

תורת המיטרלים

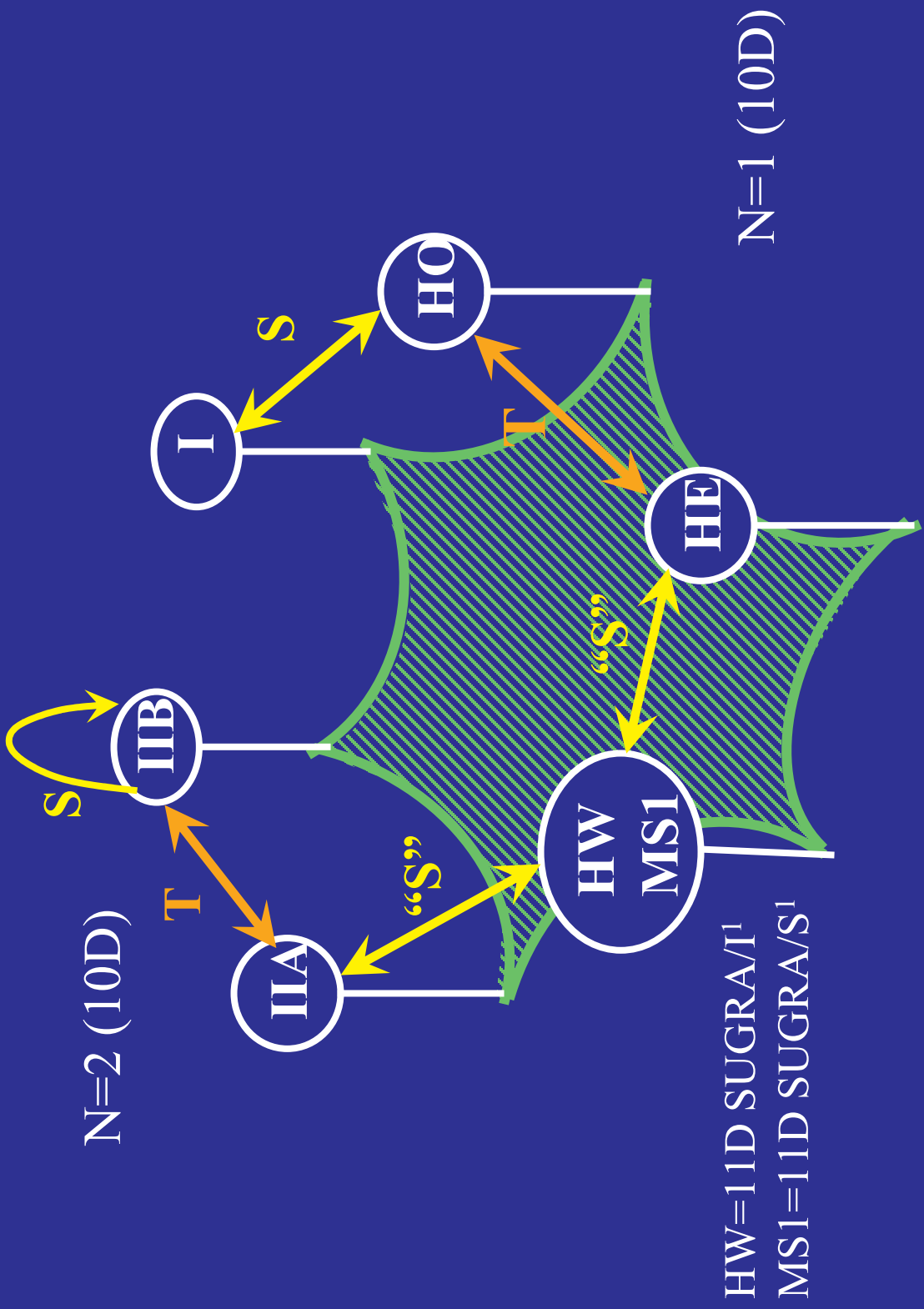
- תורת המיטרלים: לא תורה, לא (רק) של מיטרלים
- מרכיבים חיוניים: מימדים נוספים, סופרסקריטה
- הקשר לעולם הממשי
- הרבה* פתרונות:

צימומים (compactifications) עם שטף

תורת המיתרים: לא תורה, לא (רק) של מיתרים

- מסגרת להצגת שאלות בסיסיות ולסיכום התשובות הידועות ברגע נתון
 - מכילה תורת איחוד עקבית של כבידה קוונטית ושאר הכוחות הידועים: TOE
 - לכל הפחות תורה של מיתרים ויריעות
 - המסגרת התאורטית האמיתית אינה ידועה
- דימוי: ילדים עיוורים ממשששים פיל גדול

תורות על-מיתר ועל-כבידה 11 מימדית

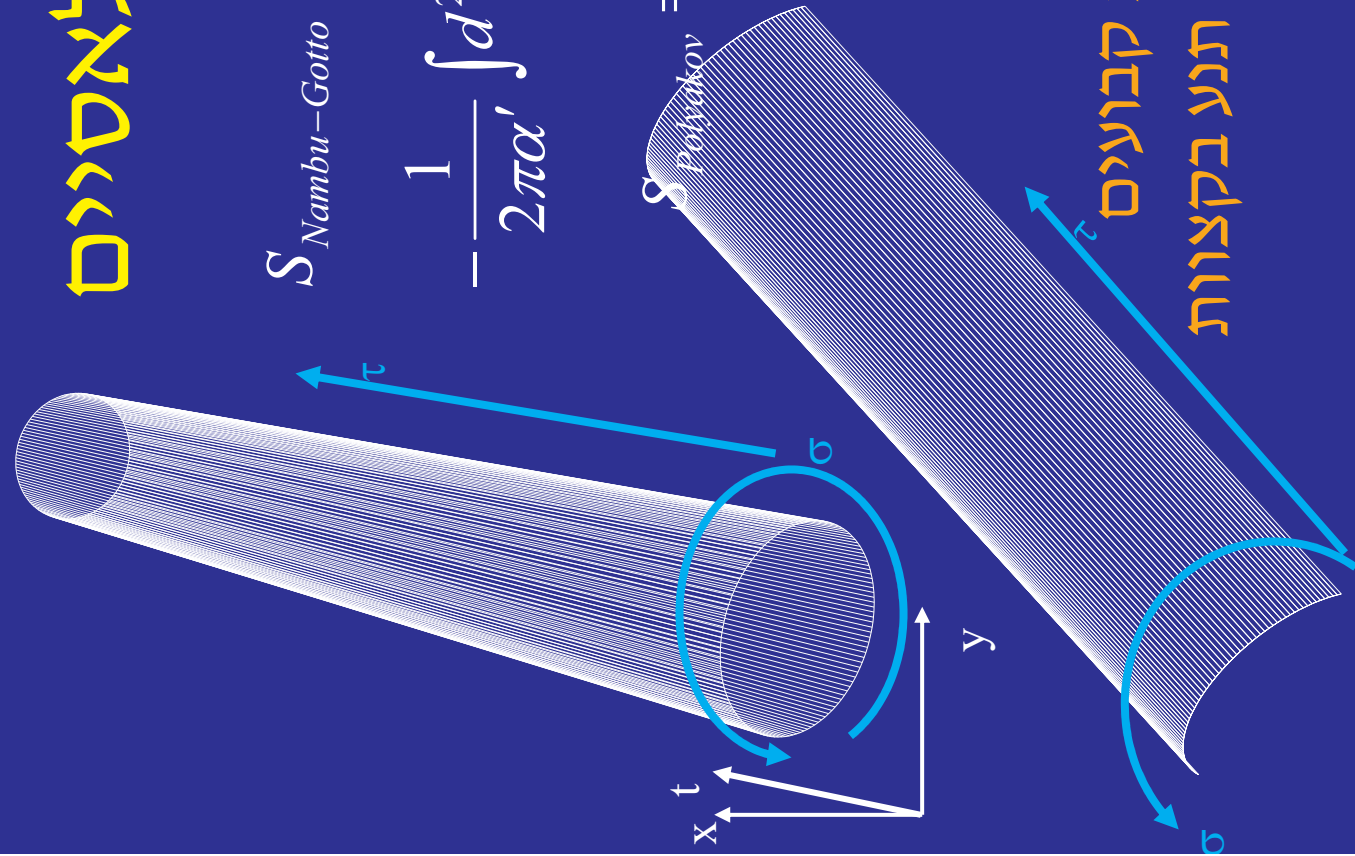


מיתרים בוזוניים קלאסיים

$$S_{Nambu-Gotto} = -\frac{1}{2\pi\alpha'} \int dA = : \text{שטח} : \bullet$$

$$-\frac{1}{2\pi\alpha'} \int d^2\xi \sqrt{-\det(\partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X_\mu)} \quad \mu = 0, 1, \dots, D-1$$

$$S_{Polyakov} = -\frac{1}{4\pi\alpha'} \int d^2\xi \sqrt{-\det g^{\alpha\beta}} \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X_\mu$$



תנאי שפה

מיתר סגור : מחזוריים

מיתר פתוח : דיריכלה - קצוות קבועים

נוימן - אין זרם תנע בקצוות

אופני תנודה ימניים ושמאלניים

על-מיתרים קלאסיים

• פעולה סופרמיטריית : $S_{Polyakov}^{\Pi} = -\frac{1}{4\pi\alpha'} \int d^2\xi \sqrt{-\det g}$

$$g^{\alpha\beta} \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu + \frac{i}{2} \psi^\mu \phi \psi^\nu + \frac{i}{2} (\chi_\alpha \gamma^\beta \gamma^\alpha \psi^\mu) (\partial_\beta X^\nu - \frac{i}{4} \chi_\beta \psi^\nu) + \psi^\mu \leftrightarrow \bar{\psi}^\mu$$

$$\begin{aligned} \delta X &= \epsilon(z)\psi & , & \quad \delta\psi = -\epsilon(z)\partial X \\ \delta X &= \bar{\epsilon}(\bar{z})\bar{\psi} & , & \quad \delta\bar{\psi} = -\bar{\epsilon}(\bar{z})\bar{\partial} X \end{aligned}$$

תנאי שפה לפרמיונים
מחזוריים : Ramond

Neveu-Schwarz : אנט-מחזוריים
NS-NS בוזונים במרחב-זמן
R-R שדות תבנית אנטיסימטריים במרחב-זמן
NS-R פרמיונים במרחב-זמן

סופרמיטריה במרחב-זמן (מרחב המטרה)

(על-) מיתררים קוונטיים

$$[K_i, K_j] = if_{ijk} J^k + C \left(1 - \frac{D-2}{24} \right)$$

סימטריות – לורנץ
(בכיוול חרוט האור)

$$\Rightarrow D = 26$$

סופר וויל בכיוול קונפורמי

$$\frac{3}{2} D - 15 = 0 \Rightarrow D = 10$$

אנומליה + יציבות קוונטית ←

מרכיבים חיוניים: מימדים נוספים $D=10$

סופֶרְמִיטְרִיה $N=1,2$

(על-) מיתריתים קוונטיים במרחב המטרה

תוצאה:

- Heterotic E8 x E8, SO(32) N=1 SUGRA, D=10
- IIA-non-chiral, IIB-chiral N=2 SUGRA, D=10
- I מיתרית פתוחים וסגורים (II על אורינטיפולד)
M/11D SUGRA

הספקטרום כולל:

- ✓ כבידה ודילאטון- הקובע את חוזק צמוד הכיול והכבידה
- ✓ חלקם מכילים שדות כיול
- ✓ חלקם מכילים פרמיונים כיראליים

דואליות

שני תיאורים אפשריים לאותו מושג / עצם / תורה

• T דואליות

מיתרים על טורוס ברדיוס $R \leftrightarrow$ מיתרים על טורוס ברדיוס α'/R

• S דואליות

תורות מיתר מְצַמדות חזק \leftrightarrow ותורות מיתר מְצַמדות חלש

• דואליות string \leftrightarrow 10D string

• דואליות AdS/CFT

דואליות T

- מיתר הנע במרחב שטוח, קואורדינטה מעגלית, ברדיוס R
- שתי תרומות לאנרגיה:

– התנע של מרכז המסה מקוונטט ביחידות של $1/R$: אנרגיית מרכז המסה α' , $E_{CM} \sim n^2/R^2$

– אנרגיית לפוף $E_W \sim m^2 R^2 / \alpha'$

$$\leftarrow E_{tot} = E_{CM} + E_W$$
$$m \leftrightarrow n, R \leftrightarrow \alpha'/R$$

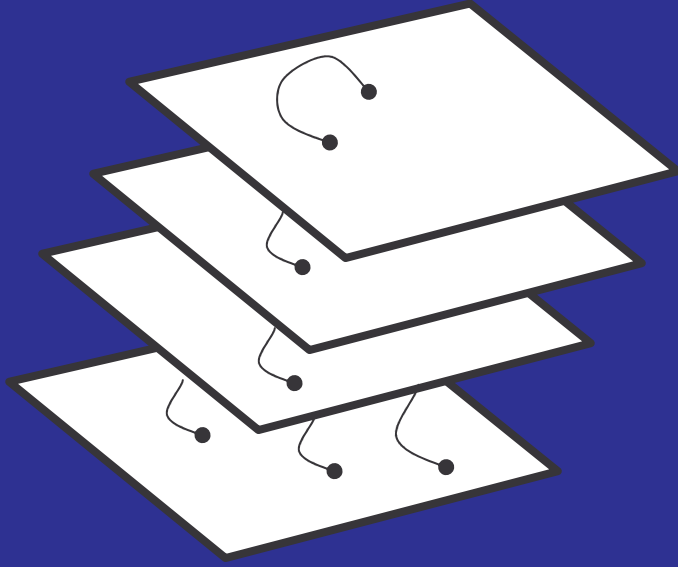
המיתר אינו יכול להבדיל בין שתי האפשרויות

על יריעת-עולם: החלפה של המשתנה והתנע שלו $q \leftrightarrow p$ בפעולה ריבועית

Ads/CFT

שקילות בין תורת על-כבידה לתורת על-כיוול ללא כבידה

- יריעות ויריעות דיריכלה
- תיאורים שקולים: על-כבידה במרחב-זמן הנוצר ע"י היריעות \leftrightarrow תורת העל-כיוול של המיתרים
- הפתחים המסתיימים על היריעות



צימומים (קומפקטיפיקציות) ומודולי (Moduli)

$$\hat{\mu} = 0, 1, 2, 3, 5$$

$$R^4 \times S^1$$

$$0 \leq my \leq 2\pi$$

צימום של מרחב 5 ממדי

$$\mu = 0, 1, 2, 3$$

$$x^\mu = (x^\mu, y)$$

על מעגל חז-ממדי

כבידה 5 ממדית בלי חומר \leftarrow כבידה 4 ממדית + חומר (נגזרות בלבד!)

$$S^{(5)} = - \int d^5x \sqrt{g} \hat{R}$$

$$S^{(4)} = \int d^4x \sqrt{-g} \phi^{\frac{1}{2}} \left\{ -R - \frac{1}{4} \phi F(A)^2 \right\}$$

$$\hat{g}_{\hat{\mu}\hat{\nu}} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} - \phi A_\mu A_\nu & -\phi A_\mu \\ -\phi A_\nu & -\phi \end{pmatrix}$$

$$g_{\mu\nu} \rightarrow g'_{\mu\nu} = \phi^{\frac{1}{2}} g_{\mu\nu} \quad \phi \rightarrow \phi' = \sqrt{3} \log \phi$$

$$\hat{R} = R + \frac{1}{2\phi^2} (\partial\phi)^2 - \frac{1}{\phi} \square \phi = \int d^4x \sqrt{-g} \left\{ -R + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{4} e^{-\sqrt{3}\phi} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right\}$$

צימומים (קומפקטיפיקציות) ומודולי (Moduli)

- צימומים גאומטריים ולא גאומטריים
- טורסיס: מהמטריקה 10-D וקטורי $U(1)$
- (11-D) $\frac{1}{2}$ סקלרים, טנזור אנטי-סימטרי:
וכן, ...
- מודולי: אין פוטנציאל, יכולים לקבל כל ערך קבוע
- שהוא: דוגמה סטנדרטית: נפח
- מרחב המודולי

$$\int d^{10}x \sqrt{-g_{10}} e^{-2\phi} (R_{10} + \dots) \rightarrow \int d^4x \sqrt{-g_4} V_6 e^{-2\phi} (R_4 + \dots)$$

הסצנה של על-מיתרים בעימוד הלש

מתוך hep-th/0402088

- הנחה תאורטית בסיסית T1 :

על-מיתרים קוונטיים (בצימוד הלש) ברקע שומר-לורנץ

- תוצאה: גרביטון וחקיקי כיול מצומדים "כמו שצריך"

- משמעות : תורת איחוד קוונטית של כל הכוחות!

- אליה וקונן בה: 10 ממדים (רק 2 גאומטריים)

- מידע נסיוני E1 : לעולמנו 4 ממדים "גדולים"
- משמעות : $M6, 10D \rightarrow R4 \times M6$
- אליה וקוץ בה: הרבה אפשרויות, מעט מתאימות, מודולי
- שאלה : ומה עם השאר (כולל R10) ?

- מידע נסיוני E2 : בעולמנו פרמיונים ~ חסרי מסה

- משמעות : בעולמנו $N \leq 1$ SUSY

(ולא 2, 4, 8, N), למשל) ולכן $M6, R4 \times M6$ יריעה או תורה ס"ק מיוחדת Calabi-Yau, orbifolds

h_{11} מבני קאהלר, h_{12} מבנים מרוכבים

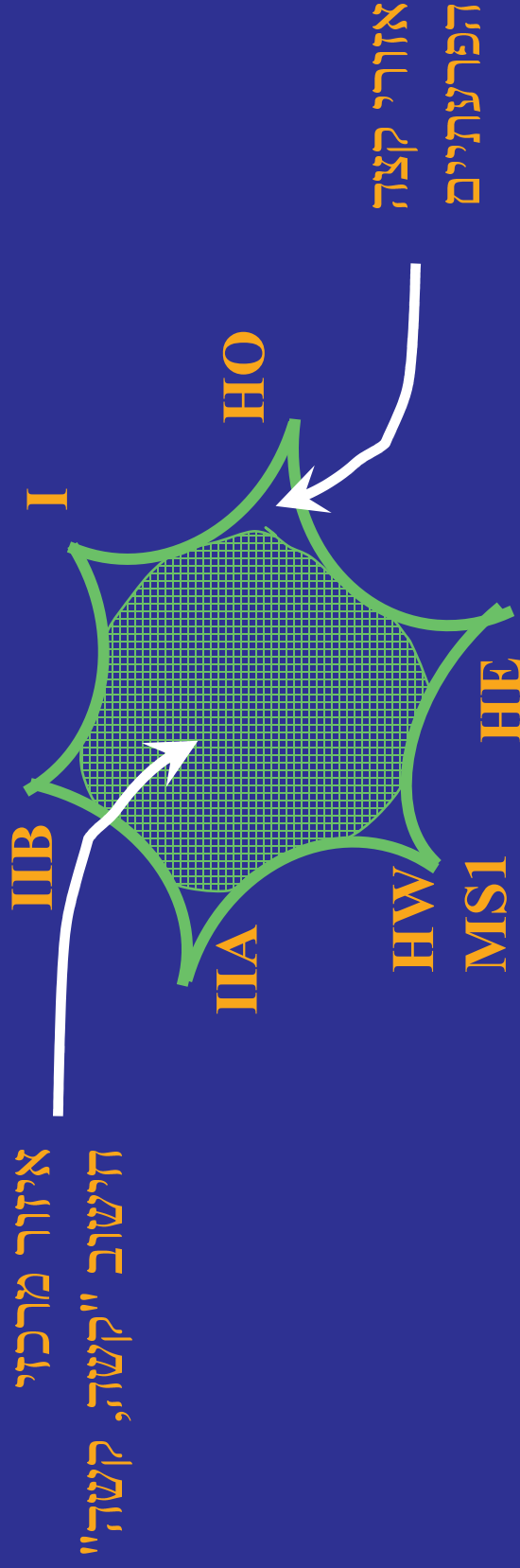
- אליה וקונ' בה: הרבה אפשרויות, מעט מתאימות

- שאלה: ומה עם השאר (כולל טורסוסים) ?

- מידע נסיוני E3 : אין מודולגי (שאננס שדות כיוול) חסרי מסה
- משמעות : פוטנציאל למודולגי חובה
- סיבה: כבידה שונה מכבידה של איינשטיין/ביטון

קבועי צימוד משתנים, ...

- שאלה: ומה ימנע מהם להגיע לאזורי הקצה?



- מידע נסיוני E4 : בסקלות אנרגיה "נמוכות"
סופרמיטריה שבורה ($N=0$), היררכיה $M_{\text{Planck}} 10^{-15}$
- אפשרויות : שבירה הפרעתית, לא הפרעתית
- אליה וקונ' בה: הרבה אפשרויות, מעט מתאימות
- שאלה: ומה עם השאר ?

- מידע נסיוני E5 :

הקבוע הקוסמולוגי קטן $(M_{\text{Planck}})^4$ 10^{-120} וחיובי (?)

- שאלה: האם ניתן בכלל בתורת מיתרים לקבל ק"ק כל כך קטן, חיובי

- אם התשובה היא כן: הרבה אפשרויות, מעט מאוד מתאימות

ואם התשובה היא לא? הצעה: סיבה עמוקה לכך

- שאלה נוספת : ומה עם השאר ?

- מידע נסיוני E6 & E7 :

$$3 \text{ דורות} + \text{SU}(3) \times \text{SU}(2) \times \text{U}(1)$$

יתכן (אך לא סביר) שמודל המקיים E1-E5 מקיים בהכרח

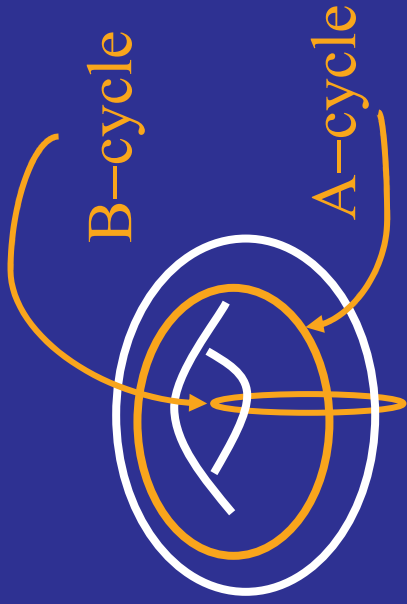
את E6, E7

- מסקנה: רק חלק מהאפשרויות מתאימות
- שאלה: ומה עם השאר ?

צ'ימורמים עם שטף: Discretum

- Type II, Het
- יריעות ללא איזומטריות (בדומה ל CY) השוברות N=1 עד ל SUSY
- שטף F-RR ושטף H-NS

← כל מודולי המבנה המרוכב ("צורה") והדיליאטון נקבעים, מודולי קאהלר ("נפח") לא נקבעים



$$w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2 = z$$

$$S^3 \times S^2 \times R^1 \sim \text{חרוט}$$

$$\frac{1}{2\pi\alpha'} \int_A F^{(3)} = 2\pi M$$

$$\frac{1}{2\pi\alpha'} \int_B H^{(3)} = -2\pi K$$

קשור לתנאי קוונטיזציה של דיראק

$$\frac{\chi(X)}{24} = N_{D3} + \frac{1}{2k_{10}^2 T_3} \int_{\mathcal{M}} H_3 \wedge F_3$$

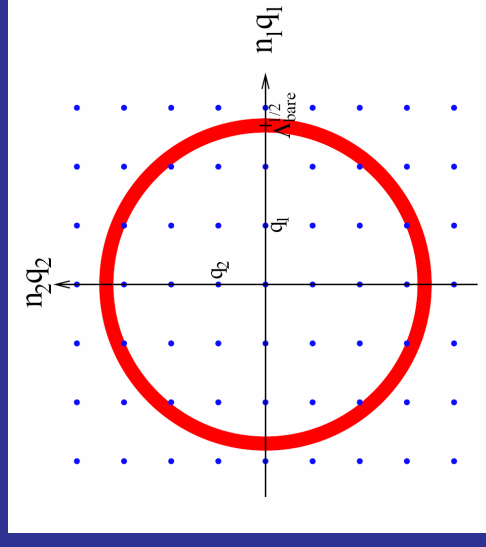
ה-Discretum : *הרבה* פתרונות

- כמה אפשרויות יש: הרבה!
- איך סופרים: מספר האופנים הבלתי תלויים לשים שטף בריעה הקומוקטית
- מה עושים עם כל האפשרויות (B&P 2000) ?

$$\frac{1}{2\pi\alpha'} \int_A F^{(3)} = 2\pi M$$

$$\frac{1}{2\pi\alpha'} \int_B H^{(3)} = -2\pi K$$

$$\lambda = \lambda_{\text{bare}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^J n_i^2 q_i$$



$$V = \int_X d^6 y \sqrt{\tilde{g}^{(6)}} \frac{e^{4\omega(y) - 12\omega(x)}}{24\pi} |iG_3 - *_{\theta} G_3|^2.$$

$$G_3 = F_3 - \tau H_3 \quad iG_3 = *_{\theta} G_3 \quad e^{4\omega} = T_R$$

$$\tau = C_0 + ie^{-\phi}$$

P. J. E. Peebles :

arXiv:astro-ph/0209403 v1 19 Sep 2002

Abstract. Physical science has changed in the century since Lord Kelvin's celebrated essay on *Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*, but some things are the same.

Cloud No. I: the Dark Sector

Cloud No. II: Strong Spacetime Curvature



Cloud No. III: The Meaning of Life



**"We live where we can live,"
NYT: 2 Sept. 2003**

The Anthropic Principle

R. Dicke (1961): “ carbon-based life can only arise when the Dirac large numbers hypothesis is true because this is when burning stars exist”

B. Carter (Early 1970’s): “what we can expect to observe must be restricted by the conditions necessary for our presence as observers” (Leslie ed. 1990). The word "anthropic" was intended as applying to intelligent beings.

A possible argument for preferring the God hypothesis: think in terms of many possible fundamental theories, God selecting a theory which permitted life's requirements to be fulfilled without contradictions.

ייצוב שארית המודולי (קאהלר)

KKLT •

hep-th/0402088 •

תרומות לא הפרעתיות מעיבוי של gaugino
ואינוטטונים של יריעות

שאלות קוסמולוגיות מעניינות

טענה: ייצוב המודולי ייתכן רק באזור במרחב
המודולי שבו תורת ההפרעות אינה תקפה

תורת המיתרים

- תורת המיתרים: לא תורה, לא של מיתרים
- מרכיבים חיוניים: מימדים נוספים, סופרסימטריה
- הקשר לעולם הממשי
- הרבה* פתרונות:

צימומים (compactifications) עם שטף

מ TOE ל TOA ומה הלאה?