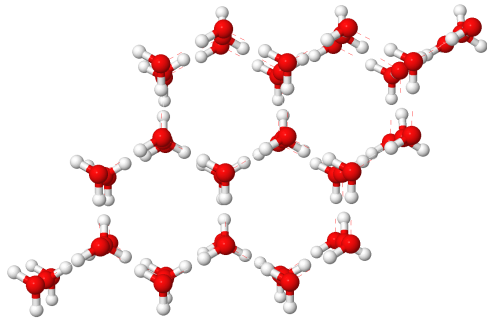


# Vi fant Higgs; Hva leter vi nå etter?

Vi bruker ofte *Symmetri* til å beskrive faseoverganger:

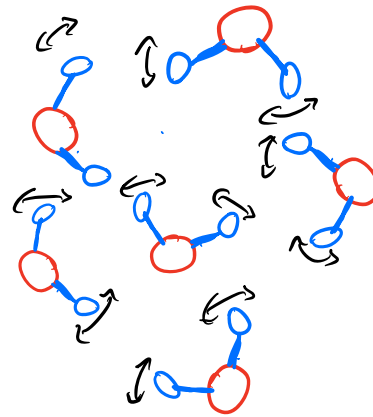
Faseovergangen fra is til vann:



Is Lattice (Fra Wiki)

"Bratt fase"

(→)



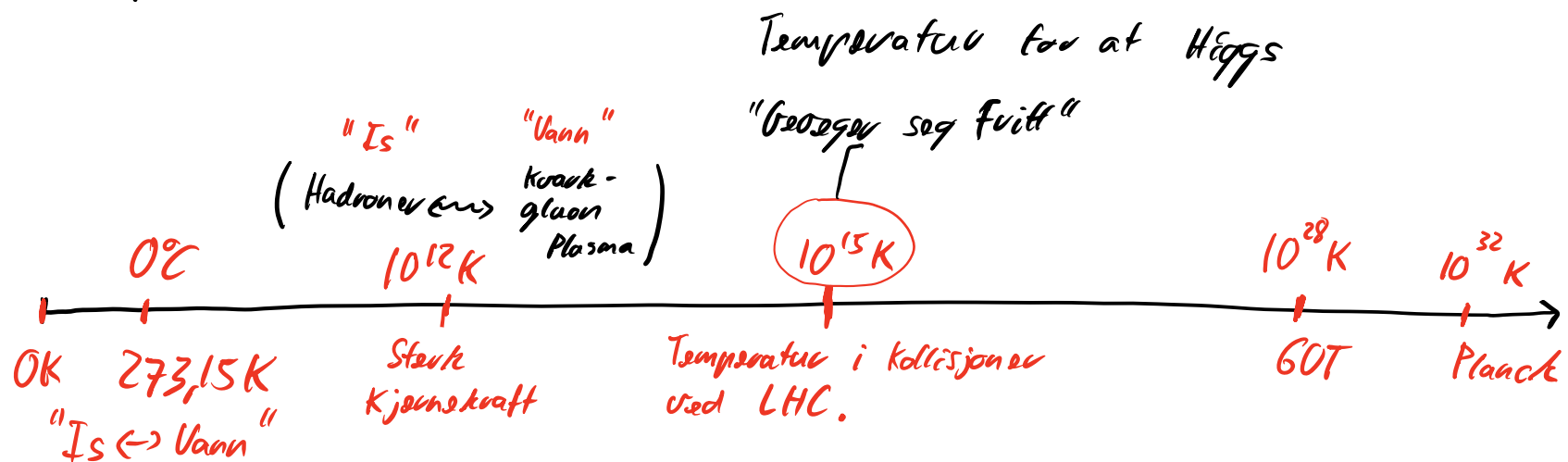
Vann

"Symmetrisk fase"

I Vannfasen kan alle vannmolekylene  
votere og bevege seg fritt  $\Rightarrow$  Full translasjon  
og rotasjonsymmetri!

Is: hvert molekyl er fiksert. Symmetrien er BRUTT.

Temperatur skala :



GUT: Grand Unified Theory

Ved GUT skalaen =  $10^{28}$  K forenes alle  
krefterne i Standard Modellen;

$$G_{SM} = SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

Stærk  
Kjernekraft      Svak  
Kjernekraft      Elektromagnetisme

$G_{SM}$ : Symmetri gruppe for Standard Modellen

$SU(3)$ : Symmetrien til **Stærk Kernekraft**. Brutt for  $T < 10^{12}$  K.

$SU(2)$ : Symmetrien til **Svak Kernekraft**. Brutt for  $T < 10^{15}$  K.  
→ Spontan symmetribrydning. Partikler får masse!

$U(1)$ : Symmetri til **Elektromagnetisme**. Ikke Brutt; vi ser  
fotoner (lys) ved alle temperaturer.

For  $T > 10^{28}$  K forventes det at kreftene forenes i en og samme symmetri:

$G_{SM}$   $\longleftrightarrow$  GUT symmetri  
 $T < 10^{28}$  K  $T > 10^{28}$  K

Standard Modellen er en "Brutt fase" av en overordnet GUT symmetri.

**MEN:** De høyeste temperaturene i kollisjoner ved LHC er

$$T_{LHC} \sim 10^{17} \text{ K.}$$

=> Ingen håp om å måle GUT skala  
fysikk ved LHC... Gi opp ???

### NOT SO FAST:

- ① Vel, hvorfor tror vi at  $T_{GUT} = 10^{28} K$  ?
- ② Kraftene forenes kanskje ved  $T_{GUT} = 10^{28} K$ ,  
men kan vi finne annen og fysikk  
før det ?
- ③ Hva med den fjerde krafta = Gravitasjon ?

① :  $T_{GUT} = 10^{28} K$  ?

Temperatur  $\leftrightarrow$  Gjennomsnittlig (kinetisk) energi per partikkel.

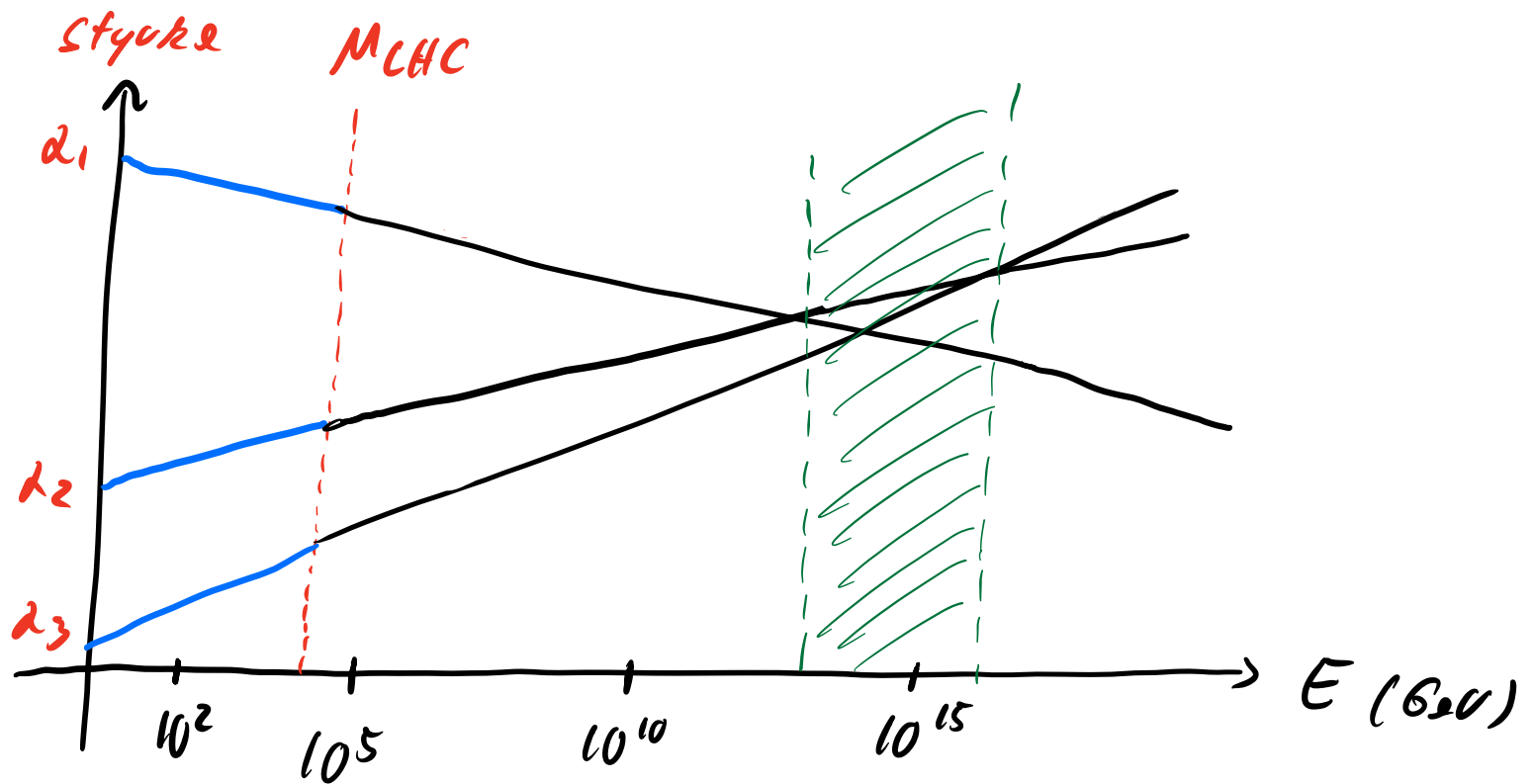
$10^7 K$  (Solens kjerne / atomvåpen)  $\leftrightarrow \sim 1 \overset{10^3}{keV}$

$10^{15} K$   $\leftrightarrow M_{Higgs} c^2 = 126 \overset{10^9}{GeV}$

$T_{GUT} = 10^{28} K$   $\leftrightarrow M_{GUT} c^2 \approx 10^{15} GeV$

$T_{Planck} = 10^{32} K$   $\leftrightarrow M_{Planck} c^2 = 1,22 \times 10^{19} GeV$

Det viser sig at styrken til kræfterne ændrer sig over energiskala:



$$\mathcal{G}_{SM} = \underbrace{SUC(3)}_{d_1} \times \underbrace{SUC(2)}_{d_2} \times \underbrace{U(1)}_{d_3}$$

Stykkerne til kræfterne forenes (nesten)  
ved  $M_{GUT} = 10^{16}$  GeV.

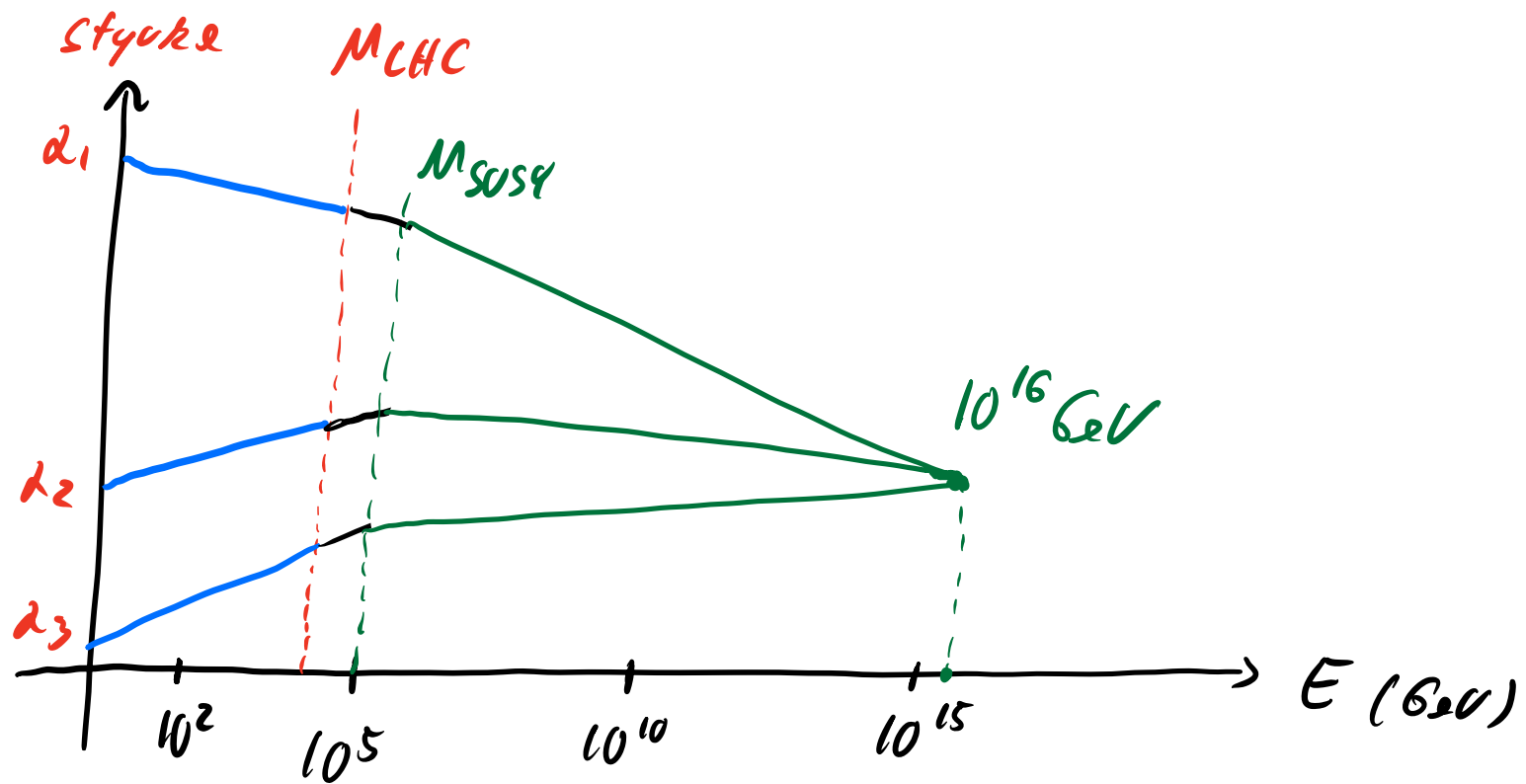
=> Forventer at kræfterne forenes.

**MEN:** Stykkerne forenes ikke helt...

=> SUSY TO THE RESCUE:

Heris man opnåer en **Supersymmetrisk fase**  
ved  $E \sim 10^5$  GeV, vil stykkerne forenes:





Det er håp å oppnå energier ved LHC  
 hvor SUSY ikke lenger er brakt.  
 (Hvis SUSY fins ...)

## Så hva er SUSY?

En symmetri mellom

- Fermioner: materia Elektron, kvark, nøytrino, ...

06

- Bosoner: Kraftformidlere Foton, gluon, graviton, ...

I den supersymmetriske fasen ( $E > M_{SUSY}$ )  
ser man ikke forskjell på fermioner  
og bosoner!

SUSY forutsier også en hel del nye partikler med masse

$$M \gtrsim M_{\text{SUSY}}$$

=> Kandidater for Mørk Materie?

② Så kanskje vi finner SUSY før M<sub>GUT</sub>.

Andre ting?

Det er mye som kan skje mellom  $M_{\text{GUT}} = 10^4 \text{ GeV}$  og  $M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$ : SUSY, ekstra dimensjoner, ...

## I: Vi finner ingenting

Hvis det er ingen ny fysikk helt til  $M_{\text{GUT}}$ ,  
altså vi har "en deken".

Da er det vart at Higgs partikelen er så  
"lett", da  $M_H$  kunne i prinsippet tatt alle  
verdier mellom  $10^2$  og  $10^{16}$  GeV.

Detta vil være et mysterium i seg selv:

Hirarki problemet !

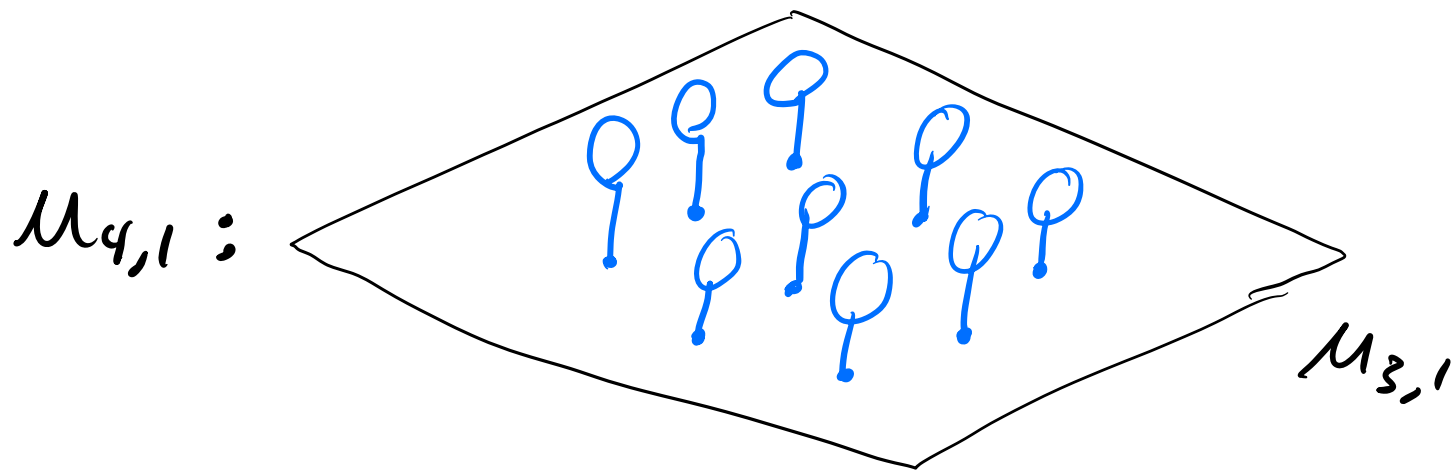
SUSY: Higgs har en masse et sted nært hvor  
SUSY er brutt.

## II: Vi finner noe

Utanom SUSY kan vi og finne:

- Technicolor: Higgs er sammensatt, akkurat som proton og nøytron består av tre kvarker.
- Ekstra dimensjoner:

På 1920 tallet postulerte Kalaza og Klein at verden kunne være 5-dimensjonal, med en av dimensjonene **kompakt** og rullet opp i en sirkel.



Matematisk :  $M_{4,1} = M_{3,1} \times S^1$  .

Hvis man gjør en Kaluza-Klein reduksjon av Einsteins likninger :

$$\text{Einstein}(M_{4,1}) = \text{Einstein}(M_{3,1}) + EM !$$

Detta var veldig spennende (Spesielt for Einstein).

Er de andre kreftene realiseringer av gravitasjon på opp-koblede kompakte ekstra dimensjoner?

Merk:

- De ekstra dimensjonene må være for små til at LHC kan se dem.
- Dette er måten vi bygger modeller for partikkelfysikk i **String Teori!**

### ③ Hva da med Gravitasjonskrafta?

Hvis vi fortsetter forbi  $M_{\text{GUT}}$  kommer vi til

$$M_{\text{Planck}} = 1,22 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

Her tror man at alle kreftene, **inkludert gravitasjon**, forenes i en og samme kraft.

Merke:  $M_{\text{Planck}} \leftrightarrow T_{\text{Planck}} \approx 10^{32} \text{ K}$

Over denne temperaturen **Smelter tidrommet!**  
Her trenger vi **Kvantegravitasjon** for å forstå fysikken.



MEN: Det er vanskelig å kombinere prinsippene  
både kvantemekanikk og gravitasjon.

En måte å forstå hvorfor:

Kvante: 
$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$

Dette er en lineær likning i kvantefeltet  $\Psi$ .

Gravitasjon: 
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

En ytterst ikke-lineær likning i  
metriken  $g_{\mu\nu}$ : Felt som beskriver romtid.

Vi har to ledende teorier for å "kvantisere gravitasjon"

I: Loop Quantum Gravity

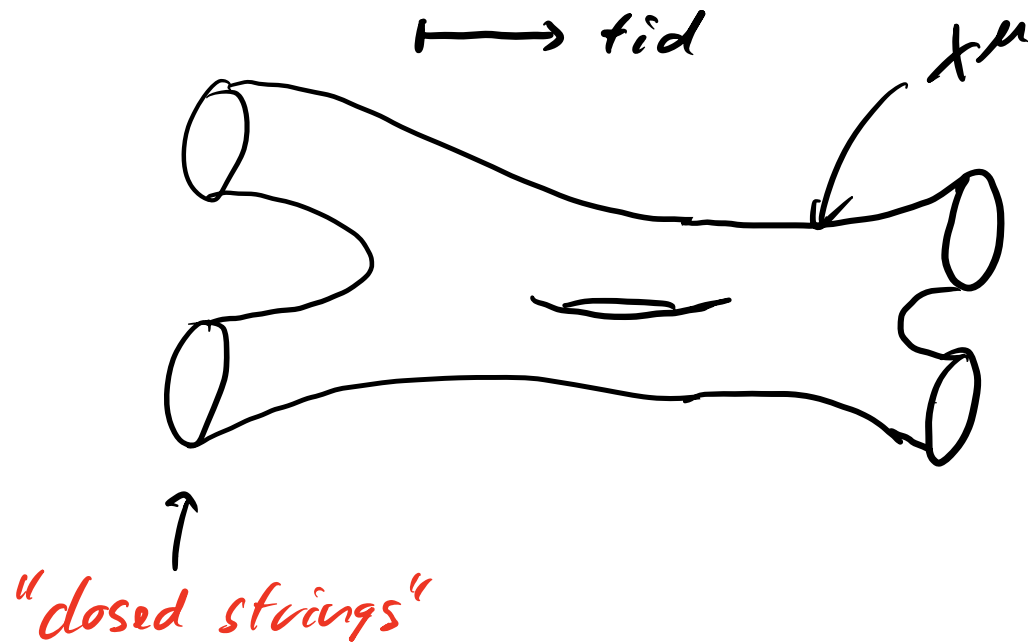
II: Streng Teori ← Mitt Felt!

I streng teori er ikke verden 4-dimensjonal, ei heller 10-dimensjonal, men 2-dimensjonal!

2d: Problemene rundt ikke-linearitet for gravitasjon kan håndteres!

MEN: Verden er ikke 2-dimensjonal...

What is going on??



Strengene kan vekselvirke på finurlige måter, og over tid *spenner* at "the string worldsheet".

Dimensjonene vi observerer  $X^M$  kan tenkes på som felt som lever på "the string world-sheet". Altså EM felt, temperaturfelt, etc, som vi kjenner til.

Av tekniske grunner trenger vi 10 dimensjonsfelt:

$$x^0, x^1, \dots, x^9 \rightsquigarrow M_{9,1}.$$

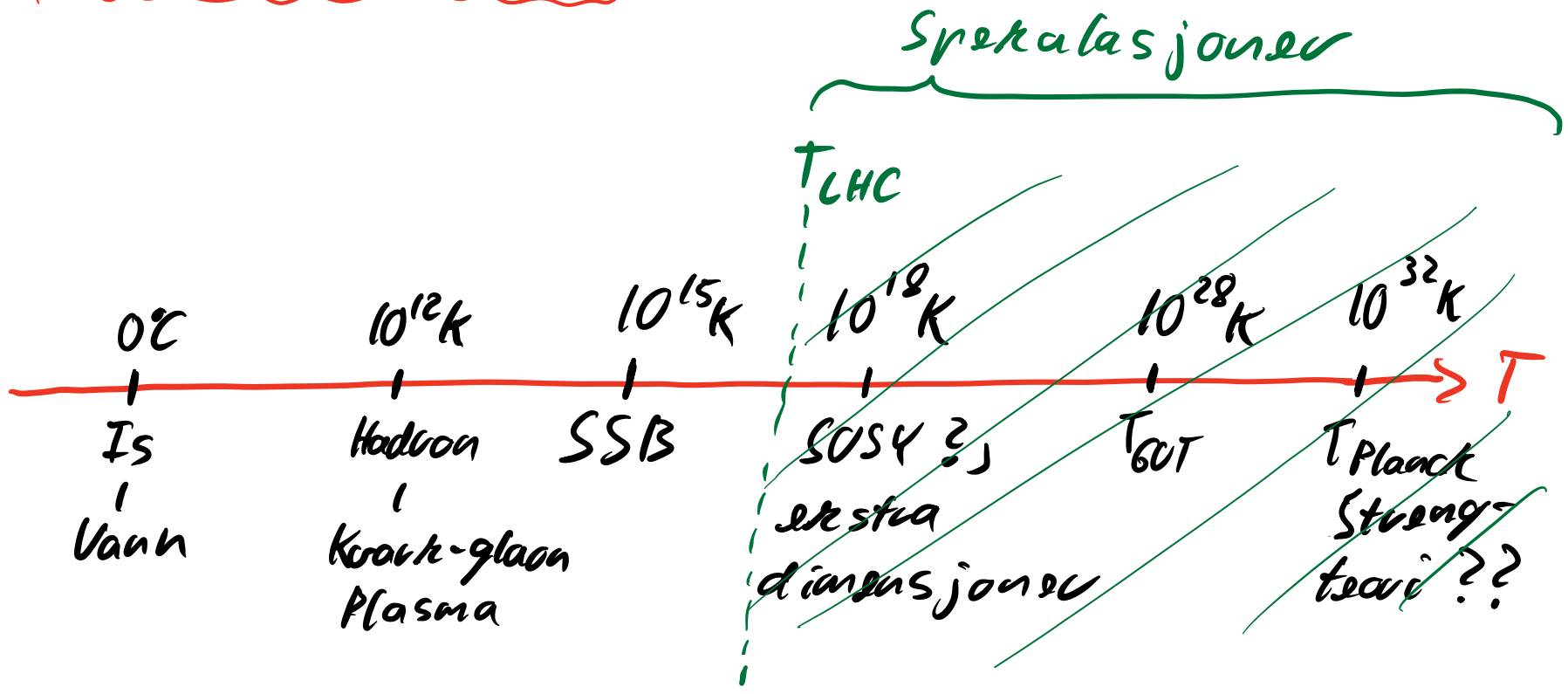
liten og  
kompakt

Kompaktifiser:  $M_{9,1} = M_{3,1} \times X$

$X$ : Gi opphav til Standard Modellen ++, som i Kalaza-Klein teori.

- For liten til at LHC kan direkte se det.

Temperatur diagram:



Tusen Takk for  
Oppmerksomheten!  
