



Universidade da Madeira

UMAstronomia

# *OS DEFEITOS DO NOSSO UNIVERSO*

*Angelino Gonçalves*

*VI Semana da Astronomia  
08 de Junho de 2006*

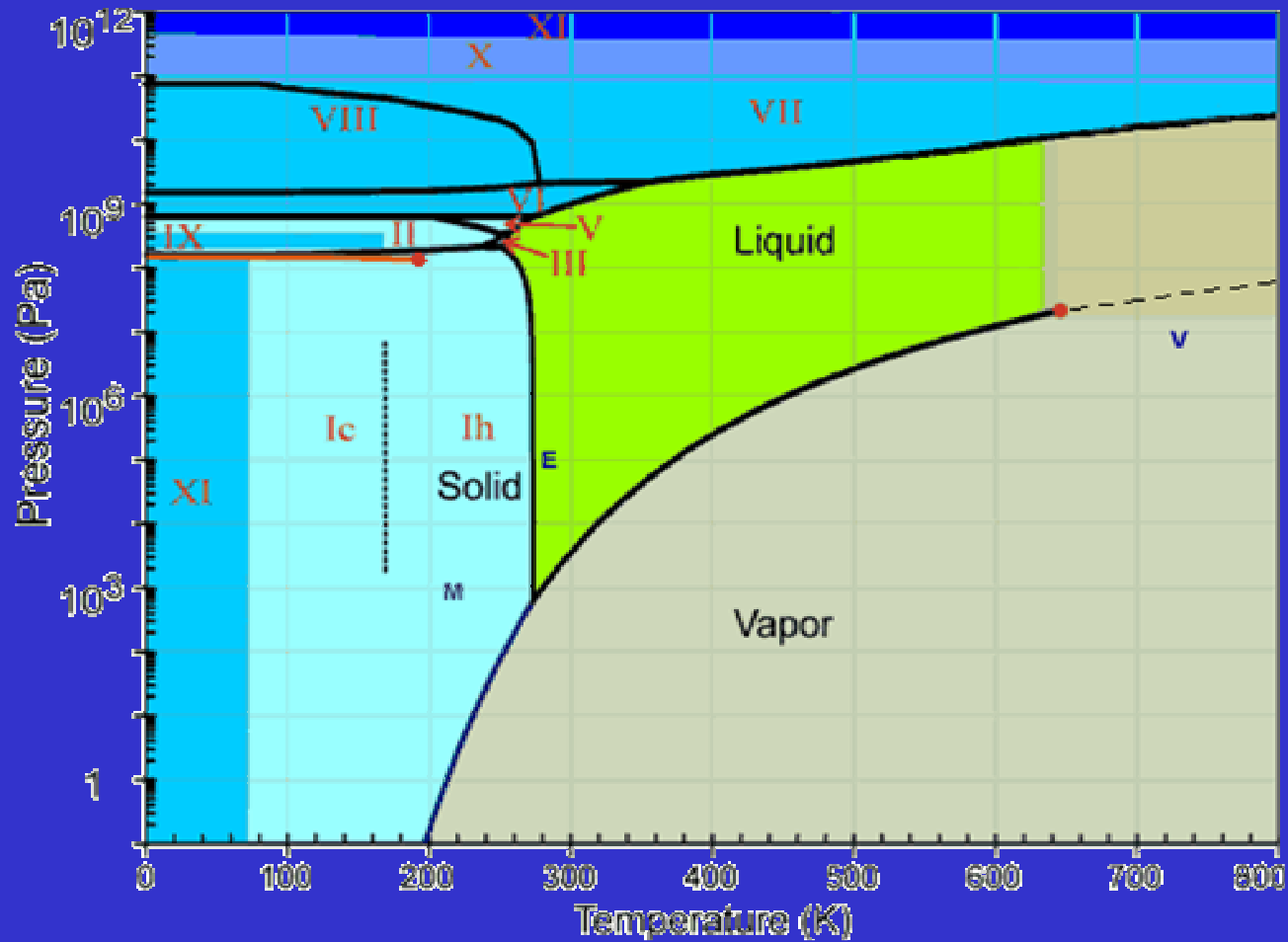


## *Transições de fase no Universo Jovem.*

**À medida que andamos para trás no tempo até ao momento da criação, o Universo torna-se cada vez mais quente e mais denso até que a matéria muda de fase, isto é, muda as suas propriedades e forma**

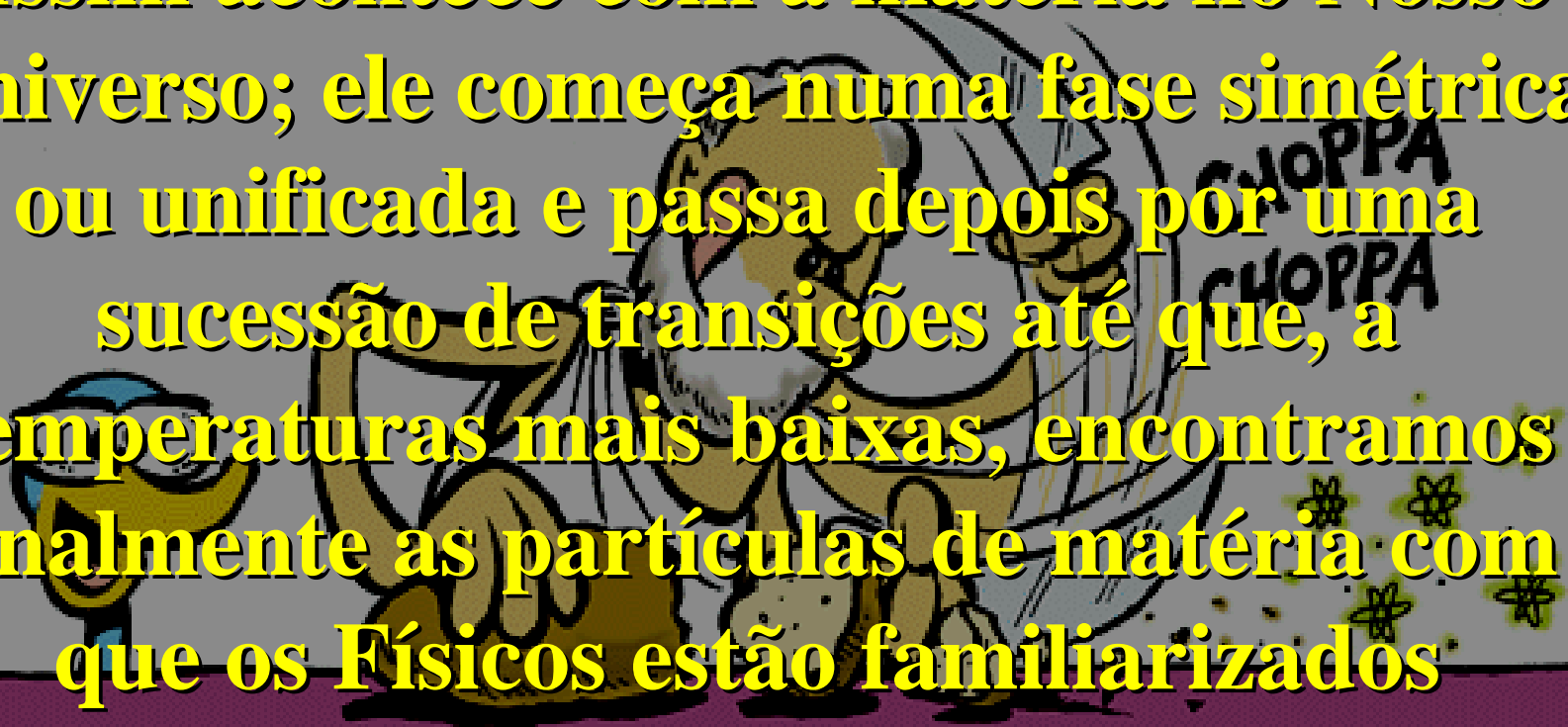


# Como por exemplo: água





Assim acontece com a matéria no Nosso Universo; ele começa numa fase simétrica ou unificada e passa depois por uma sucessão de transições até que, a temperaturas mais baixas, encontramos finalmente as partículas de matéria com que os Físicos estão familiarizados actualmente.





14 billion  
years

**As transições de fase podem ter implicações profundas na evolução e conteúdo do Nosso Universo.**

**Os dois conceitos chave**

**Unificação**

**Transição**

**são vitais para a nossa compreensão da Física das Partículas.**



## Unificação

A base da grande unificação é que as simetrias conhecidas das partículas elementares resultam de um grupo ainda maior de simetrias chamado o grupo **G**. Quando ocorre uma transição de fase, parte desta simetria é perdida, e por isso, o grupo de simetria muda.



Isto pode ser representado como:

$$G \rightarrow H \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \\ \rightarrow SU(3) \times U(1)$$

Cada seta representa uma transição de fase com quebra de simetria onde a matéria altera a sua forma.

Os grupos **G**, **H**, **SU(3)** etc. representam os diferentes tipos de matéria, especificamente a simetria que a matéria exhibe e estão associados com as diferentes forças fundamentais da natureza.



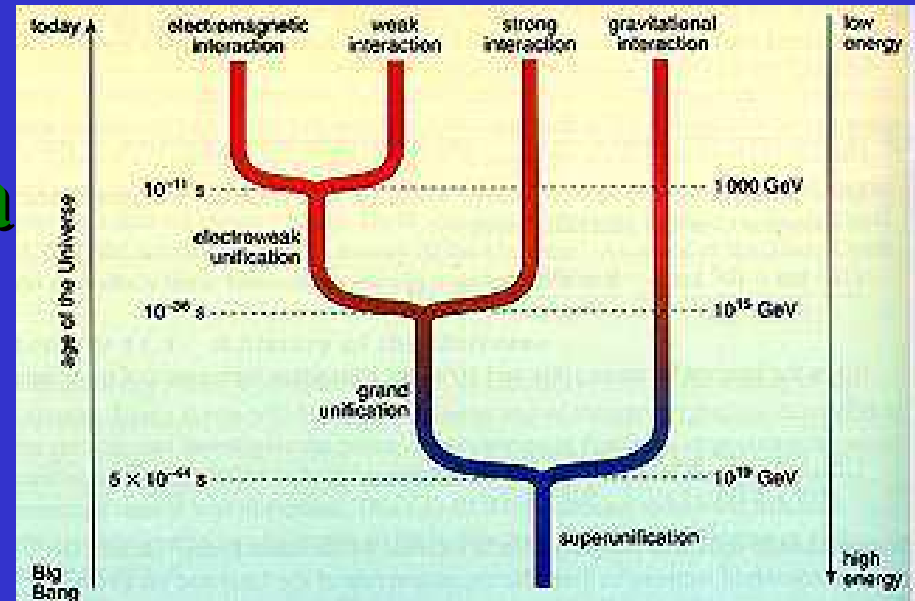
# As forças fundamentais são as seguintes:

Electromagnetismo

Força Nuclear Fraca

Força Nuclear Forte

Força Gravítica







# Electromagnetismo

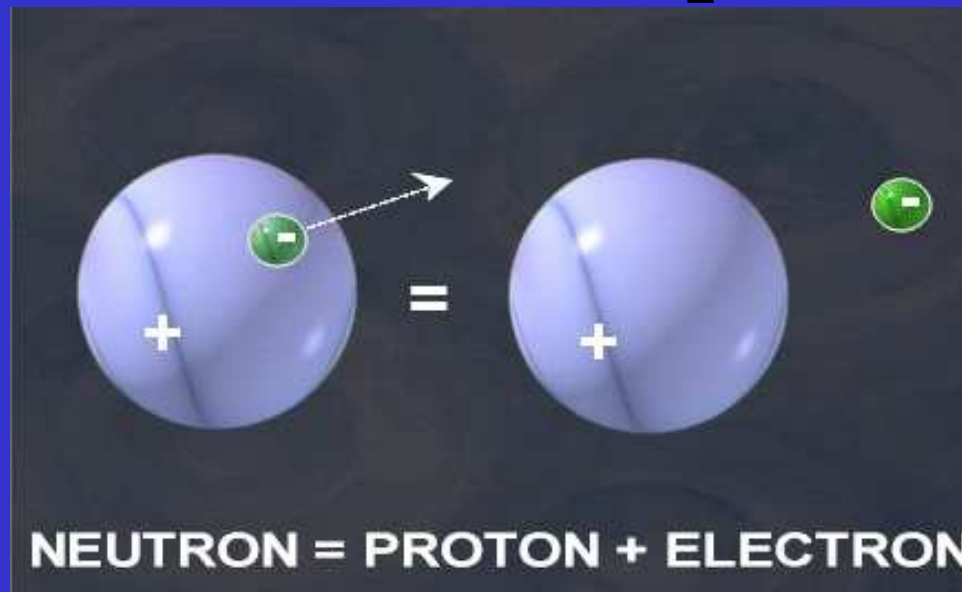
O grupo **U(1)** está associado com as forças eléctricas e magnéticas, isto é, fenómenos como a electricidade e a luz.

Foi a grande obra de Maxwell no fim do século **19** unificar os efeitos eléctricos e magnéticos numa única Teoria Matemática – **Electromagnetismo**.



## Força Nuclear Fraca

É a força nuclear associada à radioactividade em muitos núcleos instáveis. Está associada ao decaimento de um neutrão num próton.





A força nuclear fraca foi unificada com o electromagnetismo por Weinberg e Salam no fim da década de 70, na Teoria Electrofraca que é descrita pelo grupo

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

Previsões deste modelo já foram confirmados no acelerador de partículas CERN no início da década de 80.



# Força Nuclear Forte

O grupo **SU(3)** está associado com a força nuclear forte que une os prótons e os neutrões no interior do núcleo.

A teoria matemática que descreve as partículas elementares nesta Teoria – quarks e gluões – é conhecida como

**Cromodinâmica Quântica (QCD).**



**O modelo é bem compreendido, em princípio, mas na prática os cálculos quantitativos tornam-se muito difíceis.**

**Os modelos que unificam a Força Nuclear Forte com a Teoria Electrofraca são conhecidos como as Teorias da Grande Unificação ou GUT's.**



## ***Força Gravítica:***

**A força mais fraca de todas não está incluída nos modelos anteriormente mencionados. A unificação das outras forças fundamentais com a força gravítica é um dos grandes desafios intelectuais da Física Teórica. Um número de possibilidades existem, tais como a Teoria dos super - fios, e são conhecidos como Teorias do todo (TOE's).**



# *Transições de Fase.*

**O significado cosmológico da quebra de simetria é devido ao facto de que as simetrias são restabelecidas a altas temperaturas.**

**Para as temperaturas extremamente altas do Universo Primordial, podemos alcançar o estado da grande Unificação **G**.**



**Visto a partir do momento da criação, o Universo vai passar por uma sucessão de transições de fase no qual a força nuclear forte se tornará diferenciável e depois a força nuclear fraca e o eletromagnetismo.**





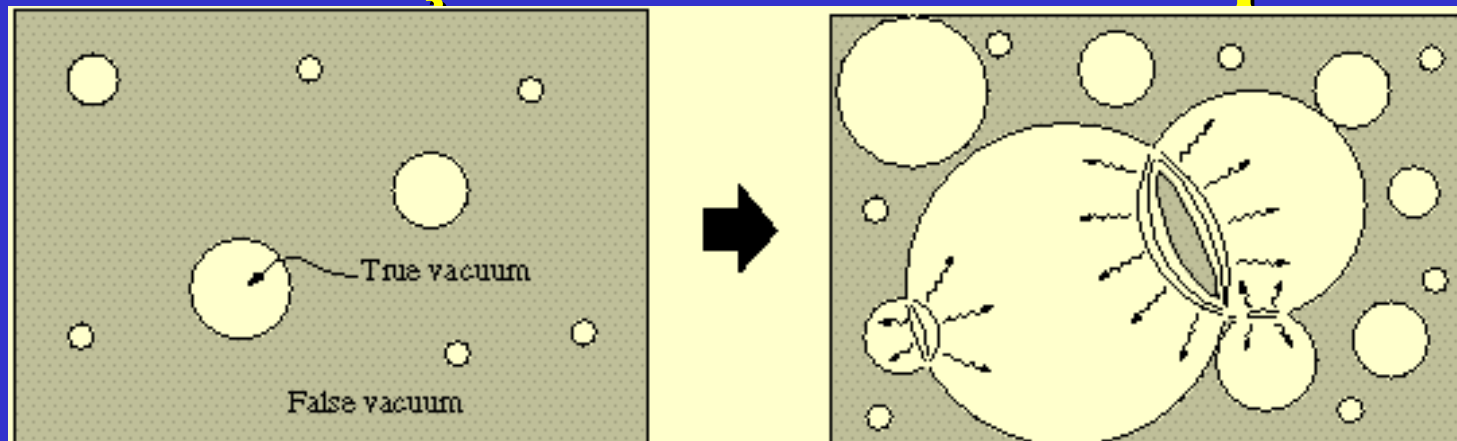
**As variações de fase podem ter uma variedade muito grande de implicações incluindo a formação de defeitos topológicos ou até pode desencadear um período de expansão exponencial (Inflação).**

**As transições de fase podem ser dramáticas (primeira ordem) ou suaves (segunda ordem)**



## Primeira Ordem

Estas transições de fase ocorrem pela formação de bolhas de uma nova fase no meio da fase anterior; estas bolhas expandem e colidem até que a fase anterior desapareça completamente e a transição de fase está completa.





## Segunda Ordem

Estas transições de fase, por outro lado, ocorrem de uma forma lisa. A fase antiga transforma-se na fase nova de uma forma contínua.



## O que são Defeitos Topológicos?

**Defeitos Topológicos são configurações estáveis de matéria que se formaram nas transições de fase no Universo Primordial. Estas configurações ainda estão no estado simétrico ou fase antiga.**

**Depois da transição de fase para a nova fase elas continuam mesmo depois de esta nova fase estar completa.**



**Podem existir vários tipos de defeitos, tais como**

**Paredes de domínio**

**Fios cósmicos**

**Monopolos**

**Texturas**

**Outras criaturas híbridas**

**O tipo de defeito é determinado pelas propriedades simétricas da matéria e da natureza da transição de fase.**



## Paredes de domínio

**Estes são objectos de duas dimensões que se formam quando uma simetria discreta é quebrada numa transição de fase.**

**Uma rede de paredes de domínio efectivamente separa o Universo em varias células.**



**As paredes de domínio tem propriedades muito peculiares.**

**Por exemplo, o campo gravitacional de uma parede de domínio é repulsivo em vez de atractivo.**



## Fios Cósmicos

Estes são objectos de uma dimensão que se formam quando uma simetria axial ou cilíndrica é quebrada.

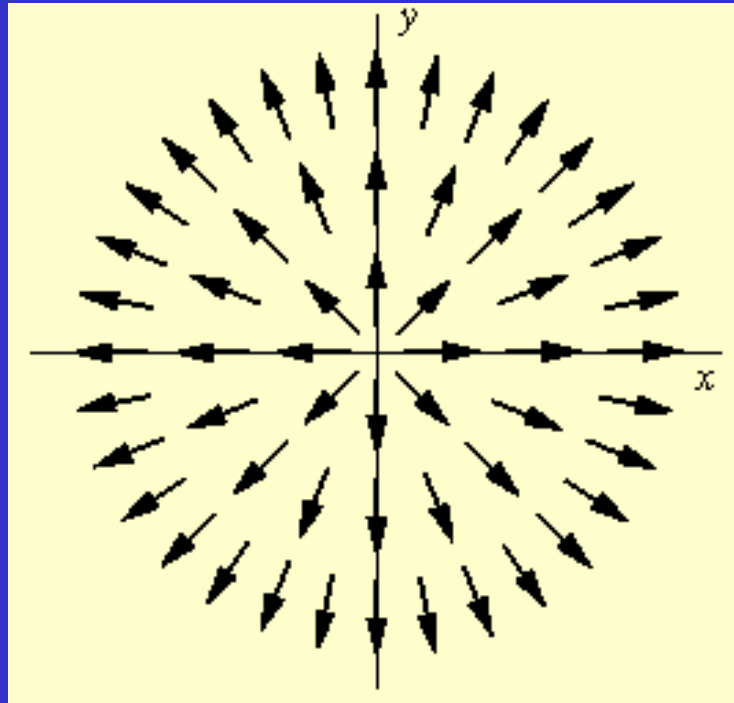
Os fios cósmicos podem ser associadas aos modelos da grande unificação na Física das Partículas, ou podem-se formar na escala da força electrofraca.

Eles são muito finos e podem ter o comprimento do Universo visível.





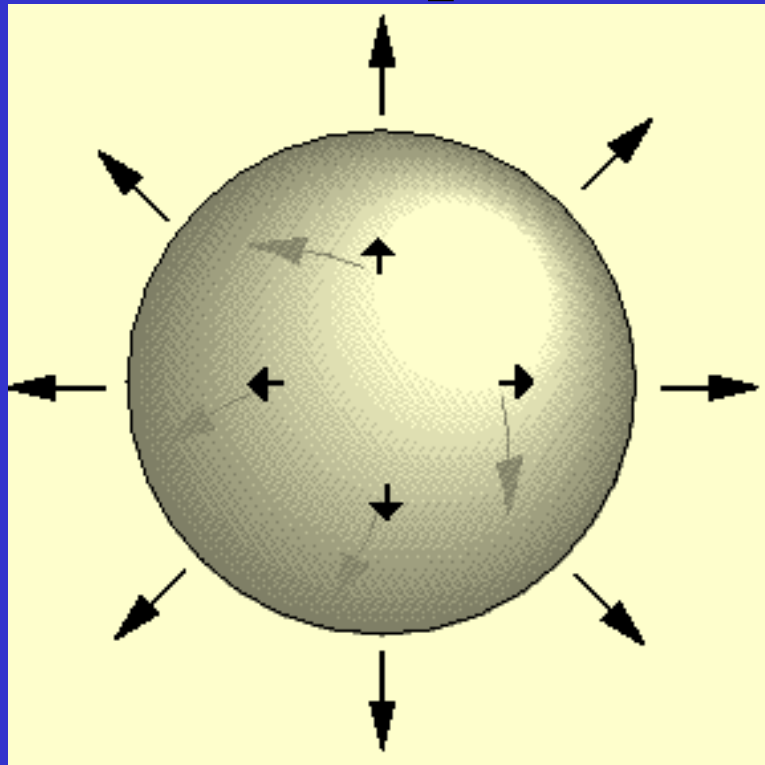
Um fio típico do GUT tem uma grossura que é inferior a  $10^{12}$  vezes o raio de um átomo de Hidrogénio. Mesmo assim, um comprimento de **10km** de um tal fio pode pesar tanto como a Terra.





# Monopolos

Estes objectos com dimensão zero (um ponto) formam-se quando a simetria esférica é quebrada.





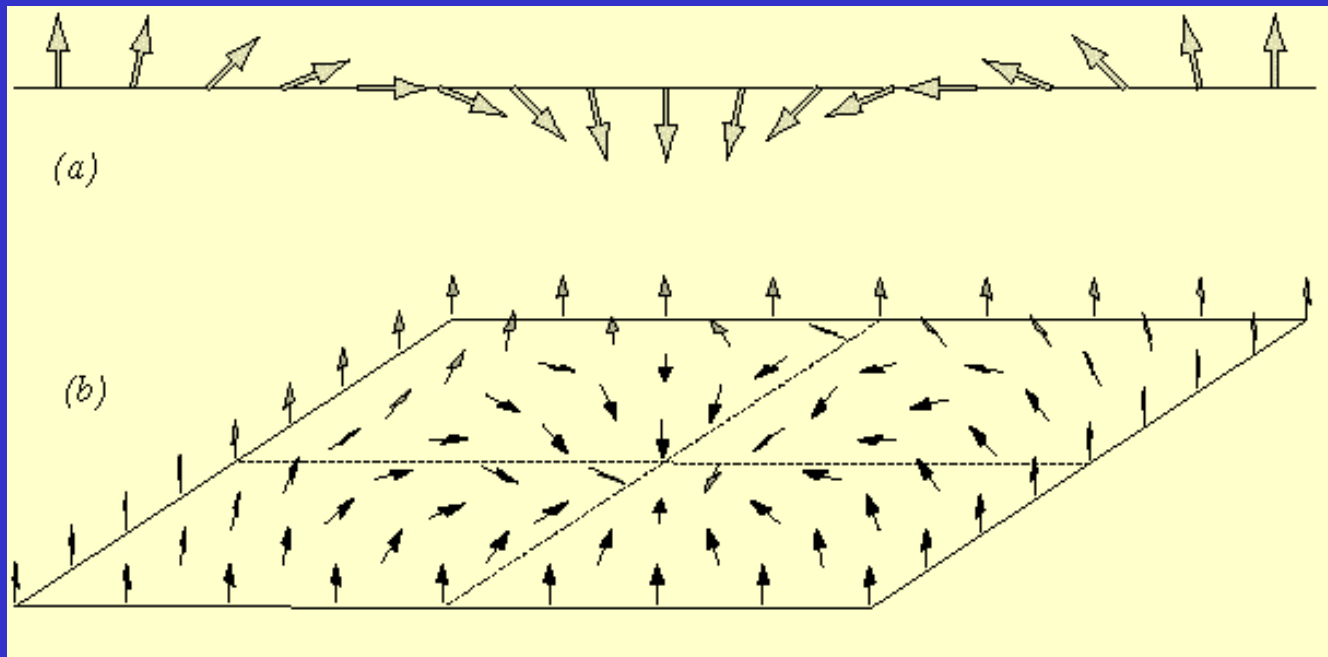
**A previsão é que os monopolos são enormes e têm carga magnética.**

**A existência de monopolos é uma previsão inevitável dos GUT's; isto constitui um dos dilemas da Cosmologia actual.**



# Texturas

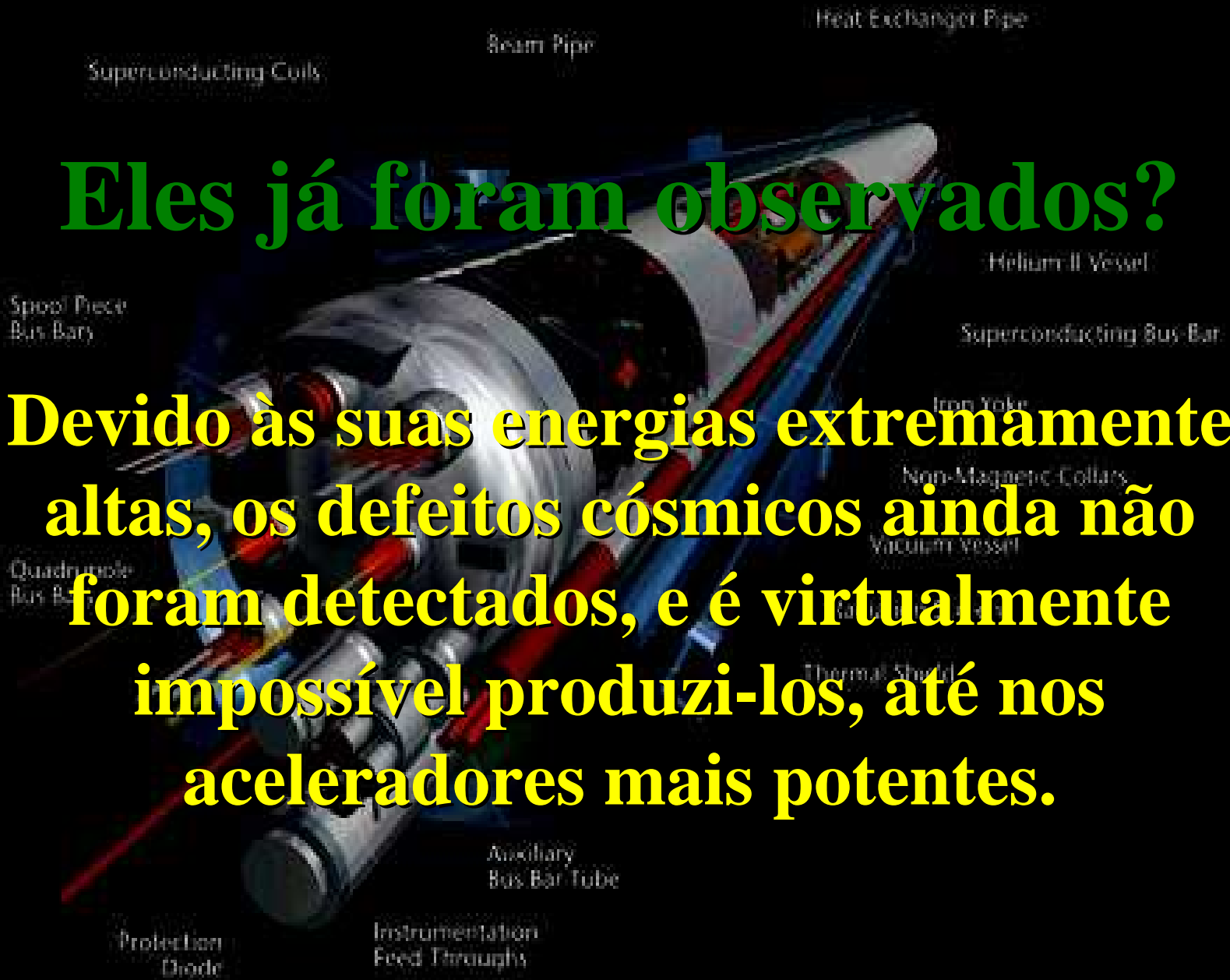
**Estes objectos formaram-se quando grupos de simetria maiores e mais complicados ficaram completamente quebrados.**





# Eles já foram observados?

Devido às suas energias extremamente altas, os defeitos cósmicos ainda não foram detectados, e é virtualmente impossível produzi-los, até nos aceleradores mais potentes.





**Por outro lado, isto é uma das razões pela qual as pessoas estão interessadas neles.**

**Se encontrarmos estes defeitos, eles constituiriam uma ligação directa à Física dos primeiros momentos do Universo.**



**Algumas buscas observacionais já estão em curso.**

**No entanto, os defeitos não são exclusivos do início do Universo.**

**Eles existem e já foram estudados numa grande variedade de coisas mais simples.**

**No laboratório, defeitos topológicos são observados regularmente em sistemas de matéria condensada.**



**Exemplos simples disto são os domínios num material ferromagnético, regiões em que os dipolos magnéticos estão alinhados, separados por paredes de domínio.**

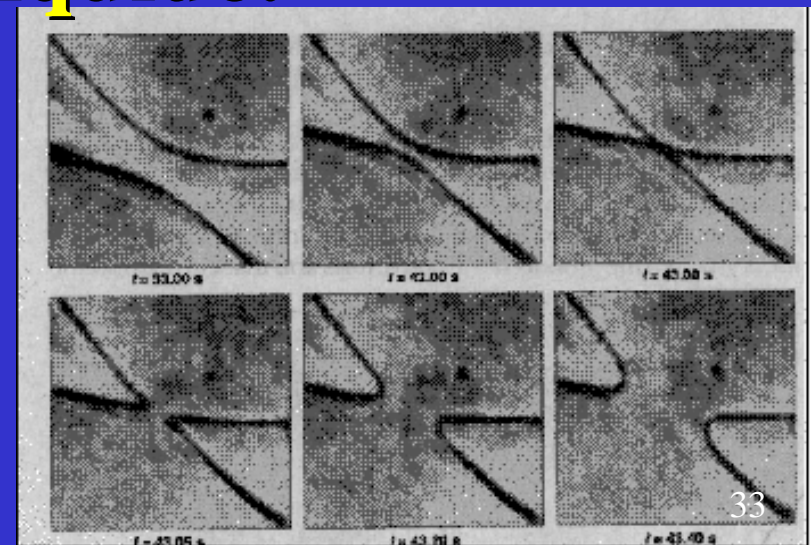
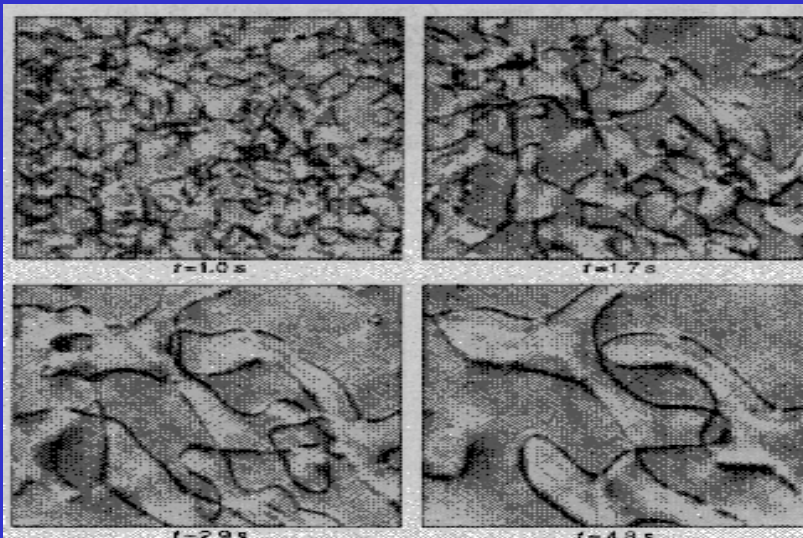
**Os cristais de líquidos exibem uma matriz de defeitos topológicos, tais como fios e monopolos.**





Os defeitos também podem ser encontrados em bioquímica, especialmente no processo de “protein folding”.

Podemos ver **2** fotografias de fios num cristal de líquido.





# Porque é que eles se formam?

Se os fios cósmicos ou outros defeitos topológicos se podem formar numa transição de fase cosmológica então eles vão se formar.

Isto é o que foi afirmado por Kibble, e no contexto cósmico, o processo da formação de defeitos é conhecido como o mecanismo de Kibble.



**Este facto simples é que os efeitos casuais de um Universo novo só se podem propagar (como em qualquer altura) com a velocidade da luz  $c$ .**

**Isto quer dizer que em qualquer tempo  $t$ , regiões do Universo separados por uma distância maior que a distância  $d=ct$  não podem saber nada umas sobre as outras.**



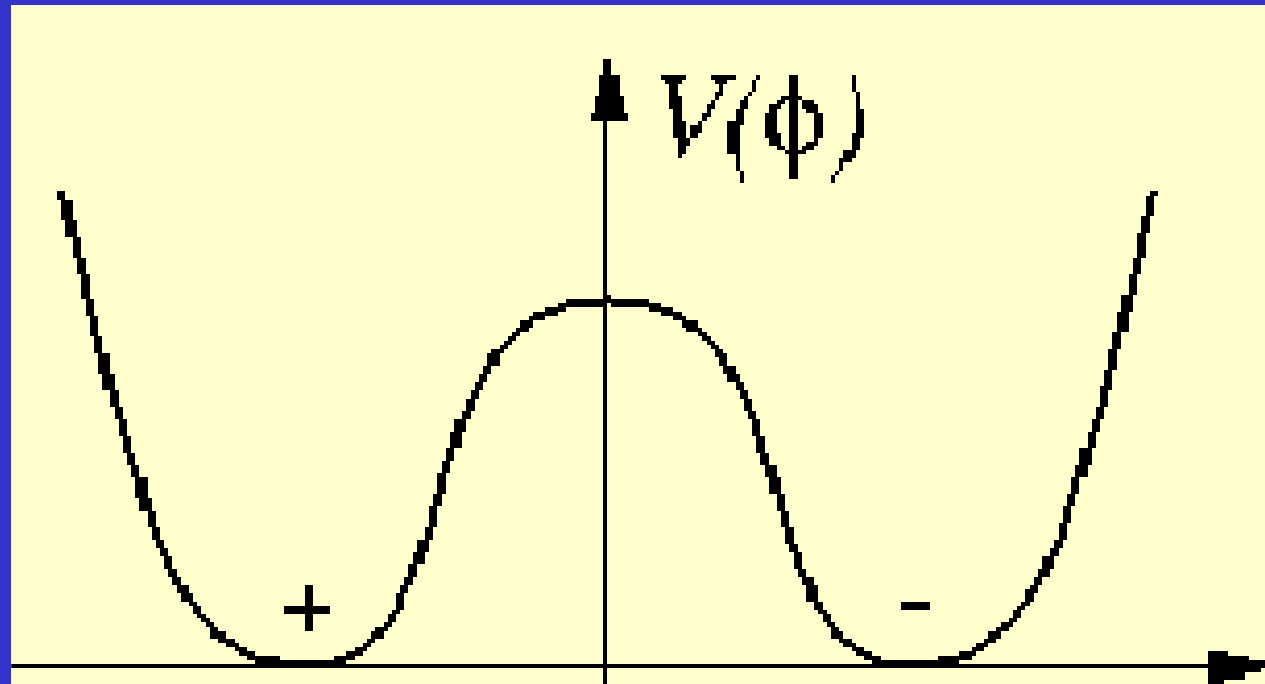
**Numa transição de fase onde há quebra de simetria, as diferentes regiões do Universo escolhem cair para mínima diferente num conjunto de estados possíveis (conhecido como “vacuum manifold”).**



**Os defeitos topológicos são as fronteiras entre estas regiões que escolhem mínima diferente, e a sua formação é por isso uma inevitável consequência do facto destas regiões não estarem de acordo na escolha.**

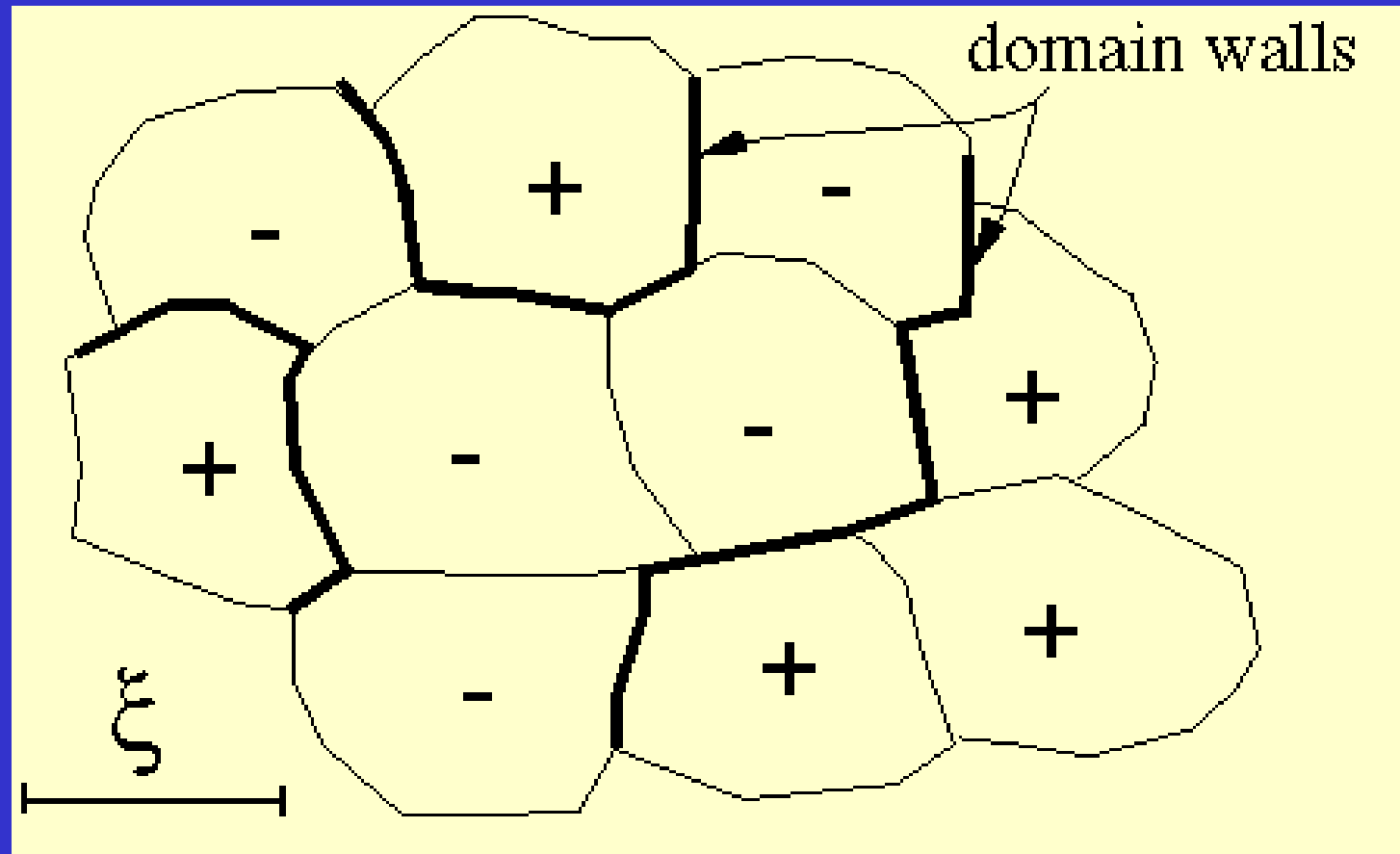


Por exemplo, numa teoria com dois  
mínima, mais (+) e menos (-), as regiões  
vizinhas separadas por mais que  $ct$  vão  
tender a caírem aleatoriamente em dois  
estados diferentes.



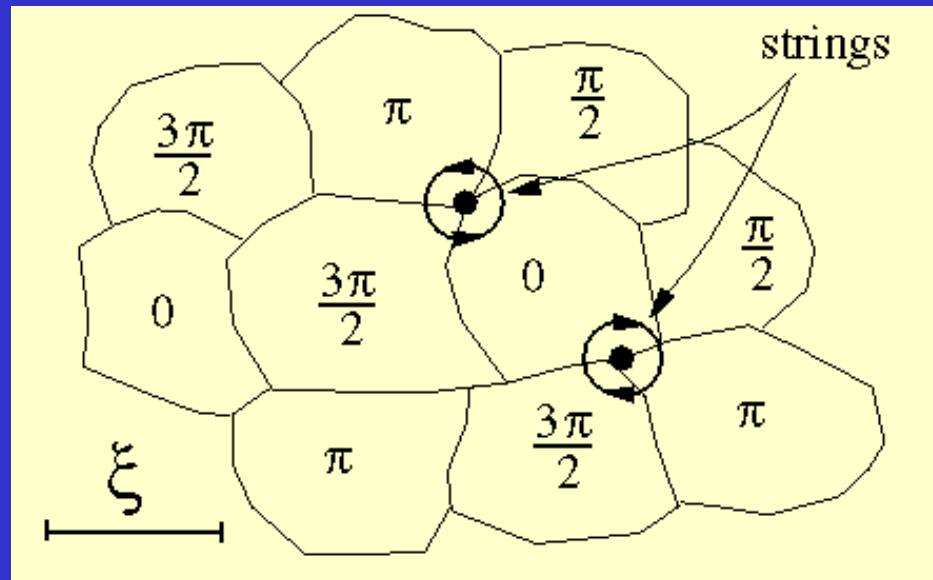


**Interpolando entre estas mínimas diferentes estará um parede de domínio.**





Os fios cósmicos aparecem em teorias ligeiramente mais complicadas em que o estado de energia mínima possui ‘buracos’. Os fios simplesmente correspondem a “torcidas” não triviais à volta destes buracos.







14 billion  
years

# Porque é que as queremos estudar?

8 billion  
years

1 billion  
years

1000 K

500 K

**Eles dão-nos uma ligação única à Física do início do Universo como foi explicado anteriormente.**

**Para além disto, eles podem influenciar de uma forma crucial a evolução do Universo.**



**Uma vez que eles necessariamente têm de se formar, o seu estado é uma parte inevitável de qualquer tentativa séria para compreender o Universo no seu início.**

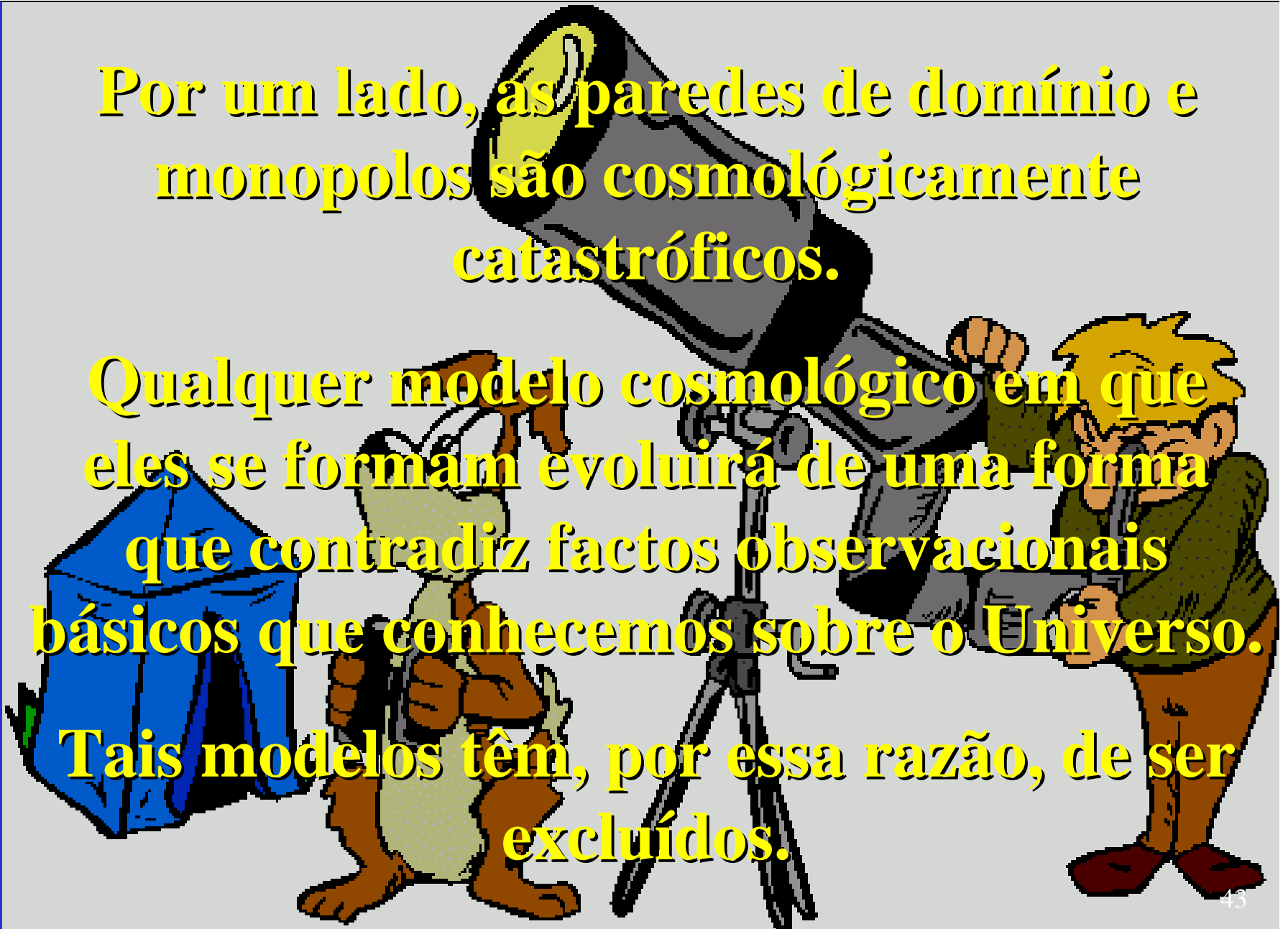
**As consequências detalhadas variam com o tipo de defeito que é considerado.**



Por um lado, as paredes de domínio e monopolos são cosmologicamente catastróficos.

Qualquer modelo cosmológico em que eles se formam evoluirá de uma forma que contradiz factos observacionais básicos que conhecemos sobre o Universo.

Tais modelos têm, por essa razão, de ser excluídos.





**Por outro lado, os fios cósmicos e possivelmente as texturas são muito mais complacentes.**

**Entre outras coisas, eles podem ser as sementes que levaram à formação das estruturas de grandes escalas que observamos actualmente, tal como as anisotropias na radiação cósmica de fundo.**



**Eles também podem ser a origem de alguma da matéria escura no Universo.**

**No entanto, antes de podermos analisar todos estes cenários, devemos ter a certeza que compreendemos como é que as físi evoluem.**

**Para fazer isto, temos que utilizar inevitavelmente, simulações numéricas.**



**Como é que os fios evoluem?**  
A evolução da rede de fios cósmicos é o resultado complicado de apenas três processos relativamente simples e fundamentais: a expansão cosmológica, “intercommuting” e a produção de argolas, e radiação.





# Expansão Cosmológica

A expansão do Universo como um todo vai esticar os fios, tal como qualquer outro objecto que não esteja gravitacionalmente ligado.

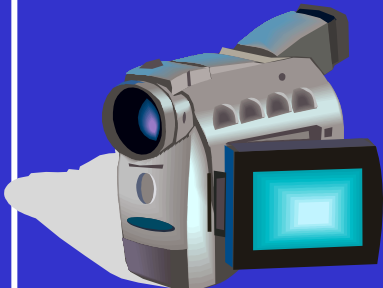




## “Intercommuting” e a produção de argolas.

Quando dois fios se cruzam, eles vão trocar pontas, ou “intercommute”.

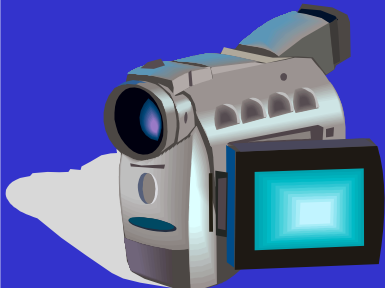
Este facto, aparentemente estranho, já foi encontrado quando discutimos os fios no contexto dos cristais de certos líquido.







**Em particular, um fio comprido pode “intercommute” com o próprio fio, e neste caso um argola será produzida.**

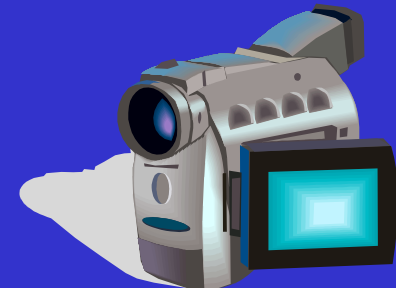
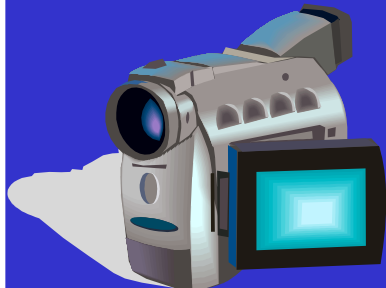




# Radiação

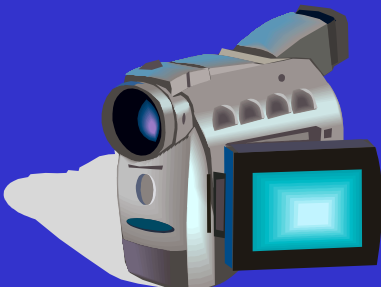
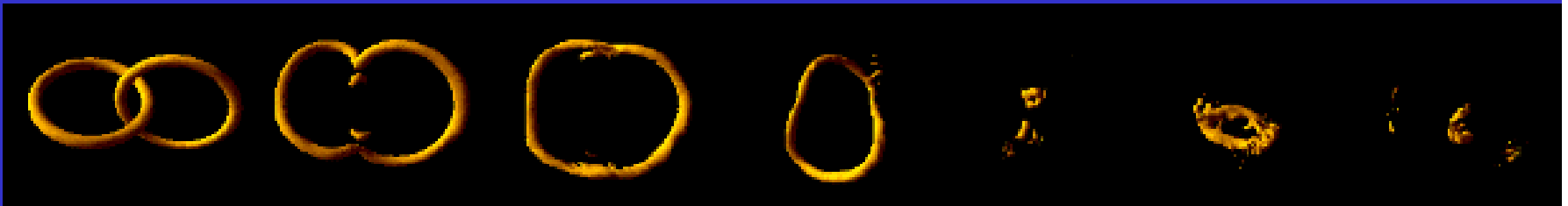
**Tanto os fios cósmicos compridos como as argolas vão emitir radiação.**

**Na maioria dos cenários esta será radiação gravitacional, mas radiação electromagnética ou axiões também podem ser emitidos nalguns casos.**





**O efeito da radiação é muito mais dramático para as argolas, devido ao facto destas perderem toda a sua energia desta forma, e eventualmente desaparecerem.**





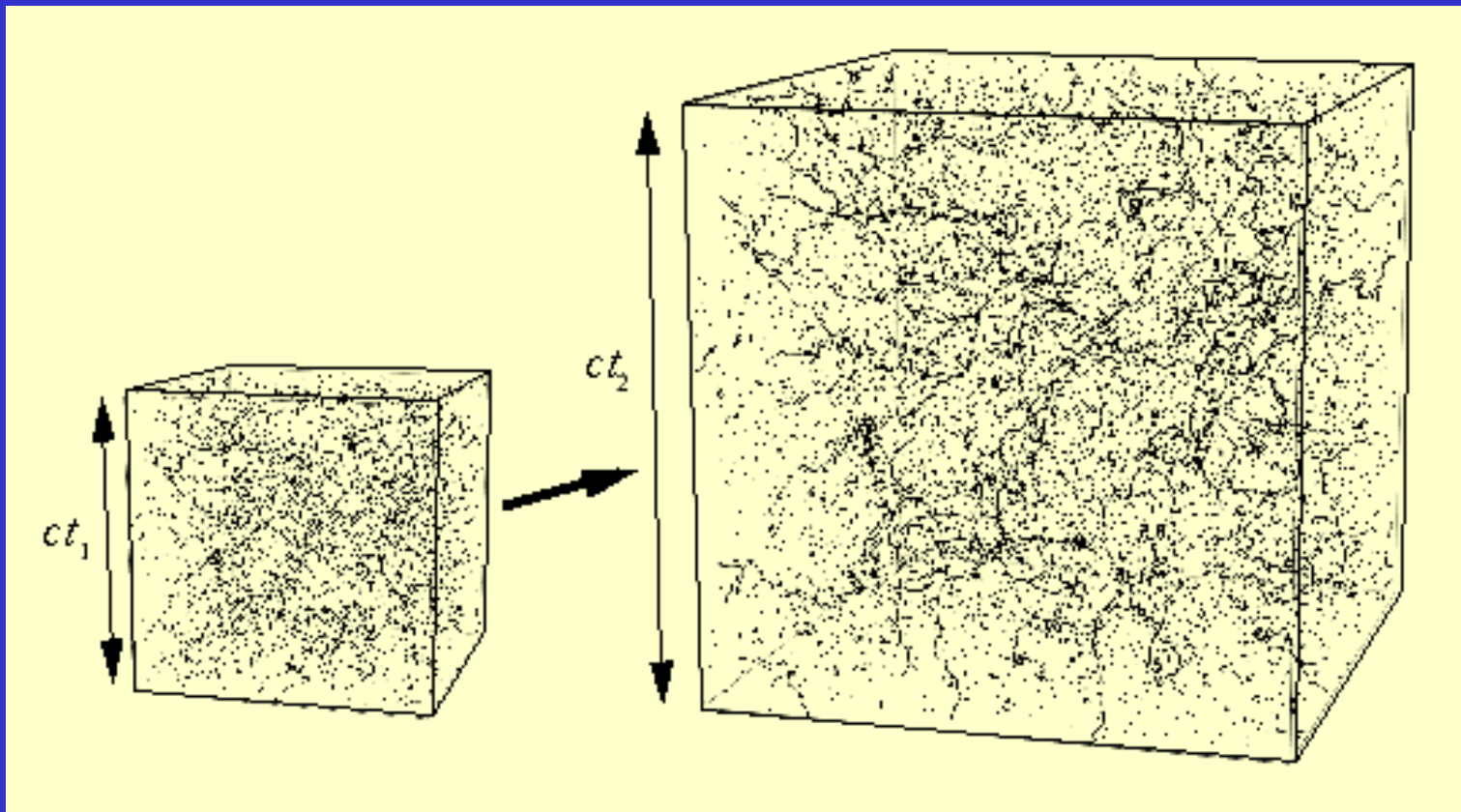
*Então, qual é o efeito global*

**Depois de se formar, uma rede de fios inicialmente com uma elevada densidade, começa a partir-se, produzindo pequenas argolas.**

**Estas argolas oscilam rapidamente (relativisticamente) e decompõem-se em ondas gravitacionais.**



O resultado global é que os fios ficam cada vez mais diluídos com o tempo conforme o Universo vai expandindo.





A partir de uma enorme densidade na formação, modelos matemáticos sugerem que actualmente haverá apenas uns **10** fios compridos esticados pelo Universo observável, em conjunto com umas **1000** argolas pequenas.



**De facto as dinâmicas de rede são de tal forma que a densidade de fios vai eventualmente estabilizar num nível constante exacto relativo ao resto da radiação e densidade de matéria no Universo.**



**Por isso a evolução de fios é descrita como de escala ou escala – invariante.**

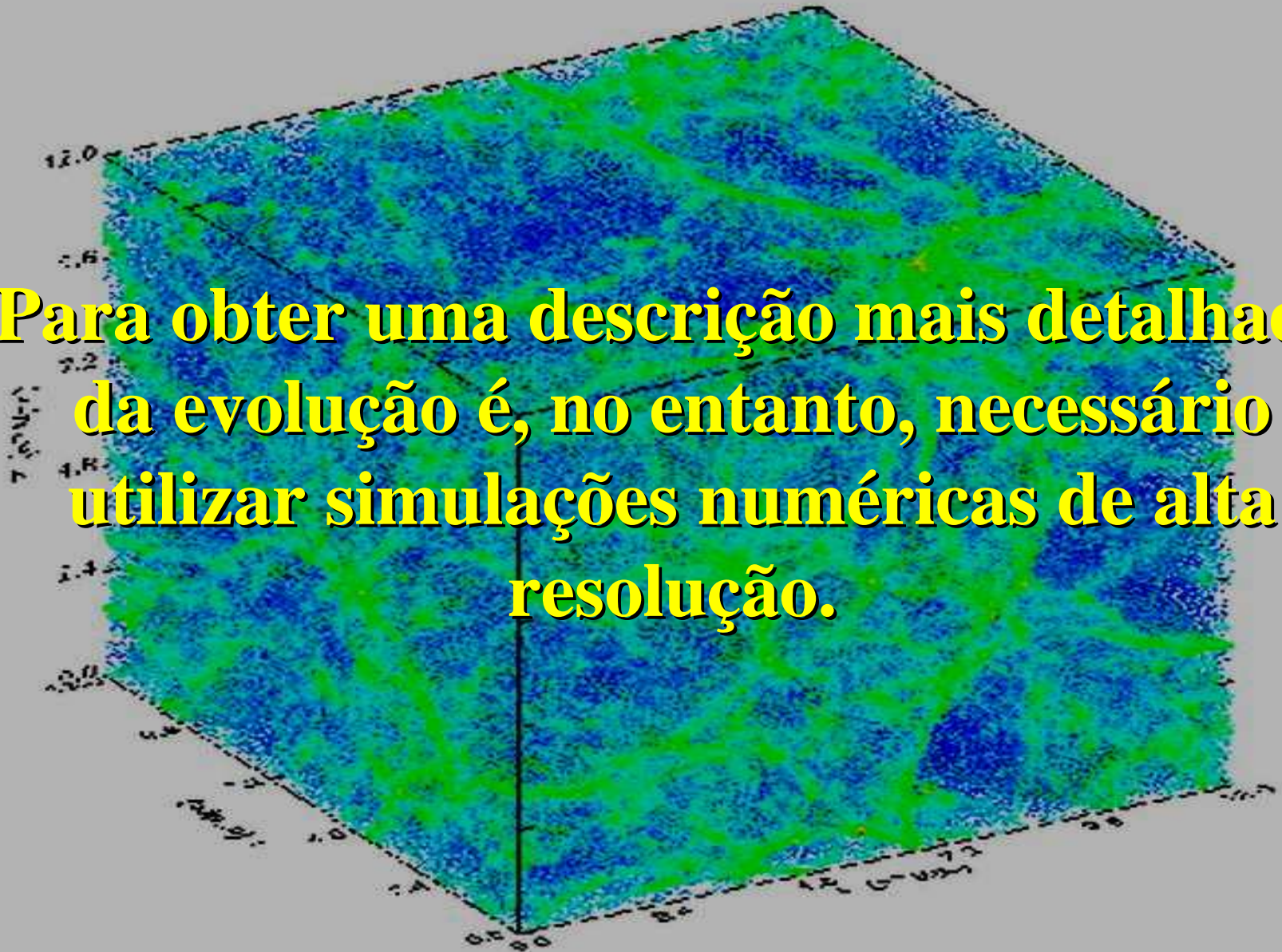
**As propriedades da rede parecem ser as mesmas em qualquer tempo  $t$  se elas forem escaladas (multiplicadas pela variação de tempo).**

Singularity





Para obter uma descrição mais detalhada da evolução é, no entanto, necessário utilizar simulações numéricas de alta resolução.





**Porque é que necessitamos de simulações numéricas?**

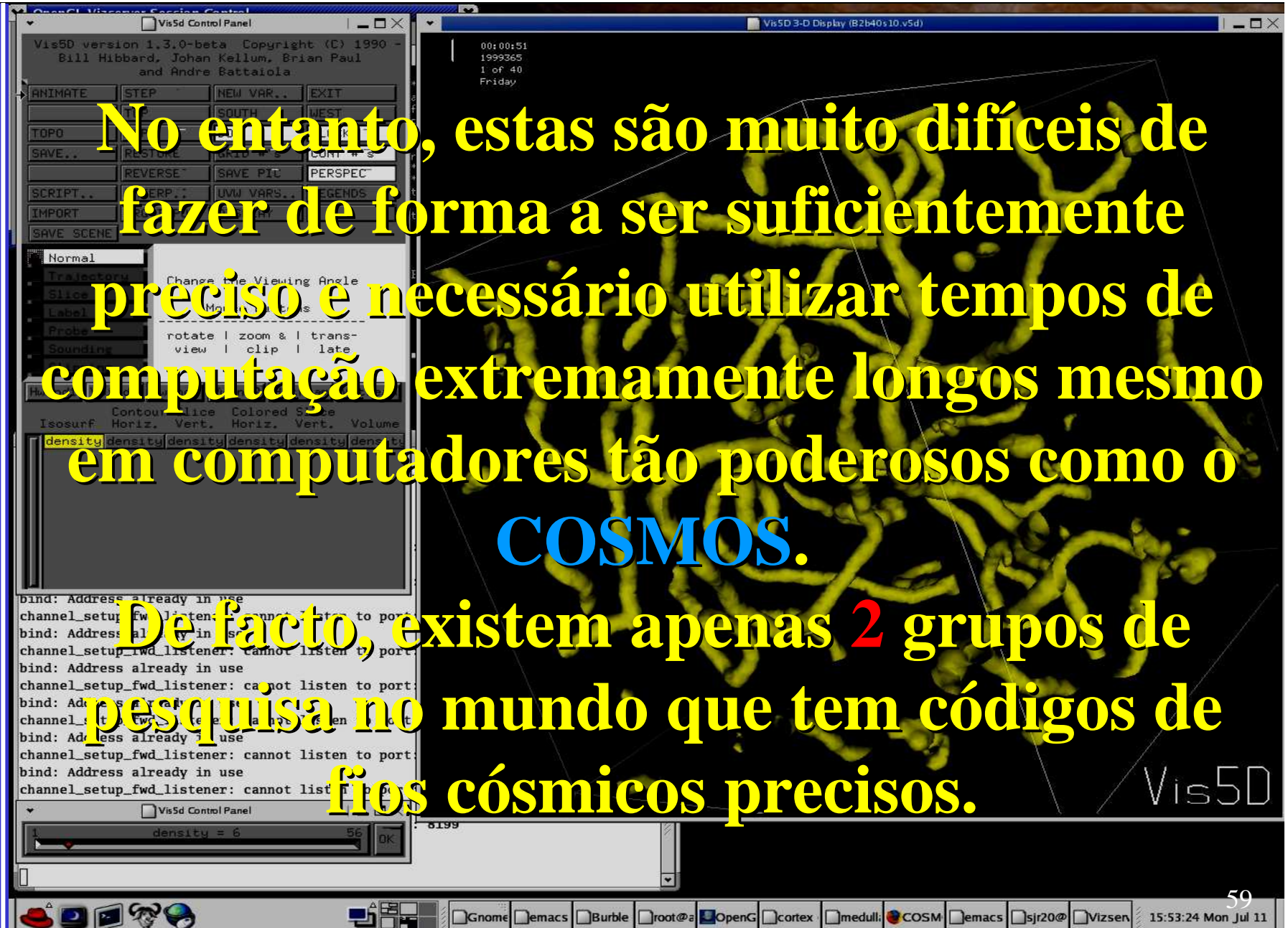
**Porque os fios são objectos não-lineares extremamente complexos.**

**A única forma rigorosa de estudar a sua evolução e consequências cósmicas é por isso a simulação num computador.**



No entanto, estas são muito difíceis de fazer de forma a ser suficientemente preciso e necessário utilizar tempos de computação extremamente longos mesmo em computadores tão poderosos como o COSMOS.

De facto, existem apenas 2 grupos de pesquisa no mundo que tem códigos de fios cósmicos precisos.





**Por isso, um dos objectivos de fazer simulações precisas da evolução de redes de fios é utilizar essa informação como uma base para construir modelos matemáticos (relativamente) simples que reproduzem (no sentido da média) as propriedades cruciais desses objectos.**



# Os fios cósmicos e a estrutura de grande – escala

## *A motivação*

**Um dos problemas que presentemente ainda está por resolver na cosmologia é a compreensão da formação de estrutura no Universo, isto é, a origem de galáxias e outras estruturas de grande - escala.**



**As teorias existentes para a formação de estrutura no Universo pertencem a uma de duas categorias:**

**Baseando-se na amplificação de flutuações quânticas num campo escalar durante a inflação**

**Quebra de simetria durante uma transição de fase num Universo muito jovem que leva à formação de defeitos topológicos.**



## *O mecanismo*

**Os fios cósmicos aparecem na forma de transportadores de energia, resultante da quebra de simetria na transição de fase no Universo jovem.**

**Por meio de interações gravitacionais, eles funcionam como sementes para a formação de estrutura atraindo a matéria vizinha.**



**Em termos de relatividade, podemos ver o caminho geodésico da luz que é deflectida para uma fio quando a luz passa por ele.**

**Os fios semeiam perturbações na densidade de matéria - energia do Universo.**





## As simulações

Para investigar a formação de estrutura pelo meio de fios cósmicos, primeiro fazemos simulações de alta resolução.

Depois utilizamos esta rede de fios para servirem como sementes de perturbações gravitacionais.

Agora já podemos estudar os efeitos dos fios sobre os vários modelos cosmológicos.

