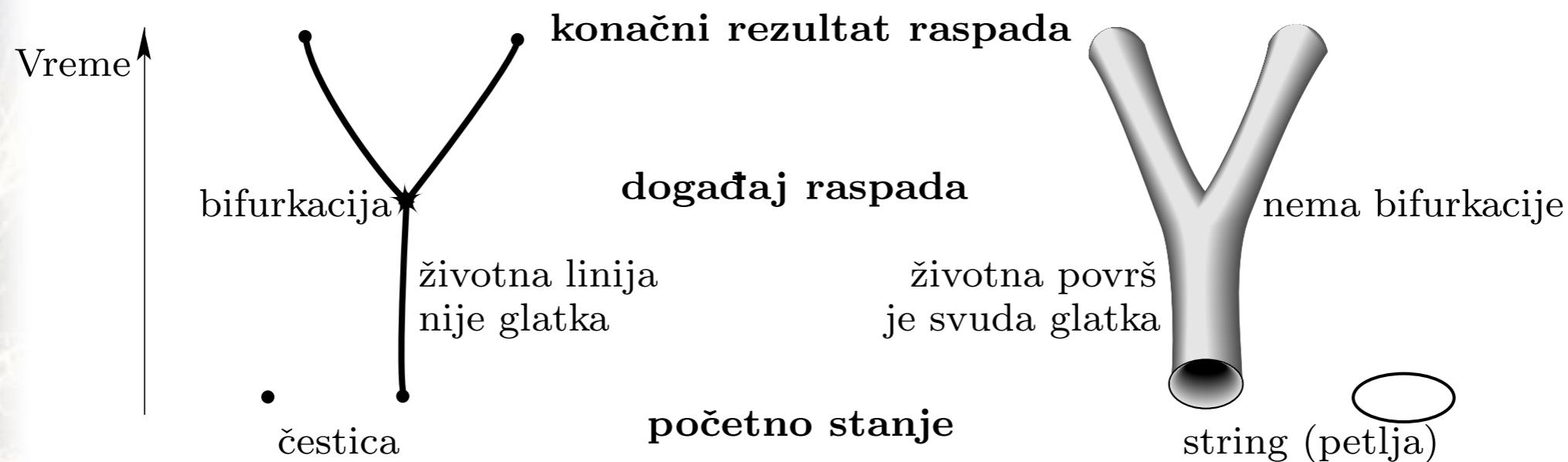


- Koordinatni početak, za koje se zna savršeno tačno gde je i kako se (ne) kreće—označava mesto **centra mase**.
- Oscilacioni modovi koje interpretiramo kao čestice nisu u koordinatnom početku, a Heisenberg-ov princip za njih važi.

Superstringovi

Čestice ➔ stringovi

- U teoriji stringova (fundamentalnih struna, niti)
- Kvantna kompleksnost fizičkih procesa i parametara se pojednostavljuje.



Superstringovi

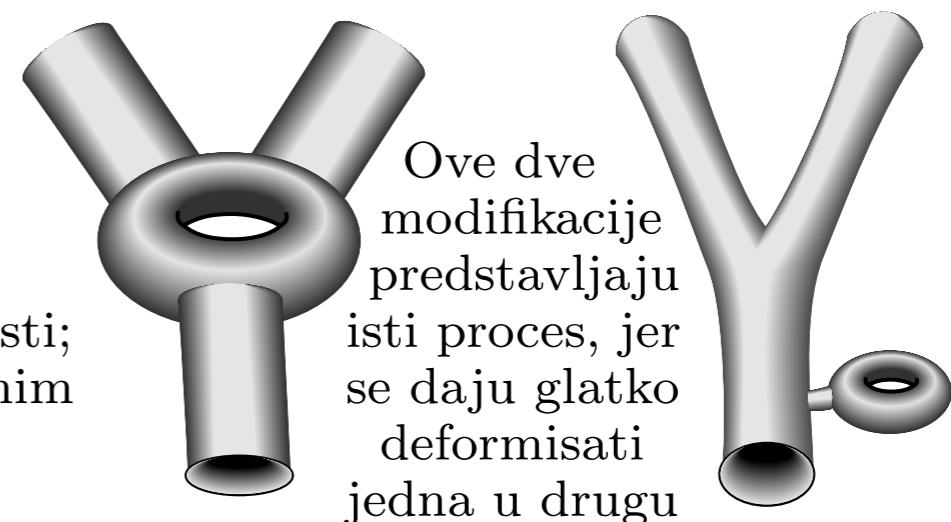
Čestice ➔ stringovi

- U teoriji stringova (fundamentalnih struna, niti)
- Kvantna kompleksnost fizičkih procesa i parametara se pojednostavljuje.



Ove dve modifikacije su sasvim različite

Prolaz virtuelne čestice (stringa) malom petljom je dozvoljen Heisenberg-ovim principom neodređenosti; ona interaguje sa ulaznim i izlaznim stanjima



Ove dve modifikacije predstavljaju isti proces, jer se daju glatko deformisati jedna u drugu

Time se zaobilazi potreba za “renormalizacijom”, i za superstring teorije se veruje da su konačne.

Superstringovi

Kvantni sigma-model

• Svaki “sigma-model” sadrži:

- Domenski prostor: X
- Kodomenski (target) prostor: T
- Preslikavanje: $\phi : X \rightarrow T$
- Funkcional Hamiltonovog dejstva, $S[\phi; X, T]$,
koje daje dinamiku preslikavanju ϕ , ograničava

• $S[\phi; X, T]$ zavisi of geometrijskih svojstava X i T .

• Particioni funkcional

$$Z[\vartheta] := \int D[\phi] e^{i(S[\phi; X, T] + \int \vartheta \cdot \phi)/\hbar}$$

• Corelatori u n -tačke = n -ti momenti $Z[\vartheta]$:

$$G(x_1, \dots, x_n) := \frac{\partial}{\partial \vartheta(x_1)} \cdots \frac{\partial}{\partial \vartheta(x_n)} Z[\vartheta]$$

Klasična fizika
= optimizacija

Kvantna fizika
= optimizacija

Superstringovi

Kvantni sigma-model

- Klasična mehanika čestica
- **Domen:** \mathbb{R}^1 , za (sopstveno) vreme, τ
- **Kodomen:** \mathbb{R}^3 , za “prostor”
- **Preslikavanje:** trajektorija čestice = Slika($\phi : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$)
- **Funkcional:** Hamilton-ovo dejstvo, $\int d\tau \{ L = (\vec{p} \cdot \dot{\vec{r}} - H) \}$
- Parametrizacija \mathbb{R}^1 (vreme)
- Metrika u \mathbb{R}^3 (izbor generalisanih koordinata)
- Izabrana dinamika (dejstvo)

Superstringovi

Kvantni sigma-model

• Klasična mehanika čestice — kao teorija polja

• **Domen:** \mathbb{R}^1 , za (sopstveno) vreme

• **Preslikavanje:** $\vec{r}(\tau) : \mathbb{R}_{\tau}^1 \rightarrow \mathbb{R}_{\vec{r}}^3$

• **Funkcional:** $S[\vec{r}, \tau; g_{ij}] := \int d\tau \|\vec{r}\|_g^2$

• Izbor τ (parametrizacije svetske linije)

• Izbor $\|\vec{r}\|_g^2 := r^i g_{ij} r^j$ (skalarnog proizvoda)

• **Kodomen:** prostor (dozvoljenih) vrednosti $\vec{r}(\tau)$.

• Razlika izmedju ovog i prethodnog vidjenja je u tome:

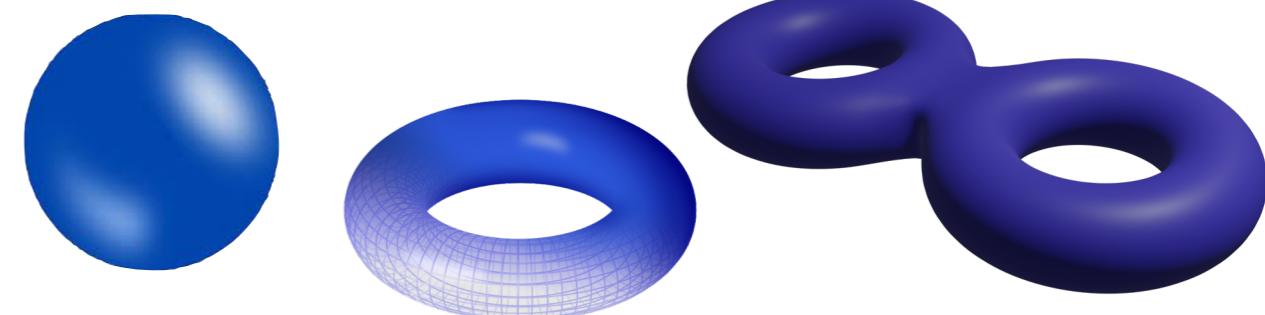
• da li je kodomen zadat izvorno, “zdravo za gotovo”

• ili kao prostor vrednosti $\vec{r}(\tau)$ koju dozvoljava/zadaje dinamika odredjena dejstvom $S[\vec{t}, \tau; g_{ij}]$



(Po prvi put u teoriji stringova!)

Superstringovi



Kvantni sigma-model

Superstringovi

(τ, σ) , umesto samo vremena, \mathbb{R}_τ^1

Domen: $\Sigma_{g,\gamma}$, svetska površ sa g “ručke” i γ_{ij} metrikom

Preslikavanje: $X^\mu(\sigma, \tau) : \Sigma_g \rightarrow \mathcal{X}_G$

Kodomen: $\mathcal{X}^{(1,d-1)}$ prostor dinamički datih vrednosti X^μ :

Funkcional: $S[X, \xi; \gamma, G] := \int d^2\xi \left\{ \gamma^{ij}(\xi) (\partial_i X^\mu) G_{\mu\nu}(X) (\partial_j X^\nu) + \dots \right\}$

Zavisi od:

topologije domena $\Sigma_{g,\gamma}$ i izbora (inverzne) metrike, $\gamma^{ij}(\xi)$ na njoj

topologije kodomena $\mathcal{X}^{(1,d-1)}$ i izbora metrike, $G_{\mu\nu}(X)$, na njemu

izbora dejstva $S[X, \xi; \gamma, G]$

supersimetrično (da bi vakum bio stabilan)

da $\mathcal{X}^{(1,d-1)} \approx \mathbb{R}^{1,3} \times Y^{d-4}$ (makar lokalno)

Superstringovi

Kvantni sigma-model

- **Domen:** $\Sigma_{g,\gamma}$, svetska (Riemann-ova) površ
- **Genus** (broj “ručki” = topologija), g , površi $\Sigma_{g,\gamma}$ ne opažamo
 - Moramo da sumiramo po njemu
- **Geometrija** (metrika) $\Sigma_{g,\gamma}$ se ne da opaziti
 - Moramo da sumiramo/integralimo po njoj
- Stoga: fizički merljive/opažljive veličine moraju da budu očekivane vrednosti usrednjene po svim mogućim $\Sigma_{g,\gamma}$
 - Deligne-Mumford “univerzalna kriva” & modularni prostor
- Superstring teorija je definisana kao suma po svim string-petljama (genusima, $g = 0, 1, 2, \dots$)

perturbativno

Superstringovi

Kvantni sigma-model

- **Dejstvo:** $S[X, \xi; \gamma, G]$
- U prvoj aproksimaciji, X^μ je “harmonijsko preslikavanje”
 - generalizuje geodezijske linije (= preslikavanje $\mathbb{R}^1 \rightarrow \mathcal{X}^{1,d-1}$)
 - simetrično u odnosu na *opšte* transformacije $(\xi = (\tau, \sigma)) \rightarrow \xi'$
 - \Rightarrow 1 + 1-dimenzionalna opšta teorija relativnosti,
na svetskoj površi koju string “ispiše” prostiranjem u vremenu
- Konformno ekvivalentna $\Sigma_{g,\gamma}$, daje istu fiziku
 - $S[X, \xi; \gamma, G]$ mora da bude čak konformno-simetrično
 - Treba i supersimetrija zbog stabilnosti vakuma
- Stoga je klasična superstring teorija *definisana* kao super-konformna teorija polja na $\Sigma_{g,\gamma}$.

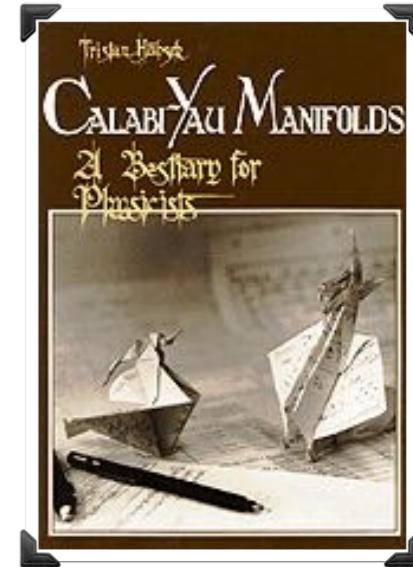
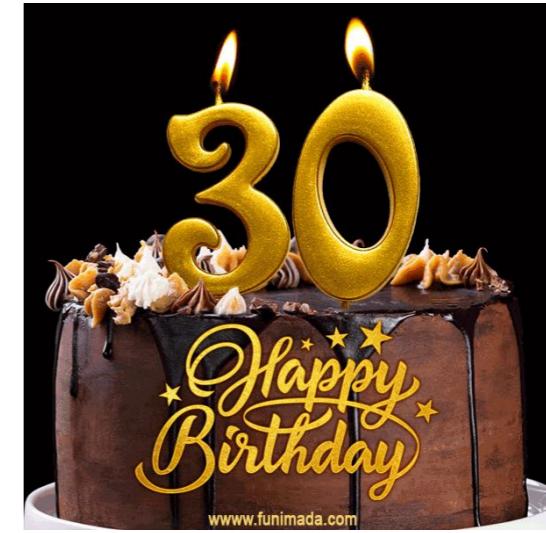
Superstringovi

Kvantni sigma-model

Tu mi živimo.

• Kodomen: $\mathcal{X}^{1,d-1}$

- Mora (nekako) sadržati $\mathbb{R}^{1,3}$, bar u prvoj aproksimaciji
 - Ili je $\mathcal{X}^{1,d-1}$ “fibracija” nad $\mathcal{X}^{1,3} \simeq \mathbb{R}^{1,3}$,
 - Extra dimenzije su kompaktne i male
 - Fibracija može da bude trivijalna $\mathcal{X}^{1,d-1} = \mathbb{R}^{1,3} \times Y^{d-4}$
 - ili netrivijalna: $\mathcal{X}^{1,d-1}$ je vektorski svežanj(...) nad $\mathcal{X}^{1,3} \simeq \mathbb{R}^{1,3}$
 - ...gde onda moraju postojati “kosmičke strune”: \Rightarrow jezgra za stvaranje galaksija!
- ili je $\mathcal{X}^{1,3} \simeq \mathbb{R}^{1,3}$ potprostor u $\mathcal{X}^{1,d-1}$: “Brane-World” slika
 - Sa lokalizovanom “pravom” materijom i interakcijama na $\mathcal{X}^{1,3} \simeq \mathbb{R}^{1,3}$,
 - Moguće je objasniti hijerarhiju energija: $M_P/M_H \sim 10^{17}$
- Tako klasična superstring teorija dozvoljava sve prethodno poznate kosmologije...
- ...plus tuštu i tma novih, pa i neočekivanih.



Calabi-Yau
kompaktifikacija

Superstringovi

Kvantni sigma-model

$$X^\mu(\sigma, \tau) : \Sigma_g \rightarrow \mathcal{X}_G$$
$$S[X, \xi; \gamma, G]$$

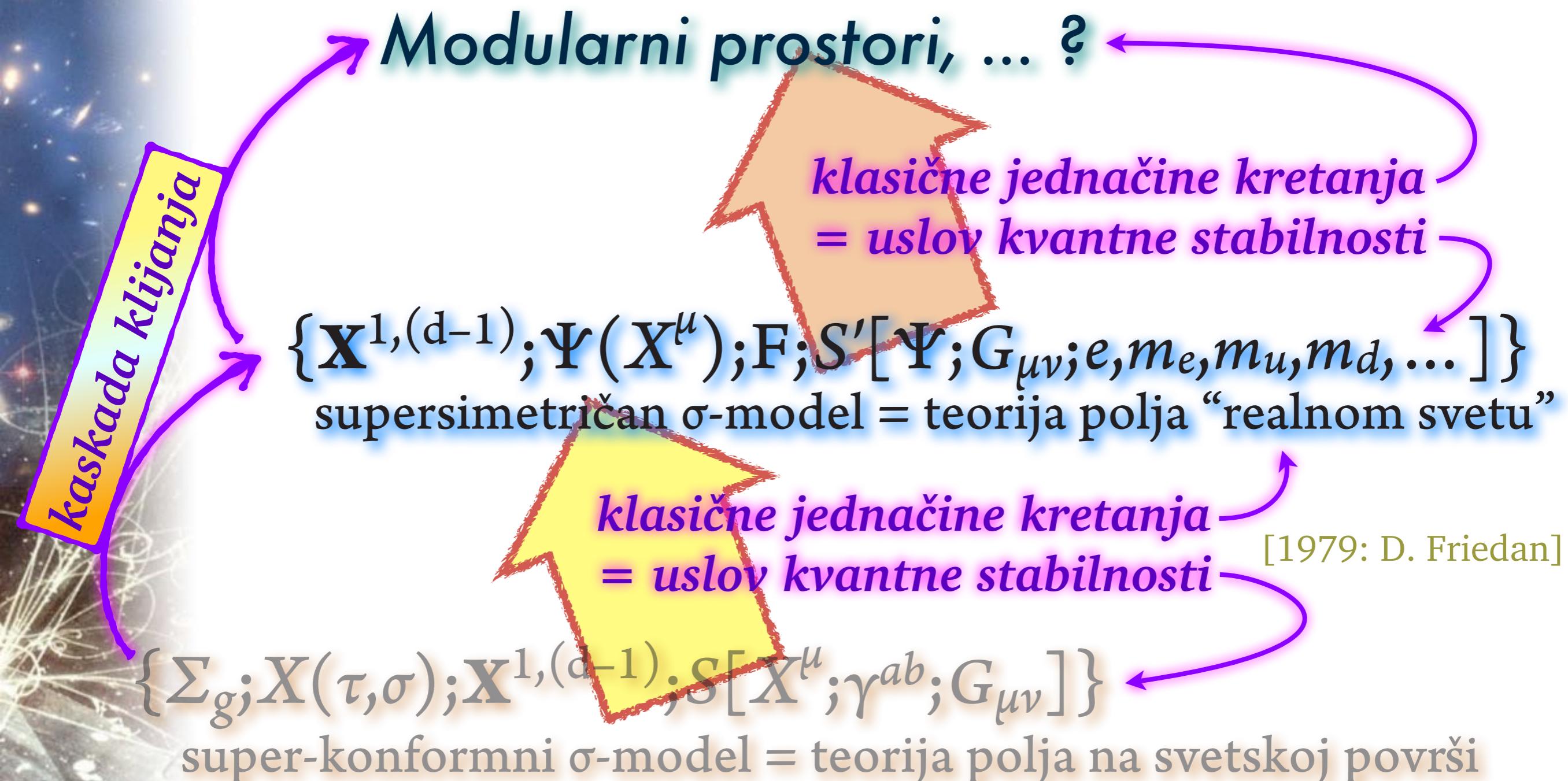
Feynman-Hibbs-ova konstrukcija

- Talasna funkcija $\Psi(\mathbf{x}) = \int D[X] e^{iS[X+\mathbf{x}, \xi; \gamma, G]} \Psi_0(\mathbf{x})$
 - zadovoljava Schrödinger-ovu jednačinu za koju se Hamiltonijan \mathfrak{H} da izvesti (iterativno) iz dejstva $S[X+\mathbf{x}, \xi; \gamma, G]$.
$$= \int dx^0 (\mathfrak{p}_m \dot{x}^m - \mathfrak{H})$$
 - Taj \mathfrak{H} definiše jedno novo dejstvo, $\mathfrak{S} := \int (\mathfrak{p}_m dx^m - \mathfrak{H} dx^0)$, a time i sledeći nivo sigma-modela, gde je:
 - $\mathcal{X}^{1,d-1}$ domenski prostor sa koordinatama x^μ
 - talasna funkcija $\Psi(x)$ je preslikavanje
 - \mathfrak{S} daje dinamički funkcional za $\Psi(x)$
 - prostor mogućih vrednosti Ψ je kodomenski prostor
 - Iterativno izvodjenje \mathfrak{H} i \mathfrak{S} definiše
 - perturbativno definisani sigma-model 2. nivoa
 - $\mathcal{X}^{1,3} \subset \mathcal{X}^{1,d-1}$ kao prostor-vreme u kome mi živimo.

???

Superstringovi

3-Slojni sigma-model



Superstringovi

Privremeni zaključak

● Pre teorije relativnosti:

● Fundamentalna fizika je opisivala čestice i polja koja se prostiru kroz prostor, dok vreme teče nezavisno.

● Specijalnom teorijom relativnosti je:

● Prostor ujedinjen sa vremenom u **prostor-vreme.**

Arena

● Opštom teorijom relativnosti:

● Prisustvo materije zakriviljuje prostor-vreme, koji onda utiče na to kako čestice i polja interaguju.

Akteri (interaktivni)

Superstringovi

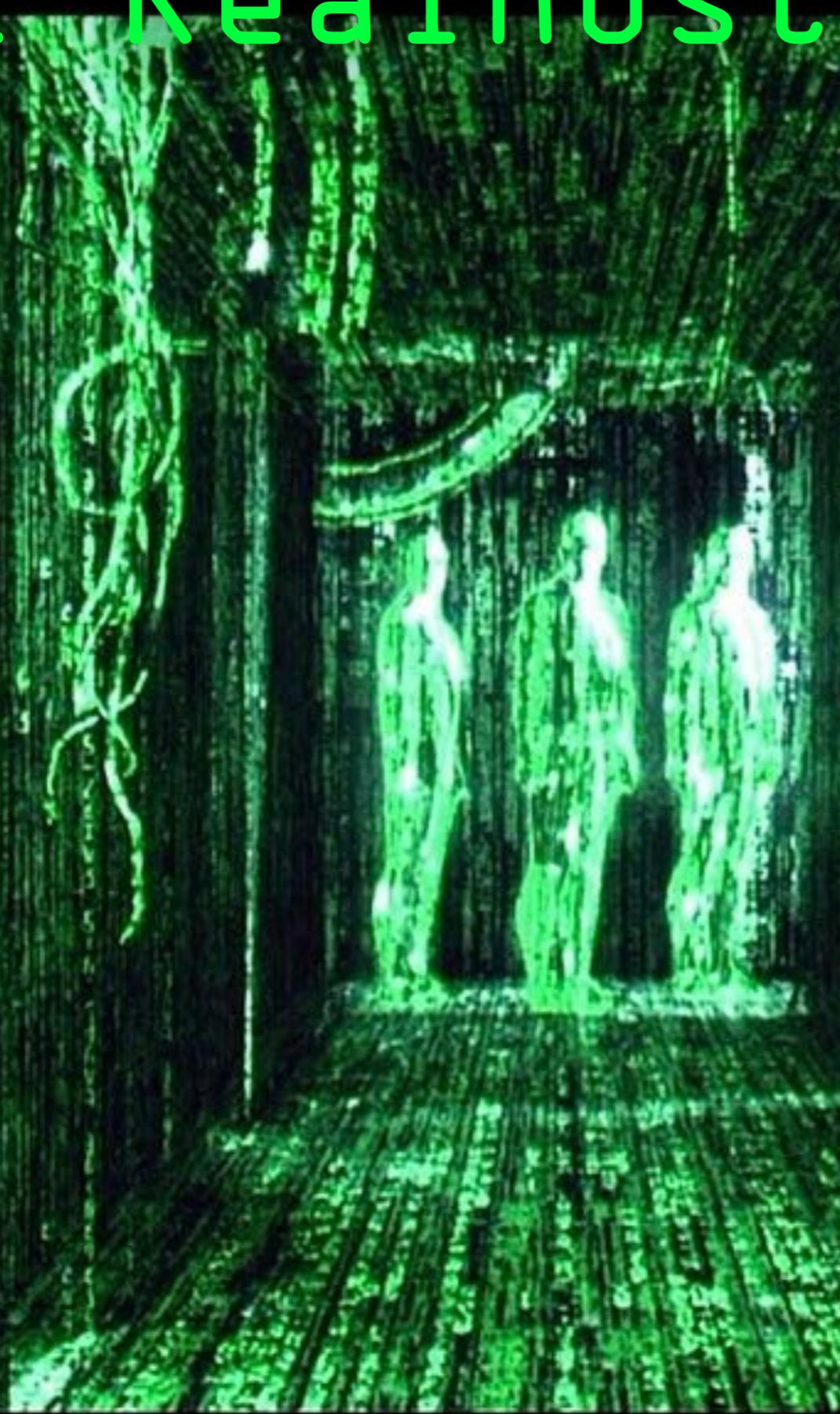
Privremeni zaključak

- Teorija stringova (fundamentalnih struna, niti)
- Može da se razume kao višeslojna, hijerarhijska struktura teorija polja.
- Najosnovniji nivo ima:
 - “Prostor-vreme” = svetska površ; dinamika u toj svetskoj površi generiše sve ostalo
- Oscilacioni stepeni slobode stringova opisuju:
 - čestice i polja,
 - ali i prostor-vreme
 - i njihovu dinamiku

Sekundarni, efektivni,
rezultujući *epifenomen*

Akordi oscilacija fundamentalnih stringova

Je li Realnost Matrica?





Je li Matrica Realnost?

Hvala na pažniji

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>