

DIE VERBORGENE VIELFALT

DES VAKUUMS

Hans Peter Nilles

BETHE ZENTRUM FÜR THEORETISCHE PHYSIK  
UNIV. BONN

BAD HONNEF, JAN. 2009

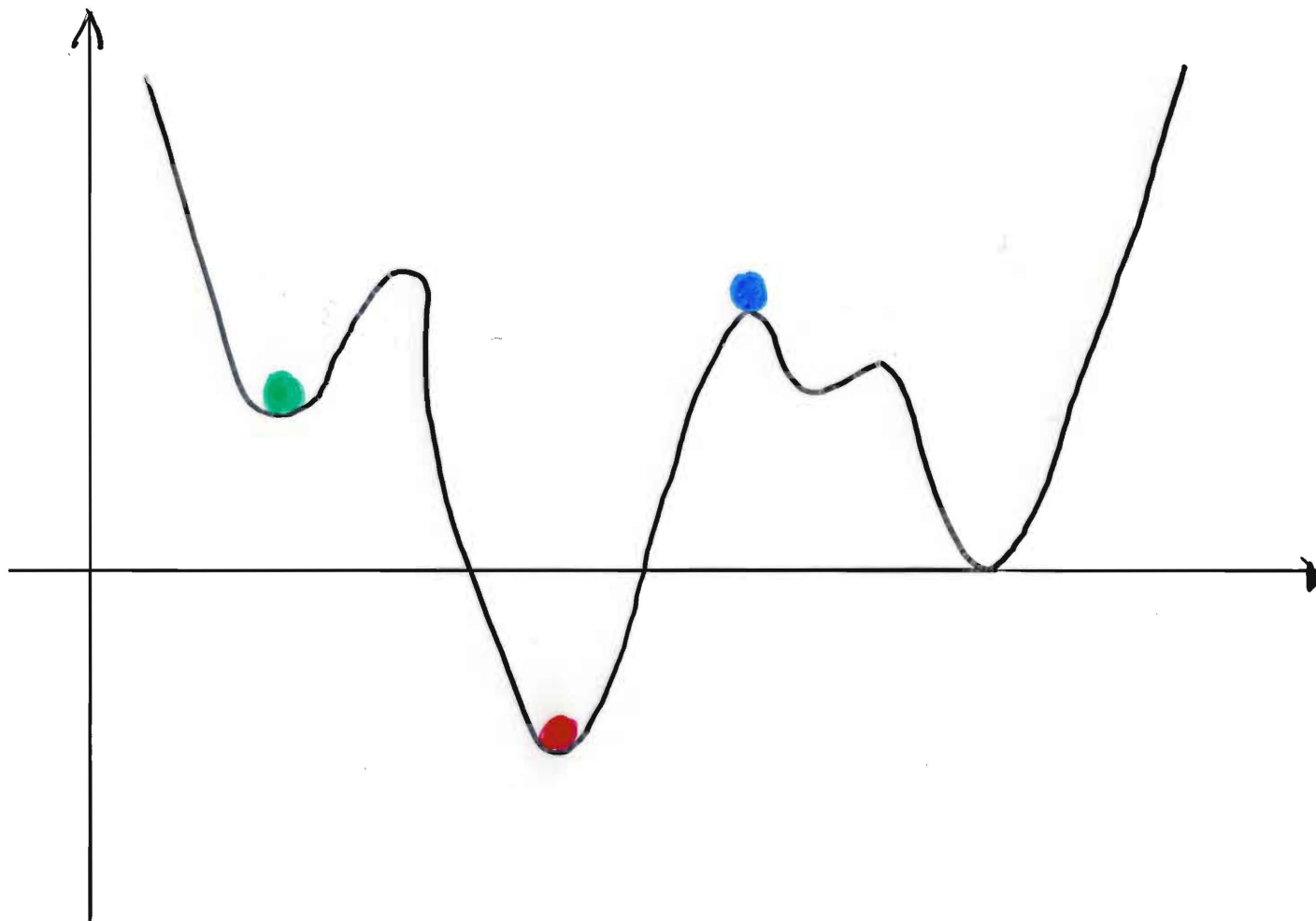
- \* DIE FRAGE NACH NICHTS
- \* GRUNDZUSTÄNDE PHYS. SYSTEME
- \* DAS VAKUUM DER TEILCHENPHYSIK
- \* DER GRUNDZUSTAND DES KOSMOS
- \* VOM URSPRUNG DES RAUMS

\* WAS IST NICHTS ?

\* WAS IST LEERER RAUM ?

\* WAS IST RAUM ?

\* SIND WIR EINFACH NUR BLIND ?



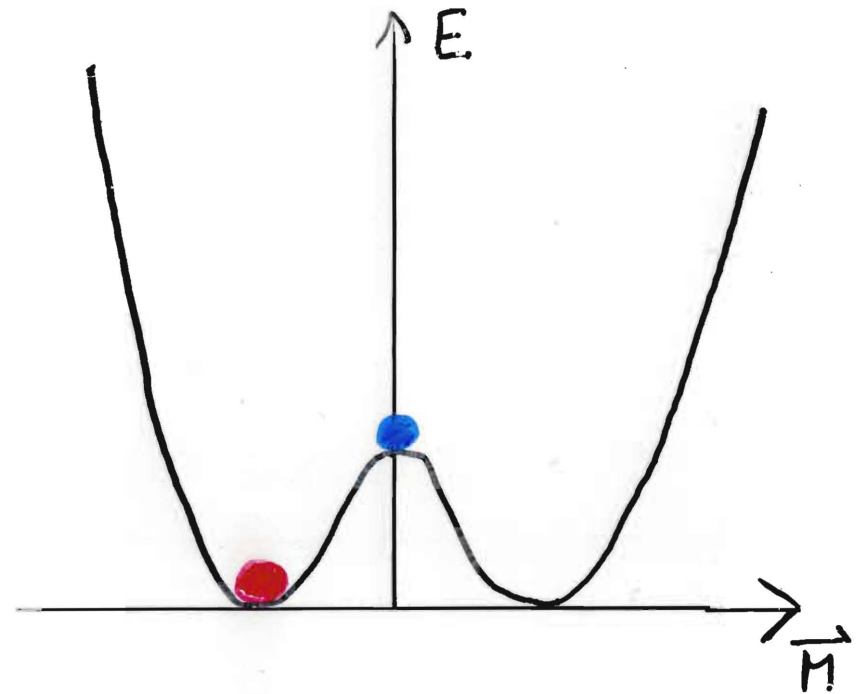
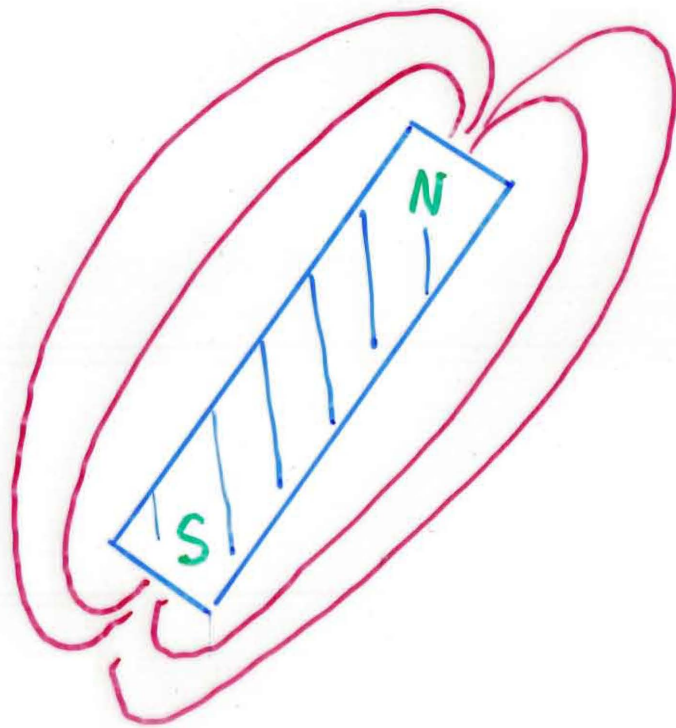
- STABIL
- INSTABIL
- METASTABIL

VAKUUM ALS GRUNDZUSTAND

PHYSIKALISCHER SYSTEME

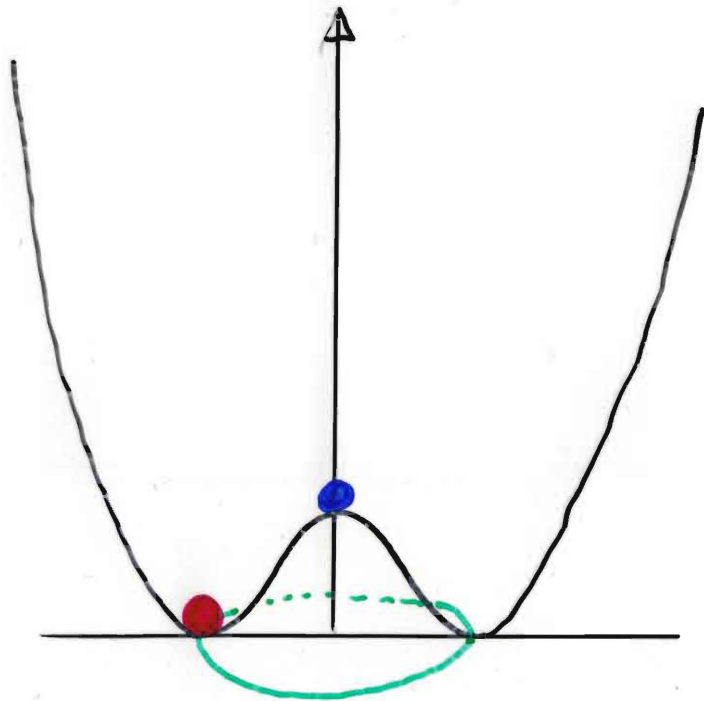
DAS **VAKUUM** IST KOMPLIZIERTER  
ALS MAN DENKT!

BEISPIEL FERROMAGNET



MAGNETISCHES FELD  
IM GRUNDZUSTAND!

# ENTARTETE VAKUA



GRUNDZUSTAND

BRICHT SYMMETRIE

( SYMMETRISCHER

ZUSTAND INSTABIL)

SPONTANE

SYMMETRIE-BRECHUNG

DURCH "VAKUUM ERWARTUNGSWERT"

# TEMPERATUR ABHÄNGIGKEIT DES "GRUNDZUSTANDS"

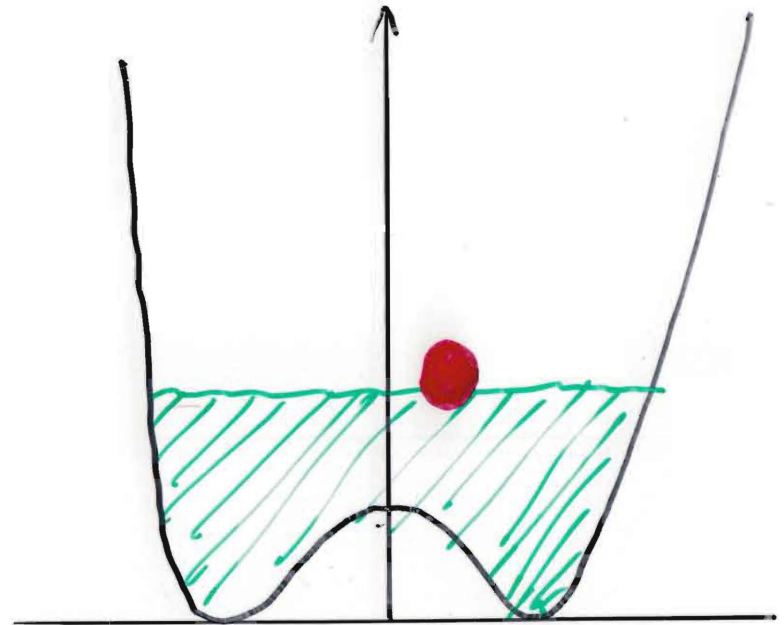
MAGNETFELD

VERSCHWINDET

FÜR  $T > T_{\text{kritisch}}$

PHASENÜBERSÄTZE

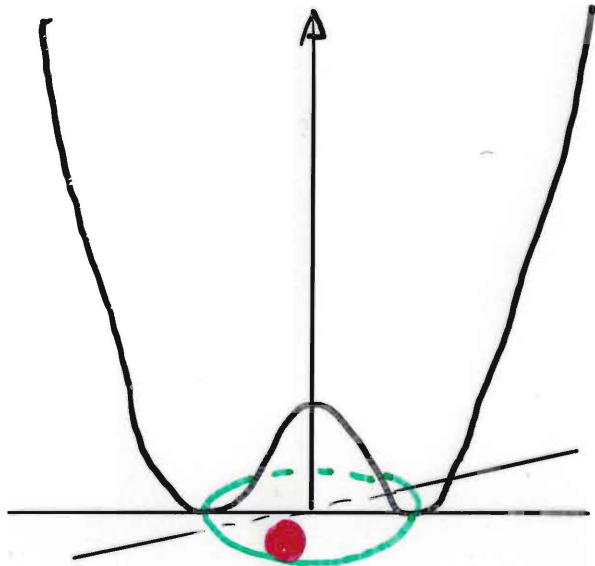
GRUNDZUSTAND:  $T = 0$



INTERESSANTE EFFEKTE BEI

TIEFEN TEMPERATUREN (BODEN DER FLASCHE)

# SUPRALEITUNG



BOSE - EINSTEIN

KONDENSATION

VON COOPER - PAAREN

SPONTANE SYMMETRIE-  
- BRECHUNG

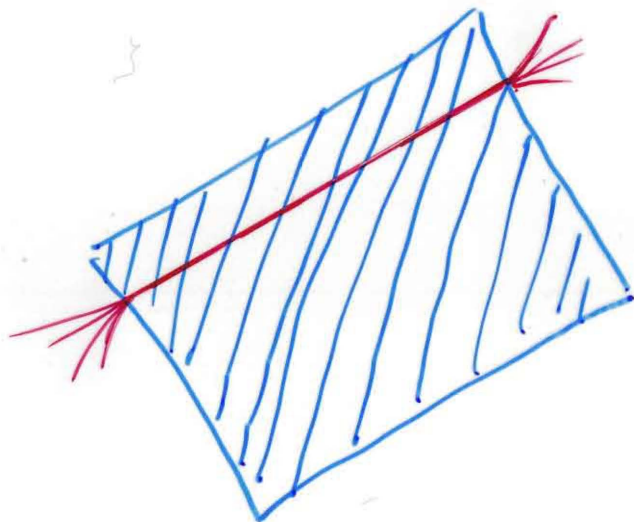
ENTARTUNG DES VAKUUMS  $\rightarrow$  NULL-MODE

"GOLDSTONE" MODE  $\rightarrow$  SUPRALEITUNG



# MEISSNER - EFFEKT

GERINGE EINDRINGTIEFE EINES  
MAGNETFELDES!



ENTSPRICHT EINER

EFFEKTIVEN MASSE  
DES PHOTONS  
IM SUPRALEITER

EINDRINGTIEFE  $\sim \frac{1}{\text{MASSE}}$

VORTEX LINIEN (BEI STARKEM MAGNETFELD)

# GRUNDZUSTAND DER WELT ?

WELTALL = LEERER RAUM ???

- PROBLEME:
- KOSMISCHE HINTERGRUNDSTR.
  - $T_{\text{UNIV}} > 0$
  - KOSMISCHE MAGNETFELDER
  - (DUNKLE) MATERIE

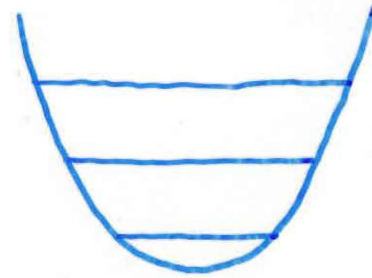
GRUNDZUSTAND BEI  $T=0$ :

WAS KANN DAS SEIN ??

# QUANTENMECHANIK - QUANTENFELDTHEORIE

## \* VAKUUM-ENERGIE

z. B. HARMONISCHER  
OSZILLATOR



$\frac{1}{2} \hbar \omega$

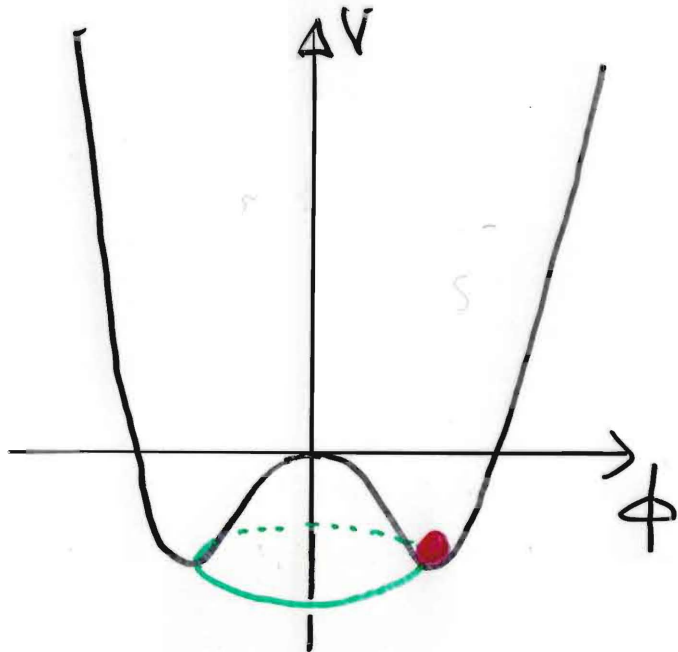
## \* VAKUUM-FLUKTUATIONEN

HEISENBERGSCHE UNSCHÄRFERELATION

KLEINE ABSTÄNDE  $\leftrightarrow$  HOHE ENERGIEN

→ ELEMENTARTEILCHENPHYSIK

# HIGGS - MECHANISMUS (SCHWACHE WW)



BOSE EINSTEIN KONDENSAT

EINES SKALARFELDES

BRICHT  $SU(2) \times U(1)$  SYMMETRIE

"EFFEKTIVE" MASSE

FÜR  $W^\pm, Z$

IN ANALOGIE ZUM SUPRALEITER

KONDENSAT ELEKTRISCH NEUTRAL!

TRANSPARENT FÜR PHOTON  $\rightarrow$  "UNSICHTBAR"

# QUANTEN CHROMODYNAMIK $SU(3)_c$ (QCD)

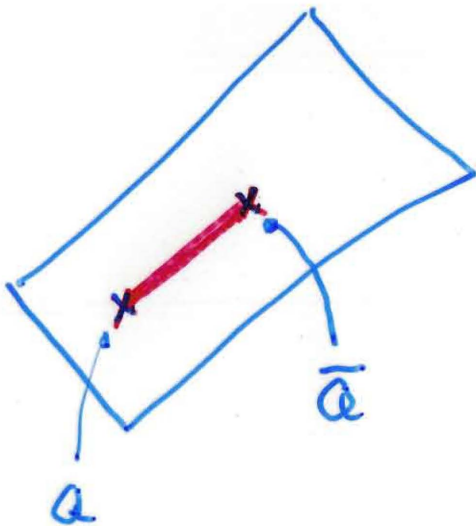
"CONFINEMENT" VON QUARKS UND GLUONEN

HADRONEN

$Q\bar{Q}$ ,  $QQQ$

SIND "FARBNEUTRAL"

ANALOGIE ZUM SUPRALEITER (MEISSNER EFFEKT)



VORTEX LINIEN DES

CHROMOELEKTRISCHEN FELDDES

BOSE-EINSTEIN KONDENSATION

(CHROMO)-MAGNETISCHER MONOPOLE

(E-M DUALITÄT)

UNSER VAKUUM IST ALSO "VOLL" (NICHT LEER)

ENERGIE DES VAKUUMS ?

BEITRAG VERSCHIEDENER KONDENSATE  
UND QUANTENEFFEKTE

RELEVANT FÜR SCHWERKRAFT

(SPIELT DAHER KEINE ROLLE IN DER  
ELEMENTARTEILCHENPHYSIK)

..... ABER FÜR'S UNIVERSUM!

# GRUNDZUSTAND DES UNIVERSUMS?

## ZEITLICHE ENTWICKLUNG

EXPANSION  $\longrightarrow$  ABKÜHLUNG

EXTRAPOLATION ZU

HOHER T (VERGANGENHEIT)

NIEDRIGER T (ZUKUNFT)

STATUS QUO

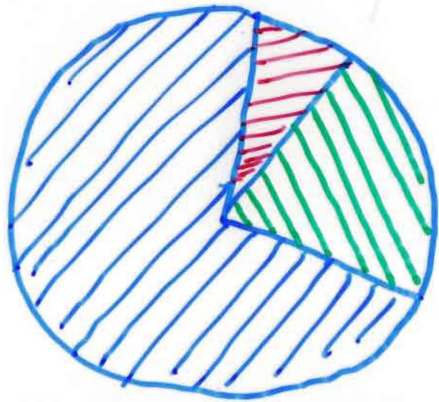
$$T = 3^{\circ}\text{K}$$

KRITISCHE DICHTE  $\rho = \rho_k$

$$\Omega = \frac{\rho_k}{\rho} \approx 1$$

$\rho > \rho_k$  KOLLAPS IN ZUKUNFT

# DER KOSMISCHE KUCHEN



$$w = P/\rho$$

$$w = 0 \quad \text{"MATERIE"}$$

$$w = 1/3 \quad \text{STRAHLUNG}$$

$$w = -1 \quad \text{VAKUUM ENERGIE}$$

(BEISPIEL: KOSM. KONST.  $\Lambda$ )

"RÄTSEL:

\* WARUM  $\Lambda \neq 0$

\* WARUM  $\Lambda$  SO KLEIN ( $10^{-22} \text{ eV}$ )

\* 80% DER "MATERIE" ( $w=0$ )  
UNBEKANNT



# KURZE GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

- INFLATION
- QUANTENFLUKTUATIONEN FRIEREN EIN
- AUFHEIZEN (REHEATING)  $\leftrightarrow$  **BIG BANG**
- STRAHLUNG DOMINIERT
- MATERIE DOMINIERT
- ABKOPPLUNG DER KOSM. HINTERGRUNDSTR.
- FLUKTUATIONEN WACHSEN (STRUKTURBILDUNG)
- VAKUUM ENERGIE DOMINIERT ?!

# UNSERE ZUKUNFT?

ZUR ZEIT BESCHLEUNIGTE EXPANSION

- FRAGEN:
- URSPRUNG DER VAKUUMENERGIE
  - IST  $w = -1$  EXAKT GÜLTIG?
  - WARUM IST VAKUUMENERGIE SO KLEIN
  - WORAUS BESTEHT DUNKLE MATERIE

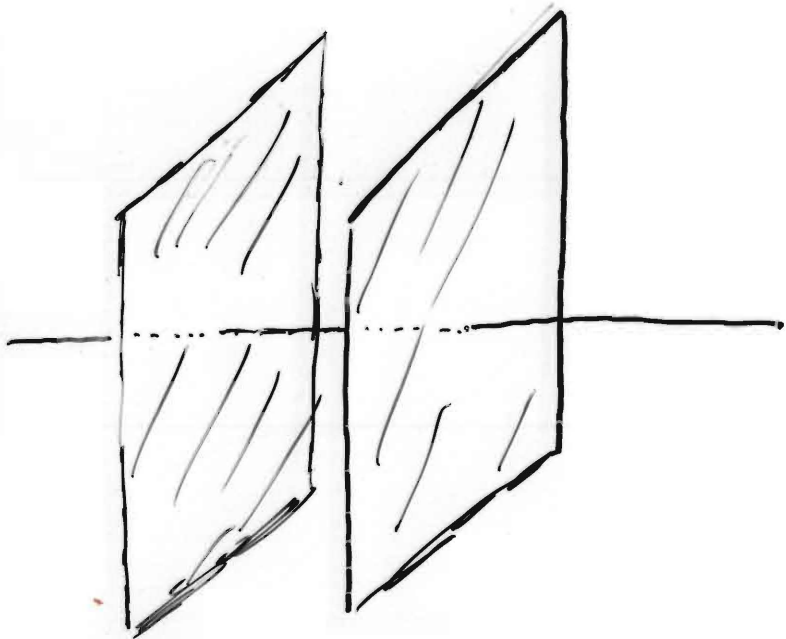
GIBT ES EINEN EINDEUTIGEN GRUNDZUSTAND

# DER RAUM SELBST ?

NICHTS ?

3 RAUMDIMENSIONEN (4 FÜR RAUM-ZEIT)

- WARUM NICHT 1, 2 ... 10, ... 26, ... ?



## BRAN-WELTEN

UNSERE WELT ALS "DEFEKT"

EINSEBETTET IN EINE

RAUM-ZEIT HÖHERER DIMENSION

("VORTEXLINIEN" IN

NICHTTRIVIALER VAKUUMKONFIG.)

## ZUSAMMENFASSUNG

- UNSER VAKUUM IST HÖCHST NICHTTRIVIAL!
- HABEN WIR ALLE INGREDIENTIEN IDENTIFIZIERT
- LEBEN WIR IN STABILEM GRUNDZUSTAND?
- IST DER GRUNDZUSTAND EINDEUTIG?  
(LANDSCAPE OF VACUA)
- KOSMISCHE SELEKTION (MULTIVERSUM)