

O COMEÇO DO UNIVERSO

O BIG-BANG



(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

ESTÁGIOS INICIAIS DO UNIVERSO

No modelo padrão do Big-Bang, de acordo com as equações de Friedmann, os estágios iniciais do universo são caracterizados por condições de alta densidade ρ e alta temperatura T .

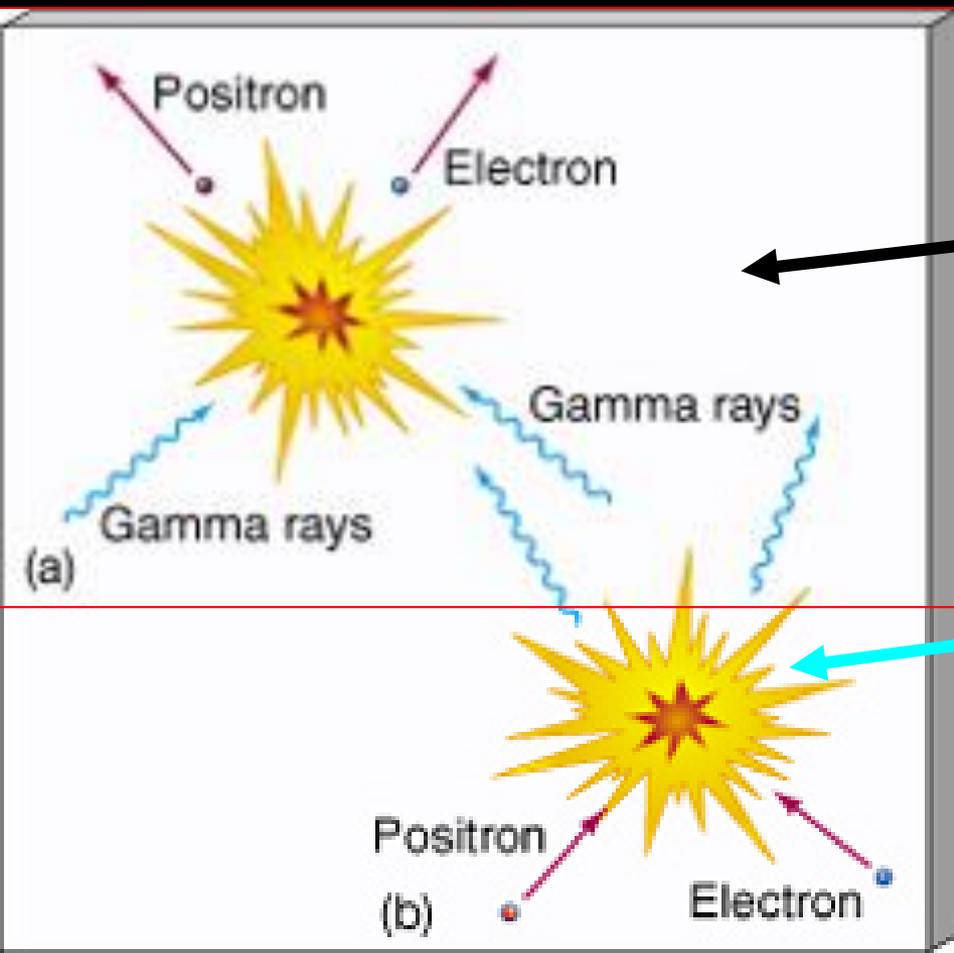
Como se comportava a energia e matéria no universo dentro destas condições?



Chave para o entendimento: processo de interação chamado produção de pares

Produção de pares = 2 fótons dão origem a um par partícula- antipartícula

Exemplo para pósitron (e^+) e elétron (e^-)



(a) matéria é criada diretamente da energia (radiação eletromagnética).

(b) processo reverso: partícula e antipartícula aniquilam-se para produzir radiação.

Acima de uma certa T (alta energia de colisão) há **criação** e **aniquilação** contínua de **MATÉRIA-ANTIMATÉRIA.**

A medida que o universo se expande

⇒ **universo se resfria**

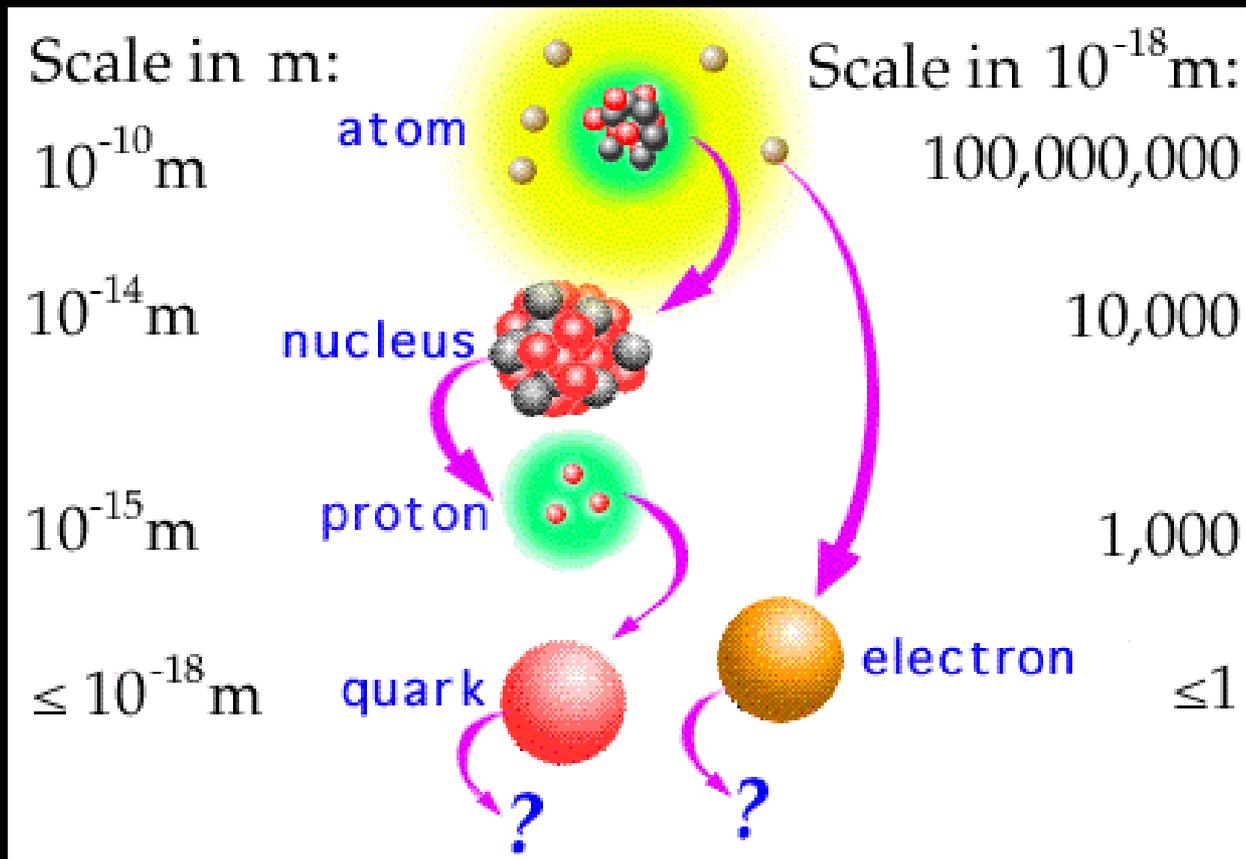
⇒ **fótons diminuem sua energia**

⇒ **até não ser mais possível a formação de qualquer partícula por este meio.**

RESUMO

A uma dada T temos um universo constituído de
QUARKS-ANTIQUARKS + ELÉTRONS-ANTIÉLÉTRONS +
NEUTRINOS-ANTINEUTRINOS + RADIAÇÃO (FÓTONS)

QUARKS = FORMAM OS PRÓTONS E NÊUTRONS

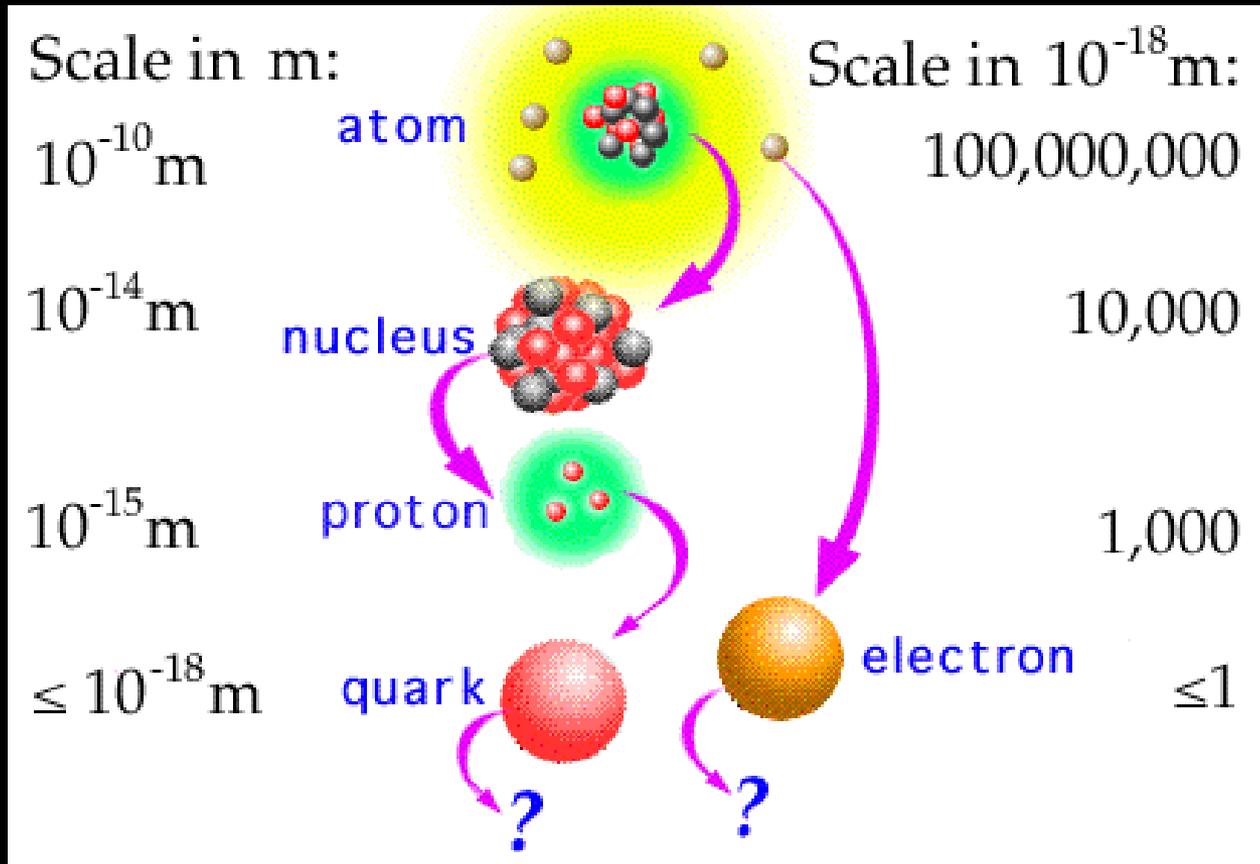


RESUMO

Matéria é constituída de:

1. LÉPTONS (elétrons, neutrinos)

2. QUARKS (formam os prótons, nêutrons, etc..)



RESUMO

A medida que o universo se expandiu

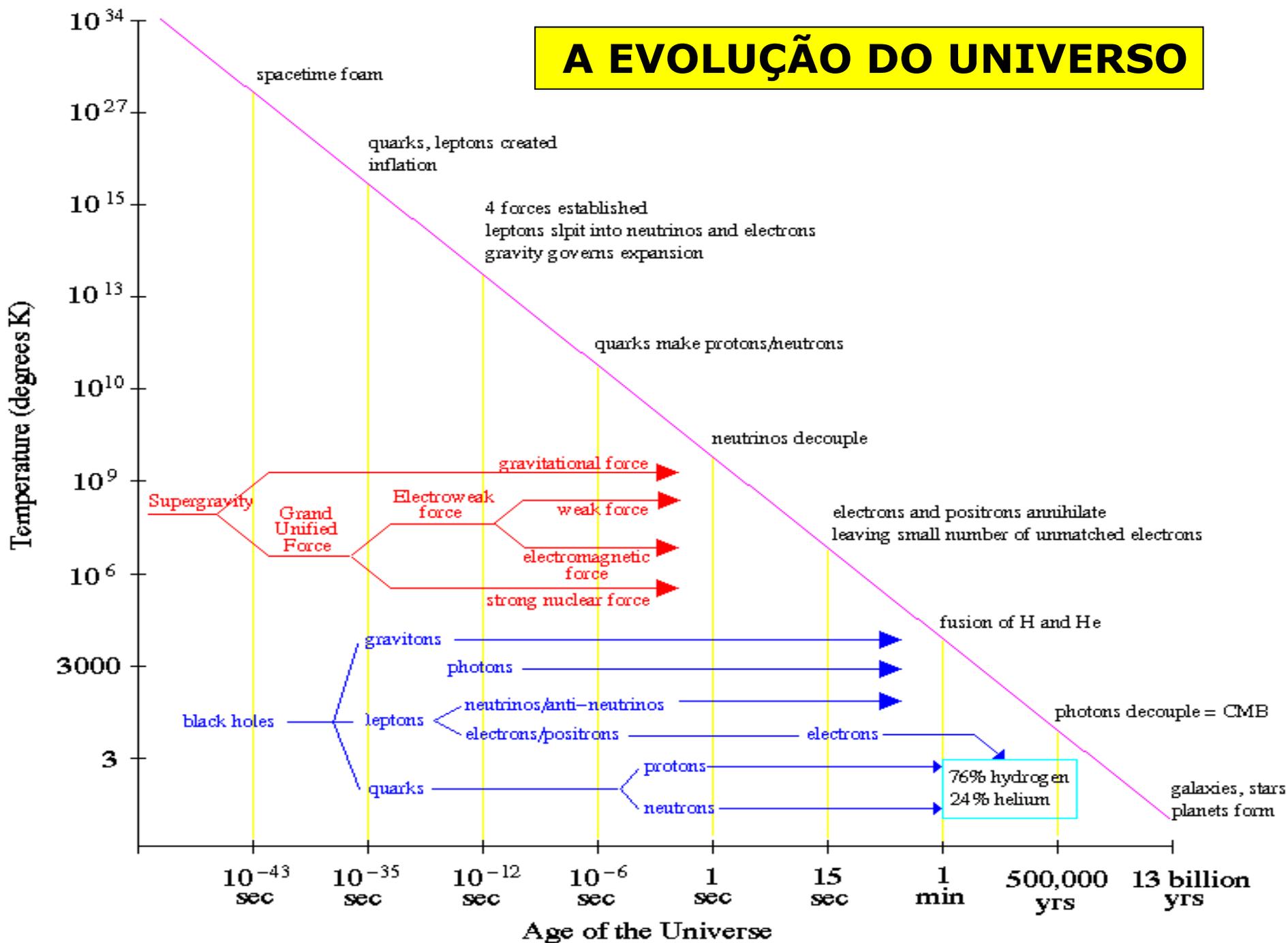
- ⇒ $T <$ temperatura limite T_L para formação de partículas
- ⇒ ocorre uma assimetria : quantidade de matéria resultante foi maior do que a de antimatéria.

Isso fez com que a toda a matéria não fosse aniquilada pela antimatéria, resultando no universo observado hoje que é composto de matéria.

A medida que T foi diminuindo:

- ⇒ a matéria foi se agrupando e formando estruturas cada vez mais complexas: átomos ⇒ planetas ⇒ estrelas ⇒ galáxias ⇒ estrutura em grande escala

A EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

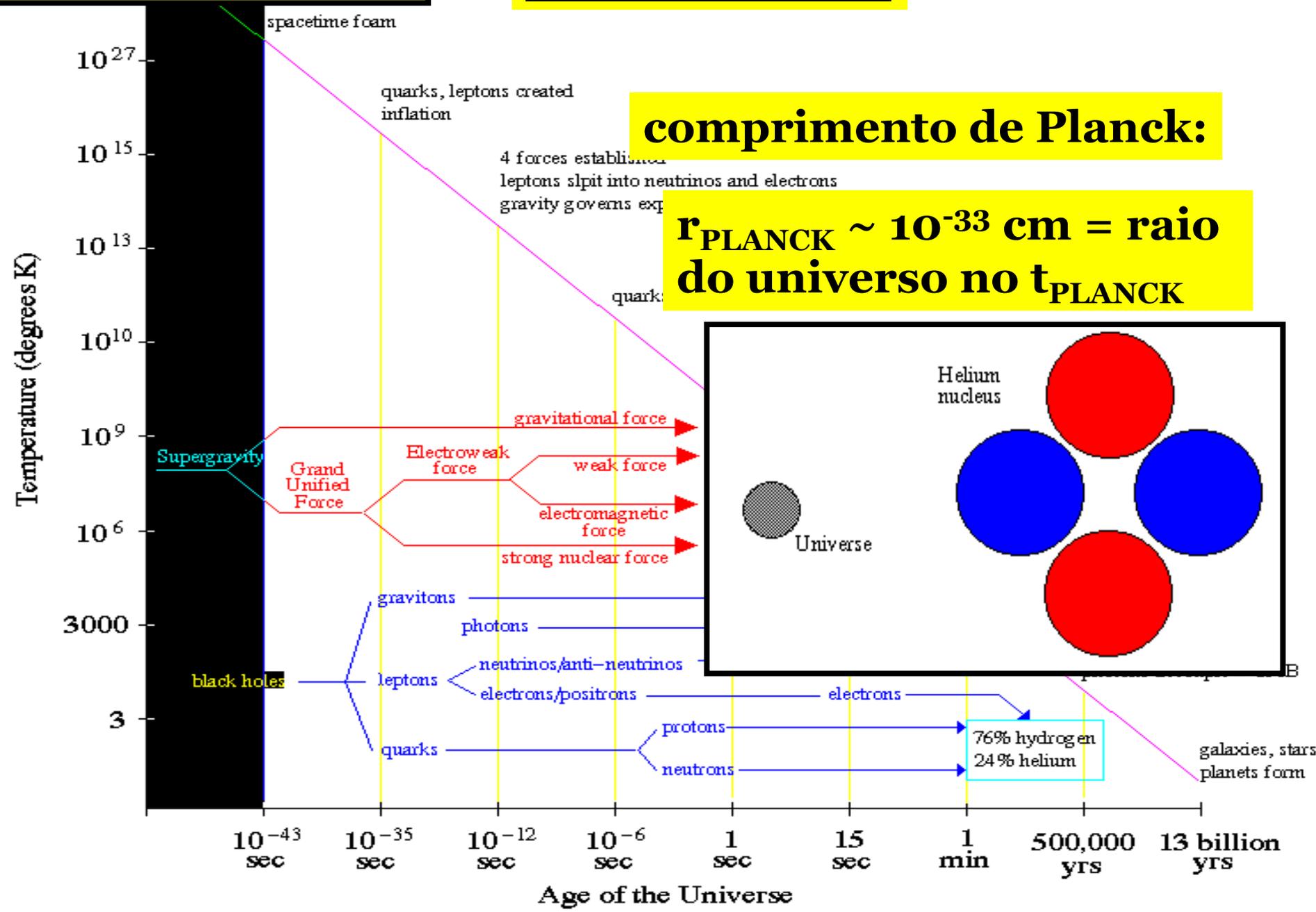


$t < 10^{-43}$ s , $T > 10^{32}$ K

ERA DE PLANCK

comprimento de Planck:

$r_{\text{PLANCK}} \sim 10^{-33}$ cm = raio do universo no t_{PLANCK}



ERA DE PLANCK

Leis conhecidas da física não podem explicar a evolução do universo neste tempo

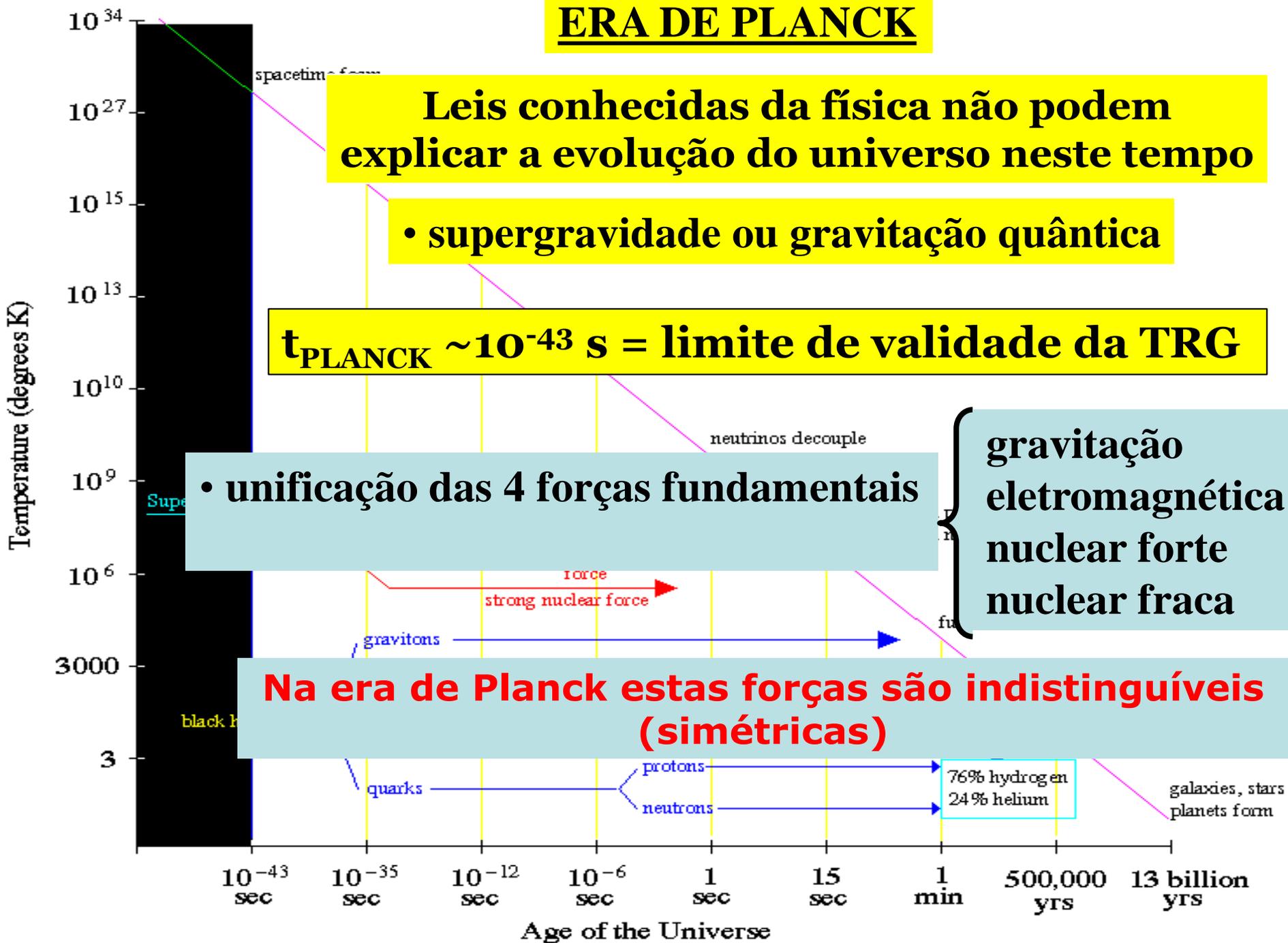
- supergravidade ou gravitação quântica

$t_{\text{PLANCK}} \sim 10^{-43} \text{ s} = \text{limite de validade da TRG}$

- unificação das 4 forças fundamentais

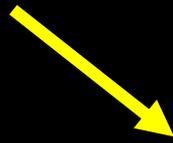
gravitação
eletromagnética
nuclear forte
nuclear fraca

Na era de Planck estas forças são indistinguíveis (simétricas)



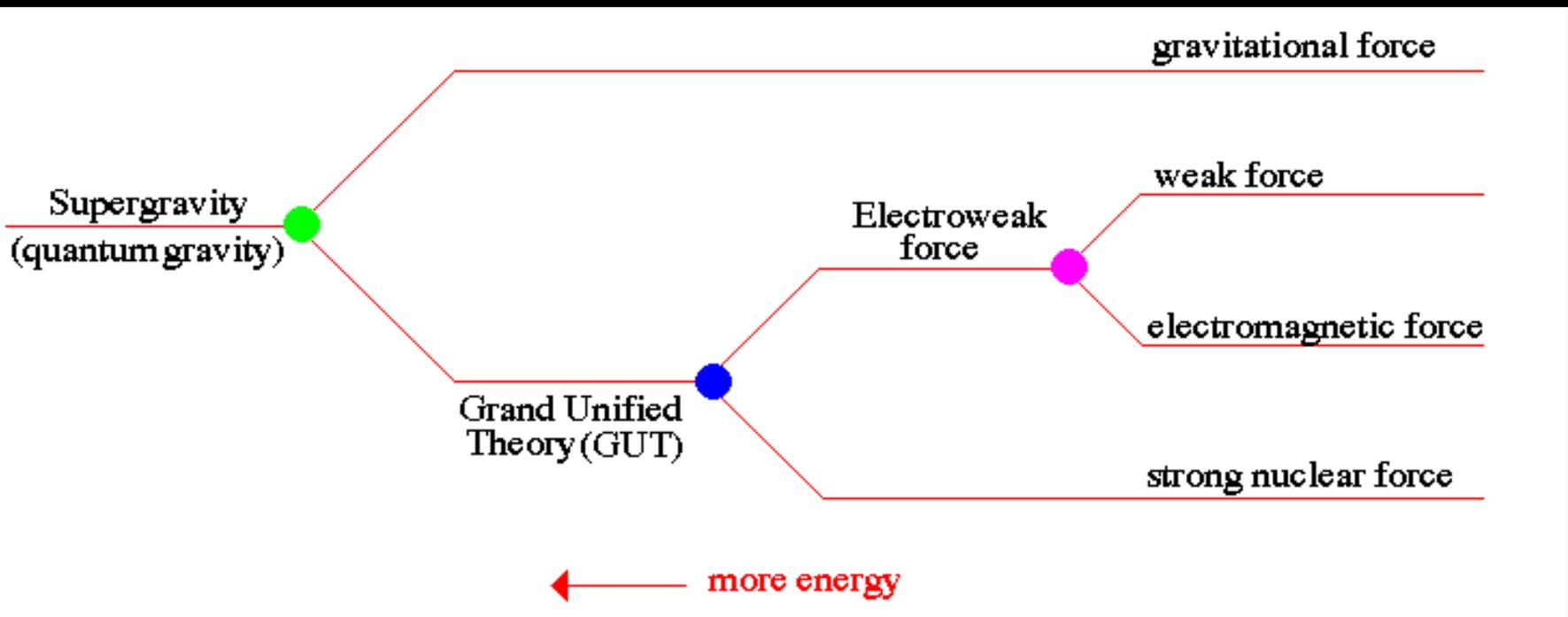
Na era de Planck:

Nestas altíssimas energias e temperaturas:
forças são SIMÉTRICAS



são indistinguíveis em intensidade e forma

Quebra de simetria = forças distintas

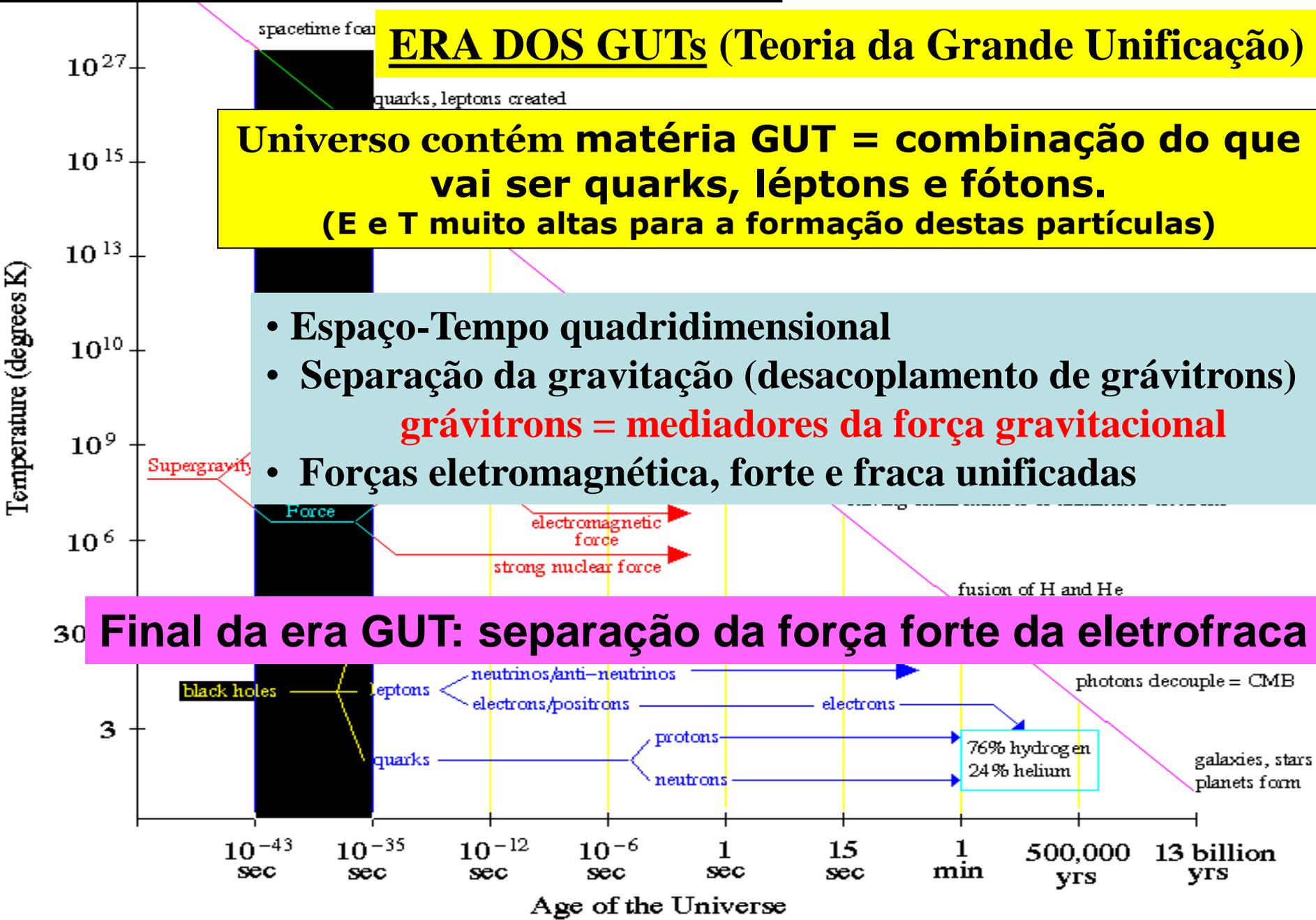


$$10^{-43} \text{ s} \leq t < 10^{-35} \text{ s} : 10^{32} \text{ K} \geq T > 10^{18} \text{ K}$$

ERA DOS GUTs (Teoria da Grande Unificação)

Universo contém matéria GUT = combinação do que vai ser quarks, léptons e fótons.
(E e T muito altas para a formação destas partículas)

- Espaço-Tempo quadridimensional
- Separação da gravitação (desacoplamento de grávitrons)
grávitrons = mediadores da força gravitacional
- Forças eletromagnética, forte e fraca unificadas



Final da era GUT: separação da força forte da eletrofraca

black holes

leptons

quarks

neutrinos/anti-neutrinos

electrons/positrons

protons

neutrons

electrons

76% hydrogen
24% helium

photons decouple = CMB

galaxies, stars
planets form

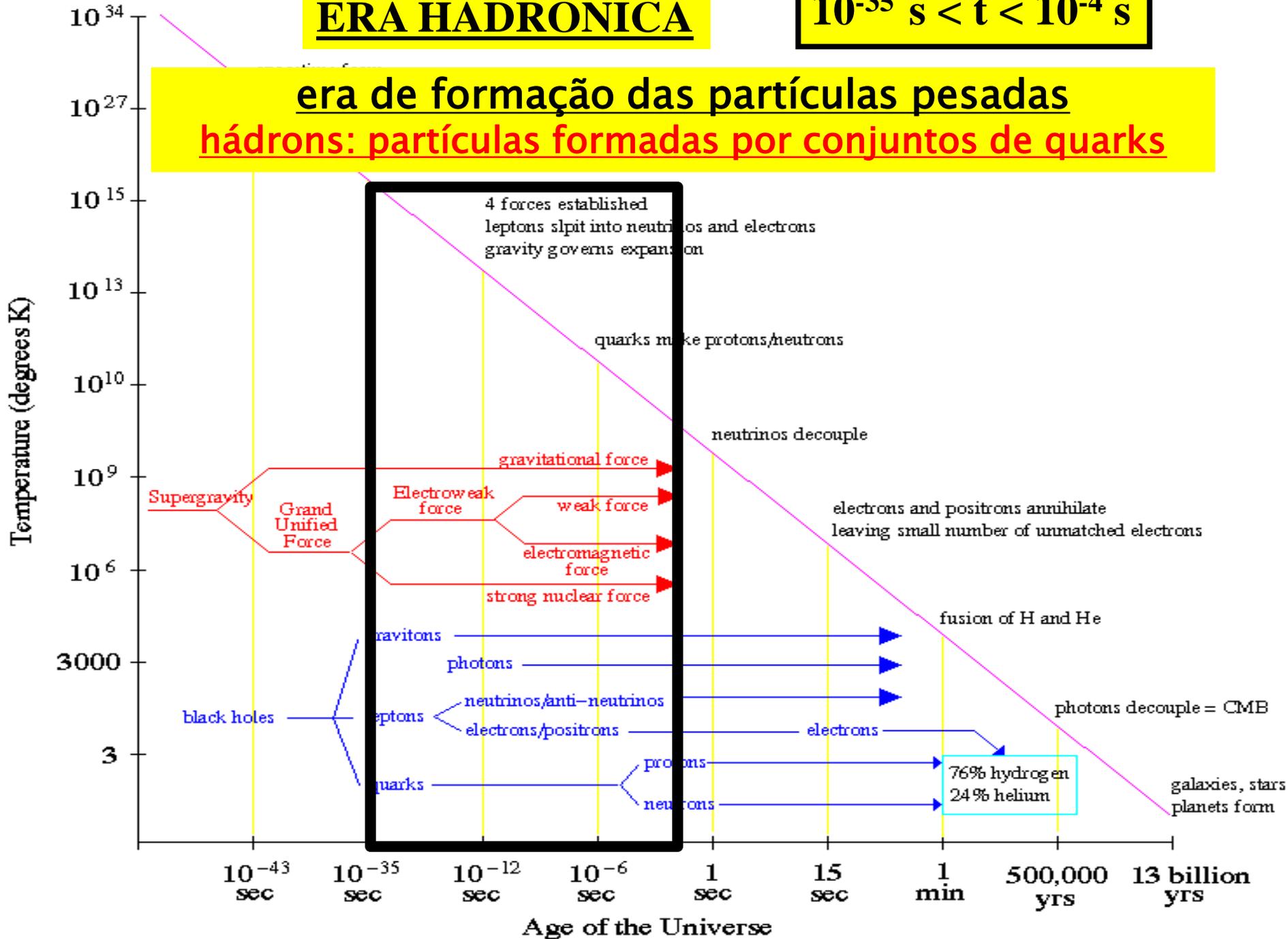


**ERA
HADRÓNICA.**

ERA HADRÔNICA

$$10^{-35} \text{ s} < t < 10^{-4} \text{ s}$$

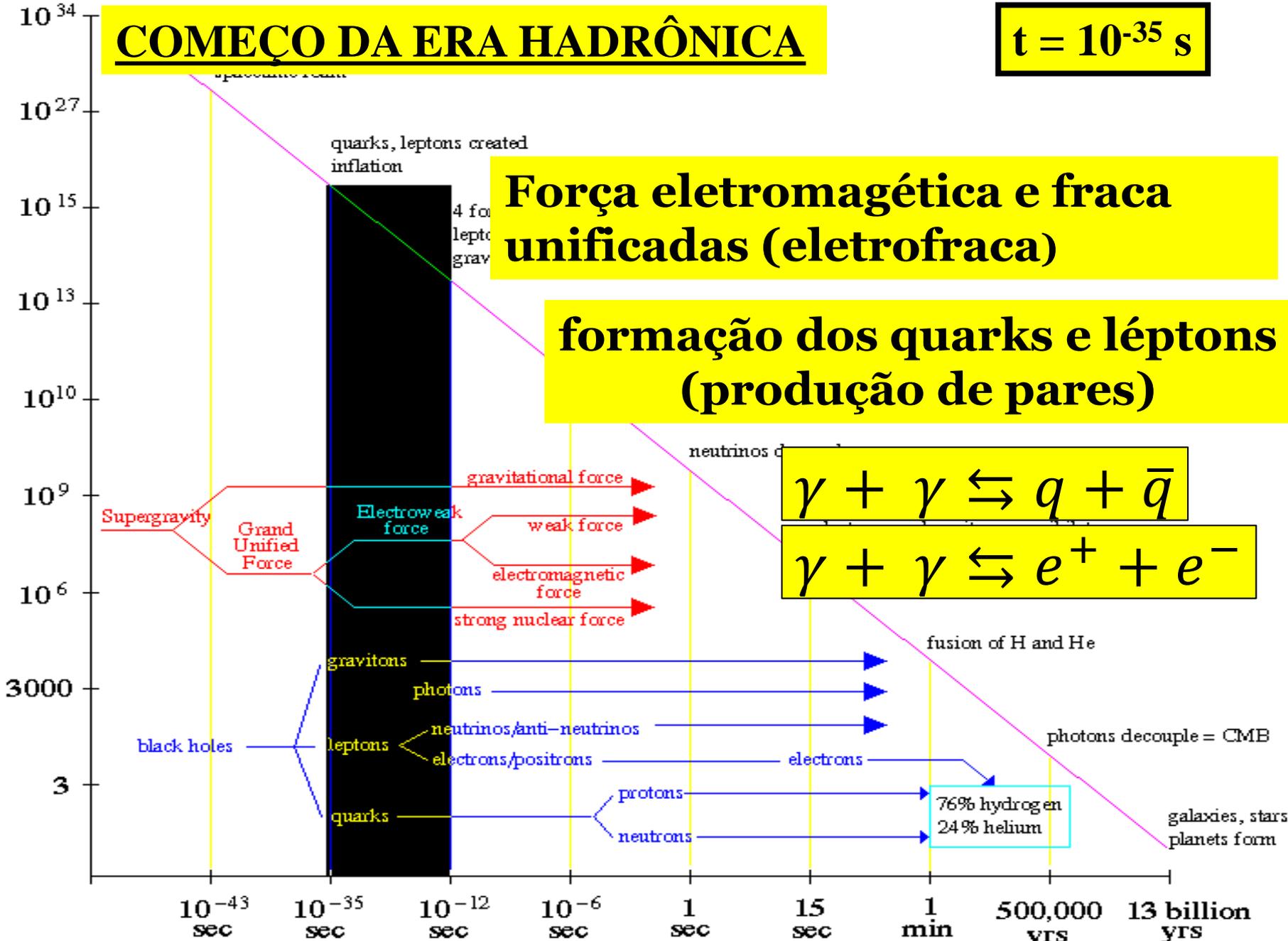
era de formação das partículas pesadas
hádrons: partículas formadas por conjuntos de quarks



COMEÇO DA ERA HADRÔNICA

$t = 10^{-35}$ s

Temperature (degrees K)

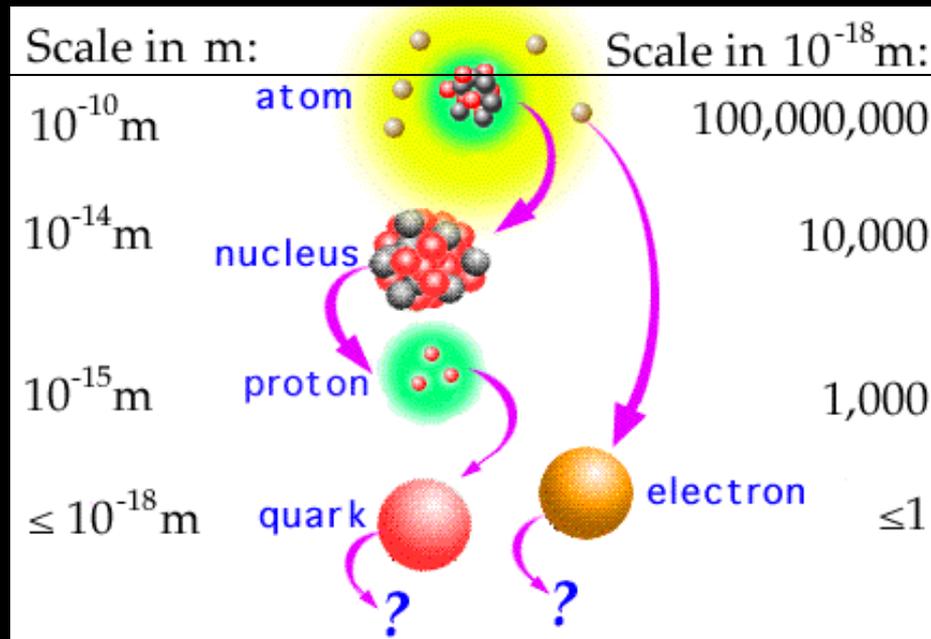


Age of the Universe

ERA HADRÔNICA

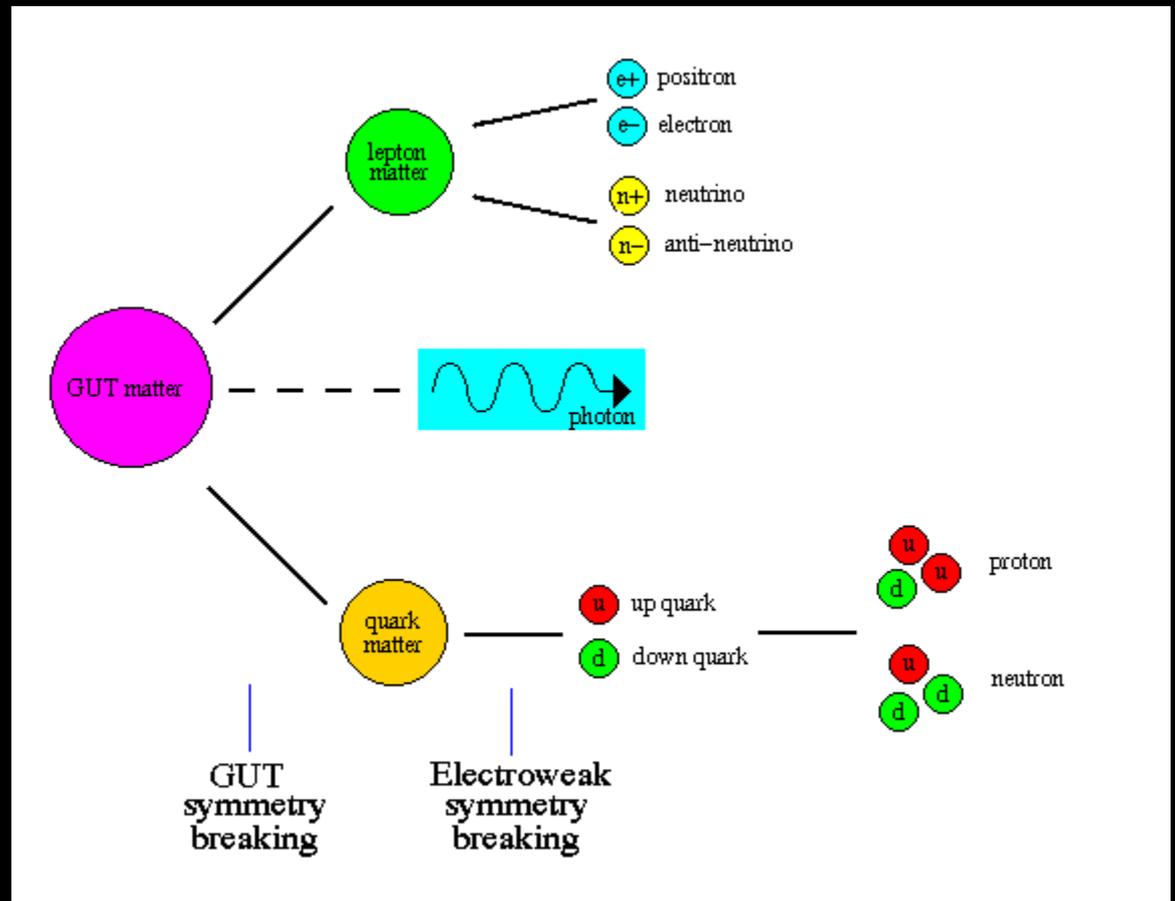
1. Léptons (elétrons, neutrinos, etc...) interagem através de força eletrofraca
2. Quarks (formam os prótons, nêutrons, etc..) interagem através das forças forte e eletrofraca

Toda a matéria conhecida no universo pode ser descrita em termos de léptons e quarks e as forças que atuam entre eles:



Evolução da matéria

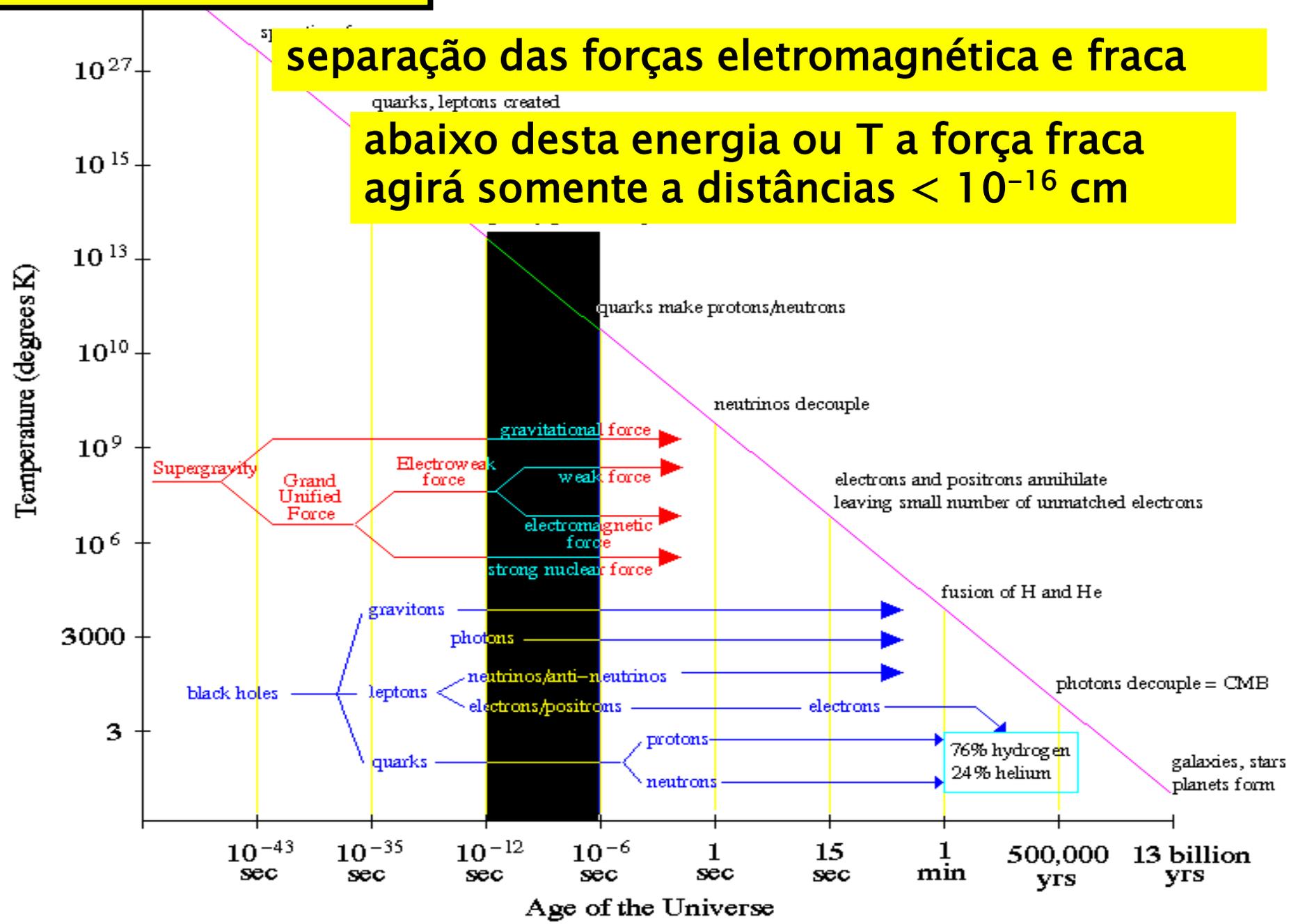
ERA HADRÔNICA



$t = 10^{-12} \text{ s}$ $T \sim 10^{14} \text{ K}$

separação das forças eletromagnética e fraca

abaixo desta energia ou T a força fraca agirá somente a distâncias $< 10^{-16} \text{ cm}$

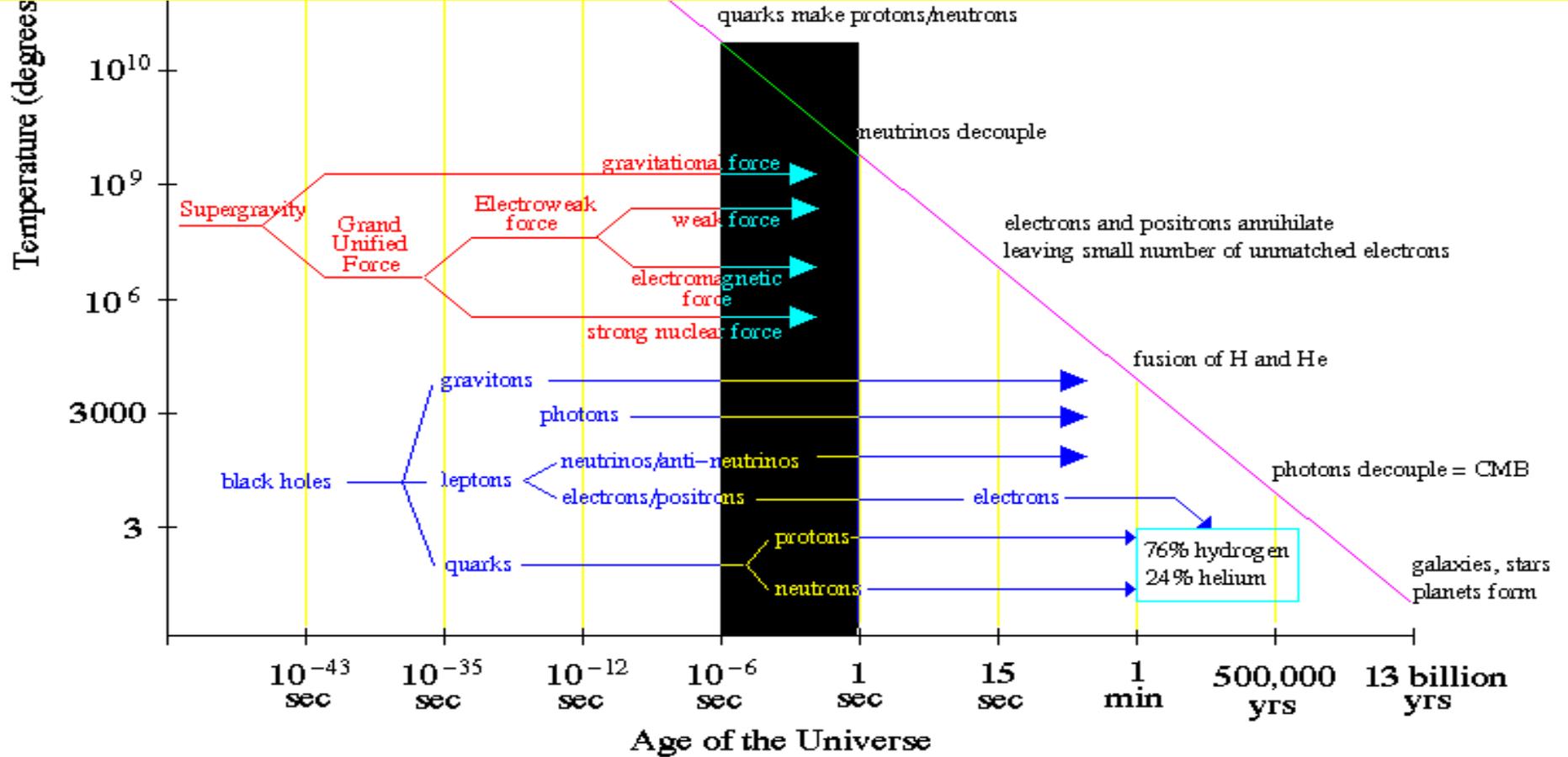


$t < 10^{-6} \text{ s}$ $T > 10^{11} \text{ K}$

spacetime foam

Reações de produção de pares mais rápidas do que a variação de densidade devido à expansão.

Matéria e radiação em equilíbrio durante esta parte da era radiativa



$t \sim 10^{-6} \text{ s}$ $T \sim 10^{11} \text{ K}$

spacetime foam

Com a diminuição de T os quarks começam a ficar confinados \Rightarrow formação de prótons e nêutrons.

leptons split into neutrinos and electrons

Mas continua a aniquilação das partículas, p. ex:

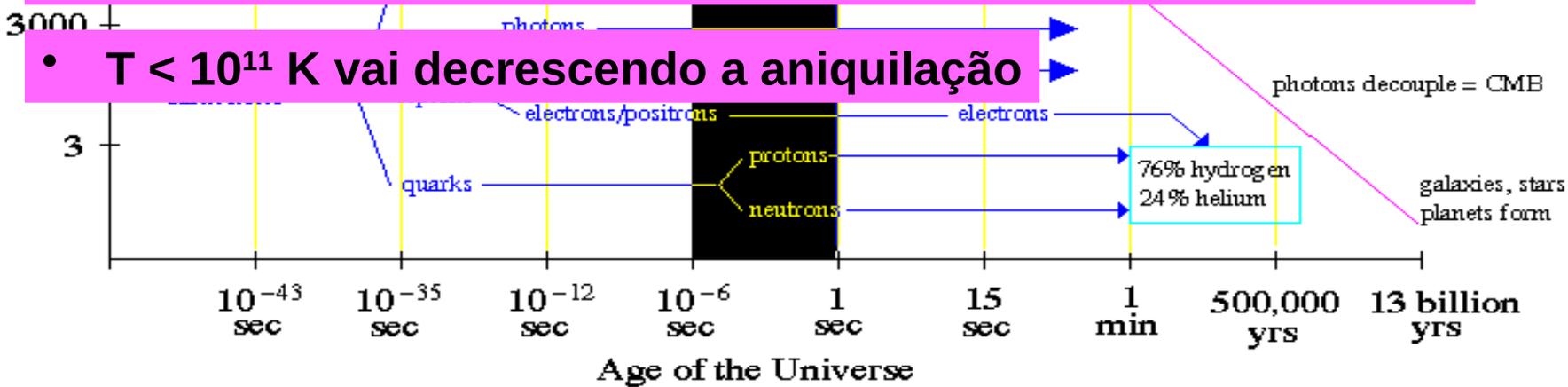


Temperature (degrees K)

• $T \sim 10^{11} \text{ K}$: época da maior aniquilação!

• Para $T < 10^{11} \text{ K}$: não é mais possível formar prótons, nêutrons ou quarks por produção de pares

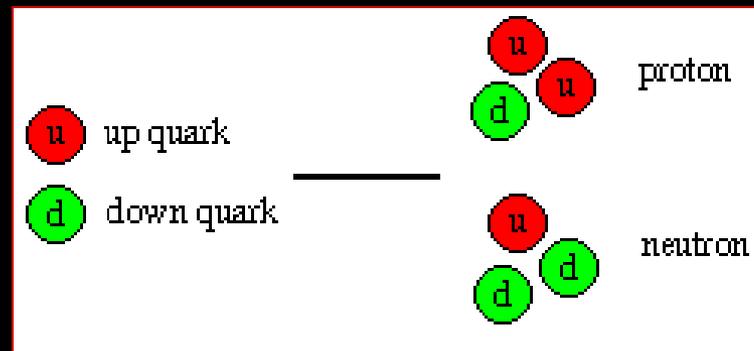
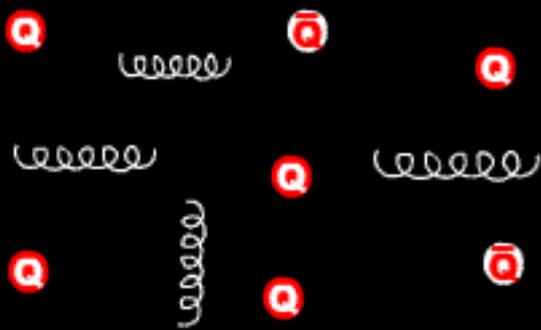
• $T < 10^{11} \text{ K}$ vai decrescendo a aniquilação



FINAL DA ERA HADRÔNICA

Em $t \sim 10^{-4}$ s ocorre o total confinamento de quarks em prótons e nêutrons e outras partículas

transição quark-hádron



3 quarks=bárions

Teoria de partículas elementares também tenta explicar porque temos mais matéria do que anti-matéria (assimetria matéria-antimatéria).

Resultado: léptons (e, μ, τ, ν , suas antipartículas) + hádrons que não se aniquilaram



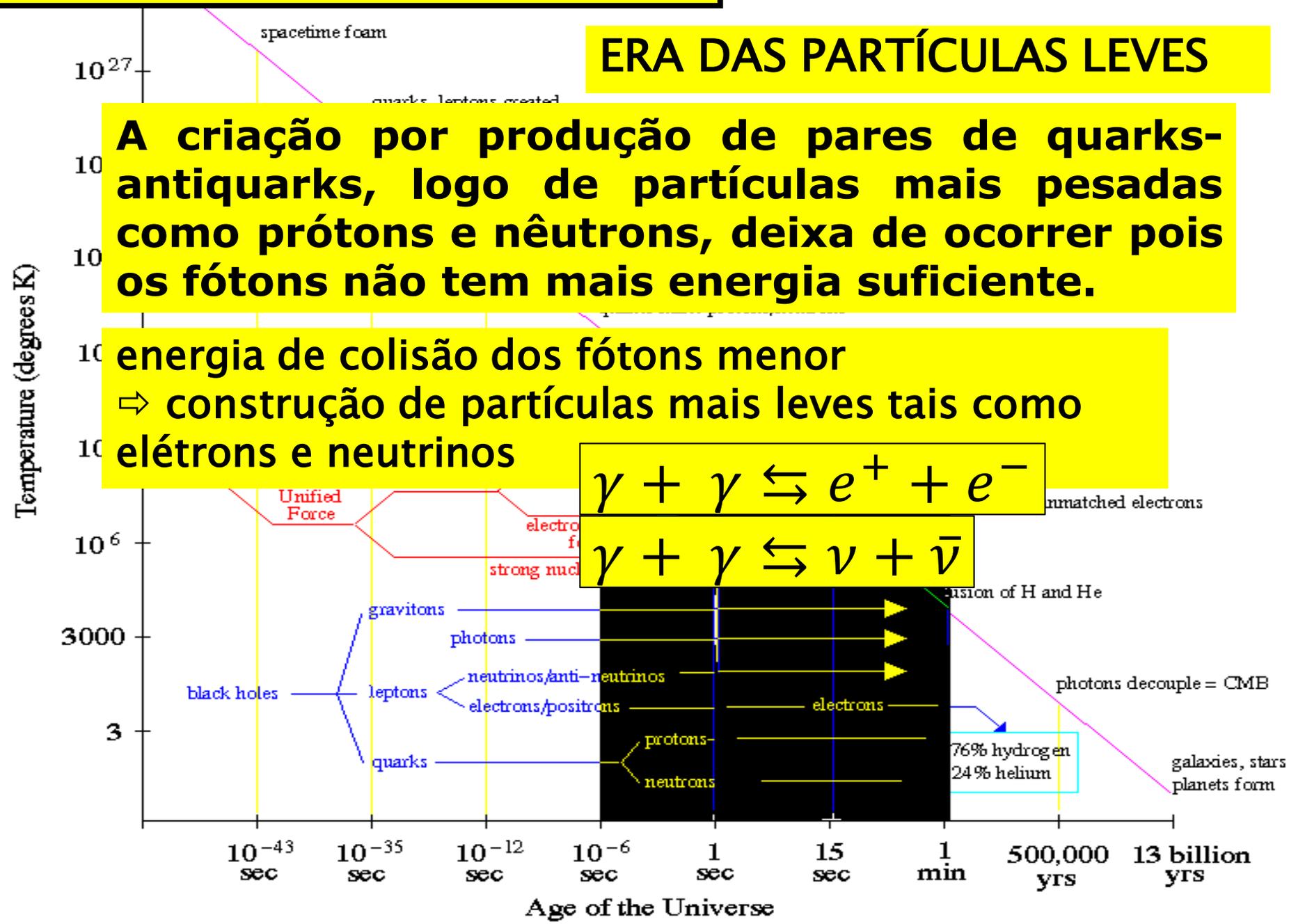
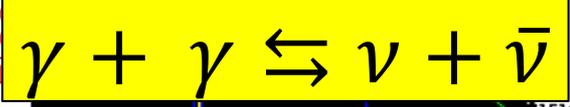
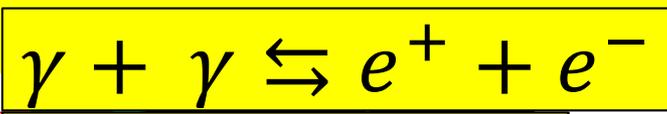
ERA LEPTÔNICA

$$10^{-4} \text{ s} < t < 10^2 \text{ s} \quad 10^{10} \text{ K} < T < 10^4 \text{ K}$$

ERA DAS PARTÍCULAS LEVES

A criação por produção de pares de quarks-antiquarks, logo de partículas mais pesadas como prótons e nêutrons, deixa de ocorrer pois os fótons não tem mais energia suficiente.

energia de colisão dos fótons menor
 ⇒ construção de partículas mais leves tais como elétrons e neutrinos



$$T \sim 10^9 \text{ K}$$

universo com fótons, elétrons ,
prótons , nêutrons , neutrinos + anti-partículas

p e n estão em equilíbrio através das reações:



n fora do núcleo são instáveis

n decaem espontaneamente em p



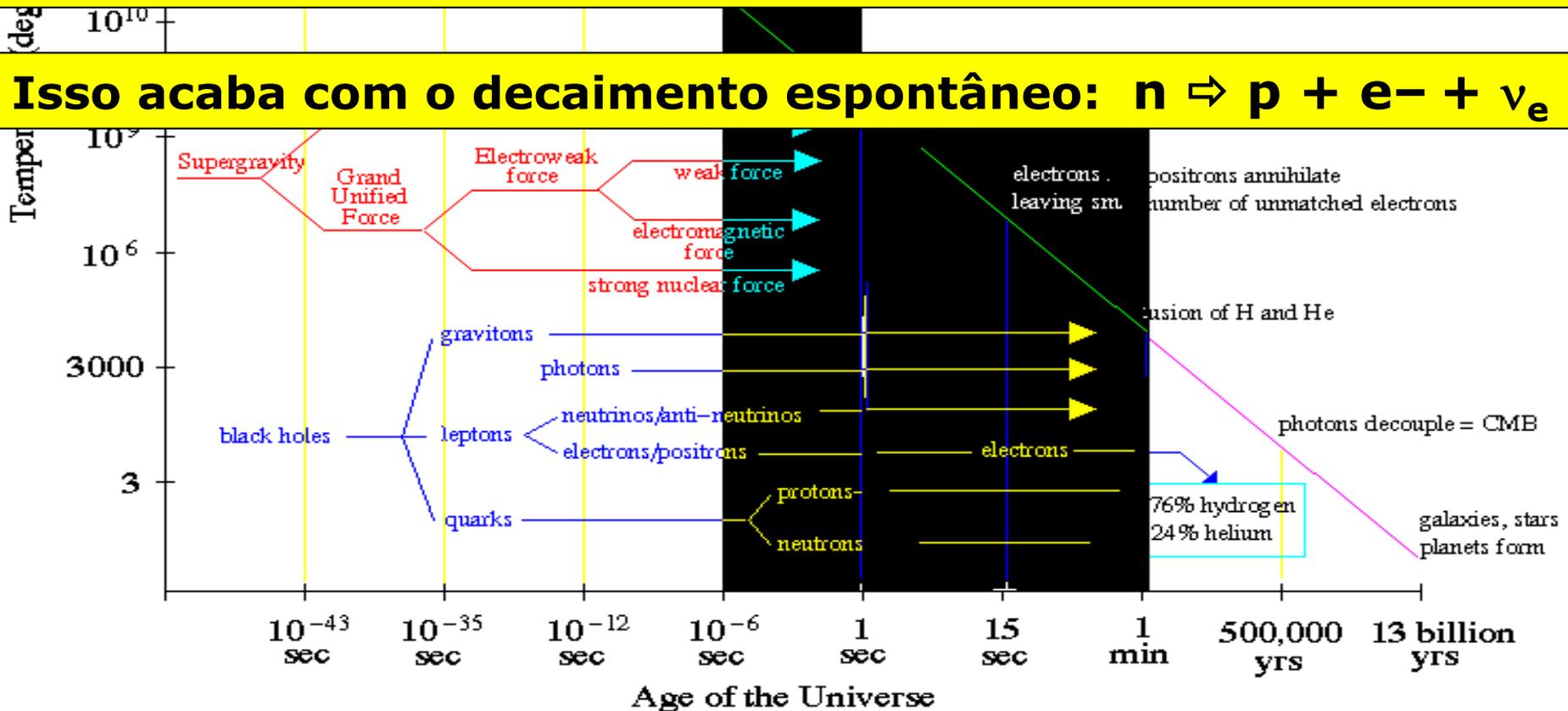
+ provável a formação de um próton do que um nêutron.

Enquanto $T \sim 10^9 \text{ K}$: o número de prótons é praticamente igual ao de nêutrons $n_p \sim n_n$

Quando $T < 10^9 \text{ K}$ ($t \sim 2 \text{ s}$) $n_p > n_n$ (desacoplamento de todos os ν)

Os nêutrons não desaparecem completamente \Rightarrow reações nucleares começam a acontecer : PRÓTONS E NÊUTRONS COMEÇAM A SE AGREGAR PARA FORMAR OS NÚCLEOS ATÔMICOS.

Isso acaba com o decaimento espontâneo: $n \Rightarrow p + e^- + \nu_e$



No final da era leptônica temos formadas todas as partículas constituintes da matéria: léptons e hádrons.



A medida que a T decresce com a expansão do universo, os prótons e nêutrons começam a se agregar para formar os núcleos atômicos.



ERA NUCLEAR

RESUMO DA HISTÓRIA DO UNIVERSO

| Época | Tempo (após o Big-Bang) | Densidade (kg/m ³) | Temperatura (K) | Característica principal |
|-----------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Planck | 0 - 10 ⁻⁴³ s | ∞ - 10 ⁹⁵ | ∞ - 10 ³² | Física desconhecida Gravitação quântica 4 forças unificadas |
| GUT | 10 ⁻⁴³ - 10 ⁻³⁵ s | 10 ⁹⁵ - 10 ⁷⁵ | 10 ³² - 10 ¹⁷ | Separação da força gravitacional 3 forças unificadas Matéria GUT Final da era GUT: separação da força forte da eletrofraca |
| Hadrônica | 10 ⁻³⁵ - 10 ⁻⁴ s | 10 ⁷⁵ - 10 ¹⁶ | 10 ¹⁷ - 10 ¹⁰ | 4 forças separadas Formação dos léptons, quarks e prótons e nêutrons (por produção de pares ou confinamento de quarks). T grande o suficiente para formar partículas de maior massa. |
| Leptônica | 10 ⁻⁴ - 10 ² s | 10 ¹⁶ - 10 ⁴ | 10 ¹⁰ - 10 ⁴ | Somente partículas leves (léptons) formam-se por produção de pares. Neutrinos desacoplam. |

Proton



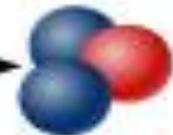
Deuterium



Neutron



^3He



ERA NUCLEAR



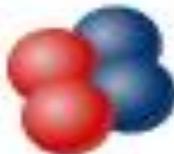
^4He



^3He

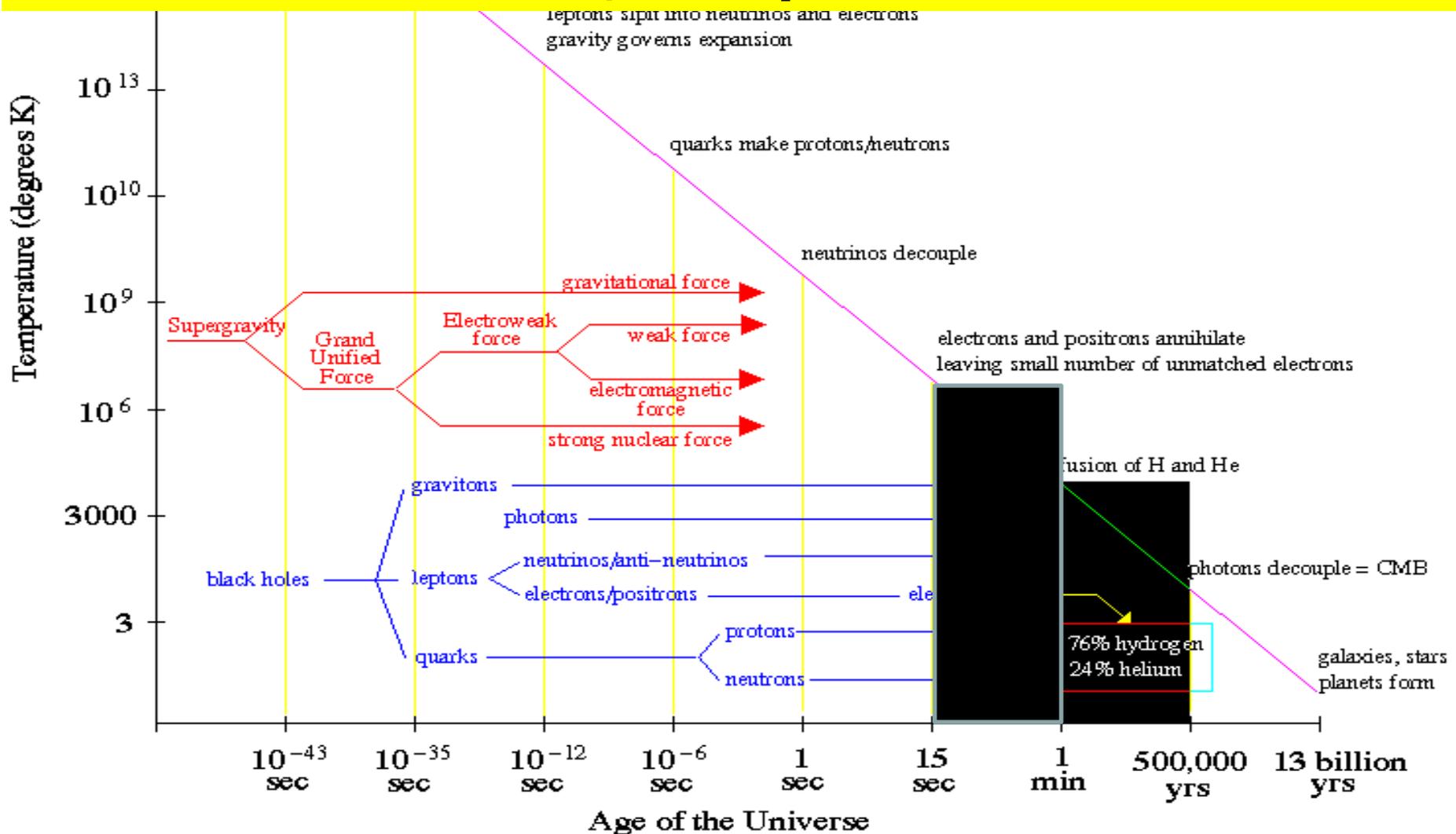


^4He



$t \sim 15$ s depois do Big-bang ($T \sim 10^7$ K)

Matéria no universo consiste em prótons + nêutrons + elétrons, com prótons $\sim 5 \times$ nêutrons



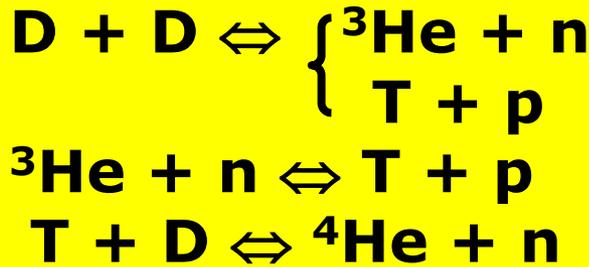
$t > 15 \text{ s}$: começam as reações de fusão nuclear: formação do deutério



quarks, leptons created
inflation

Transformação do deutério em elementos + pesados

gravity governs expansion



quarks make protons

neutrinos decouple

electrons and positrons annihilate
leaving small number of unmatched electrons

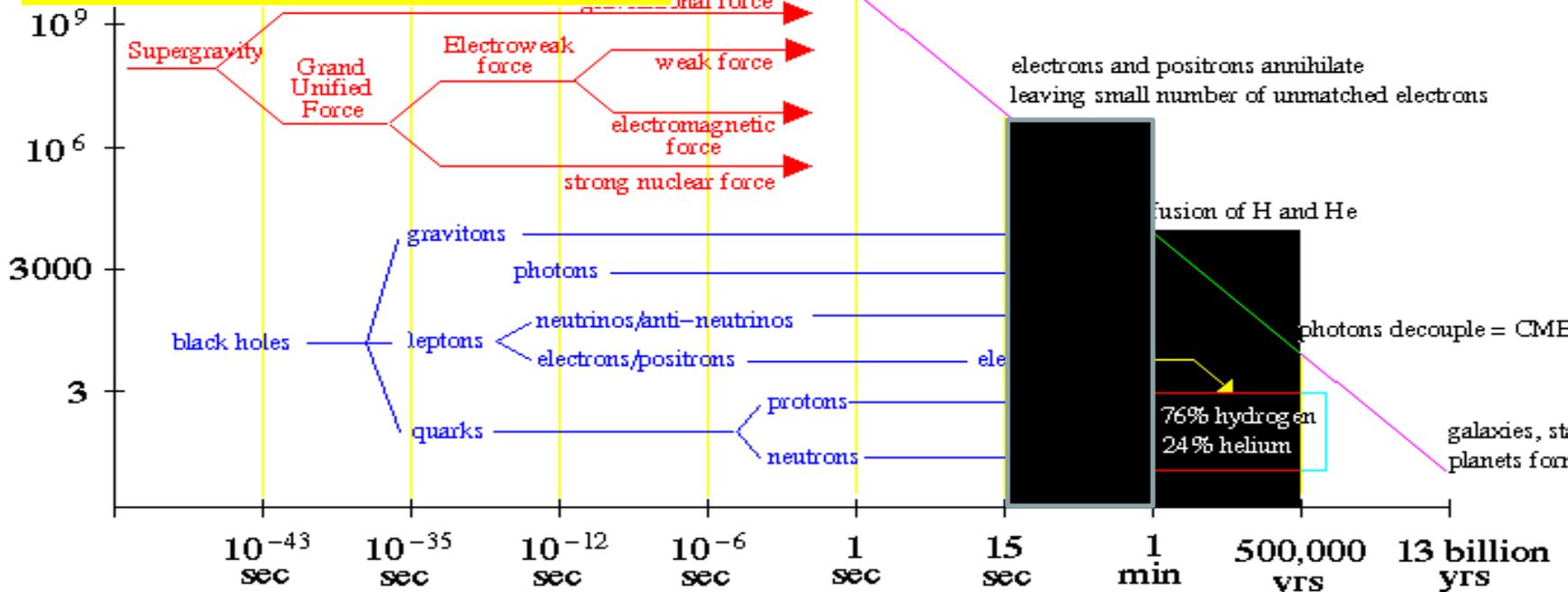
fusion of H and He

photons decouple = CMB

76% hydrogen
24% helium

galaxies, stars
planets form

Temperature (degrees K)

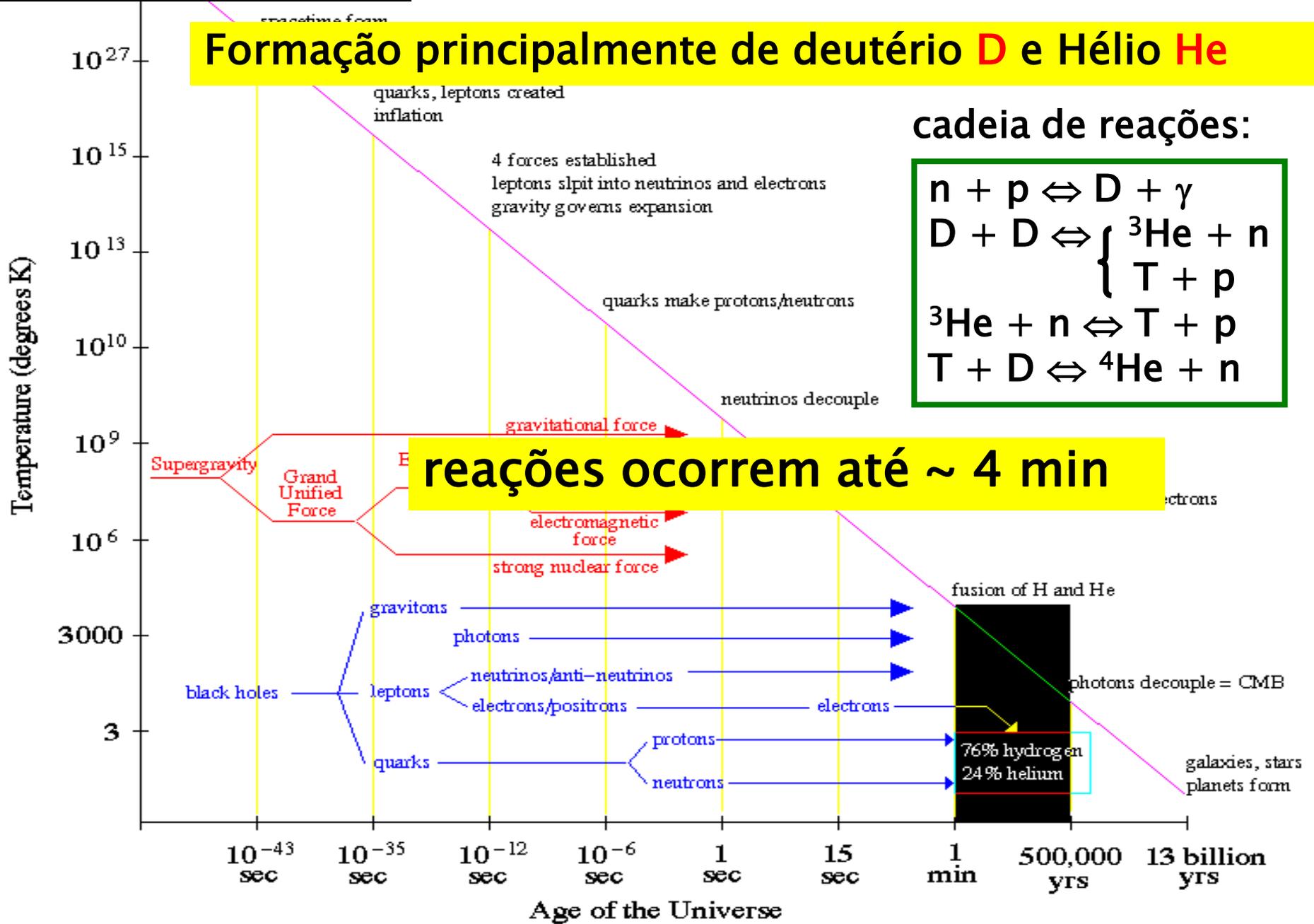
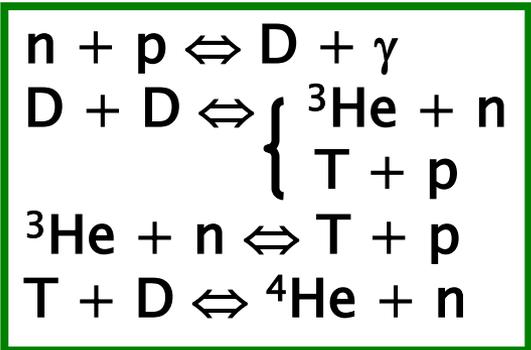


Age of the Universe

$t > 1 \text{ min}$ $T < 10^5 \text{ K}$

Formação principalmente de deutério D e Hélio He

cadeia de reações:



reações ocorrem até ~ 4 min

Após ~ 4 min não há energia suficiente para formar os núcleos mais pesados.

O ${}^4\text{He}$ calculado é ~ 25% da massa dos elementos formados no universo (próximo ao observado), o 75% restante é de H.

A maior parte do He formado nas estrelas ainda está no seus interiores.



os 25% de He observados no gás interestelar e atmosferas de estrelas foram necessariamente formados no Big-Bang

Sucesso do modelo cosmológico padrão (Big-Bang)

previsão da nucleossíntese primordial

**Matéria no universo encontrada em
~ 4 minutos após o Big-Bang:**

- **elétrons**
- **núcleos de H (deutério)**
 - **núcleos de He**
 - **dark matter**

A radiação (fótons) interage com os elétrons livres

T ~ 3000 K e t ~ 500.000 anos

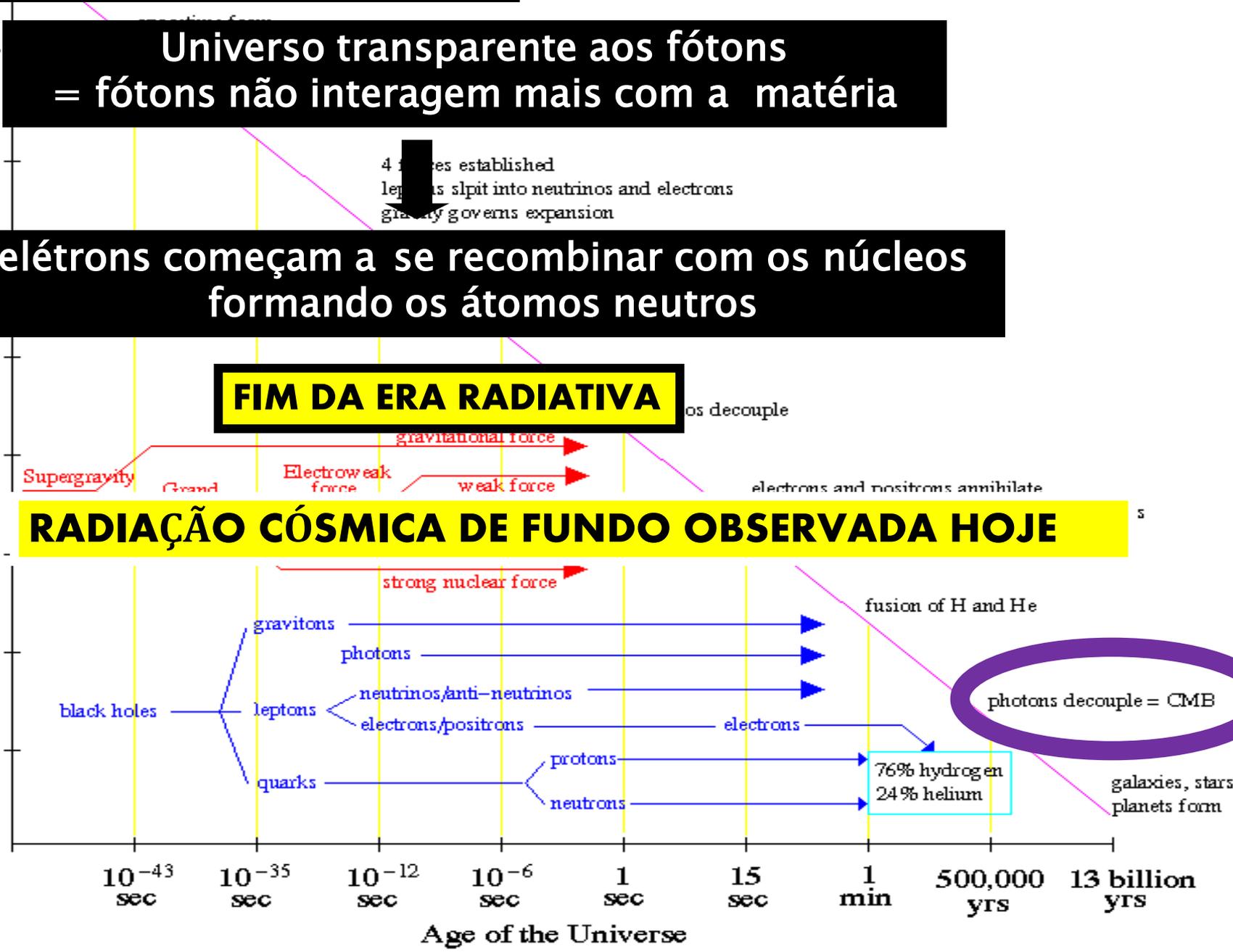
**Universo transparente aos fótons
= fótons não interagem mais com a matéria**

Temperature (degrees K)
10²⁷
10¹⁵
10¹⁰
10⁹
10⁶
3000
3

elétrons começam a se recombinar com os núcleos formando os átomos neutros

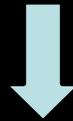
FIM DA ERA RADIATIVA

RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO OBSERVADA HOJE



RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO (RCF)

RCF também se “expande com o universo”



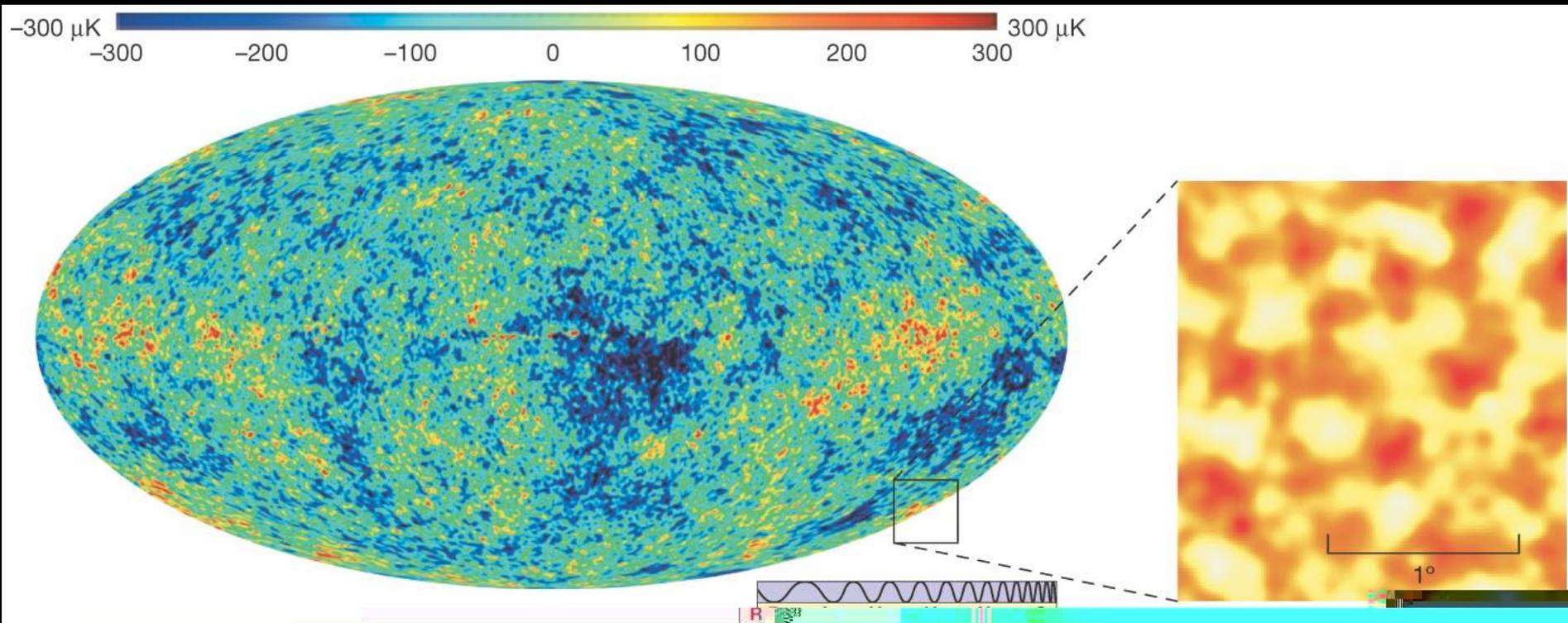
RCF observada em microondas

Mapas da RCF

WMAP: resolução de 25´

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Flutuações ao redor da $T = 2,7 \text{ K}$ ($\pm 300 \mu\text{K}$)



flutuações na temperatura dos fótons da RCF



flutuações na densidade do gás no momento da recombinação

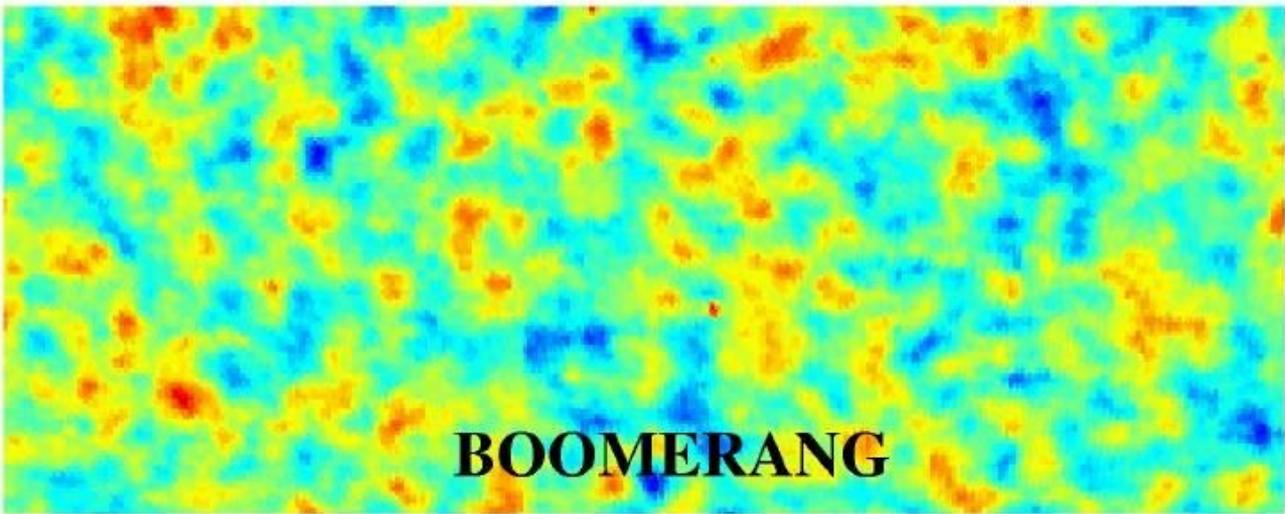
para criar as nuvens protogalácticas:



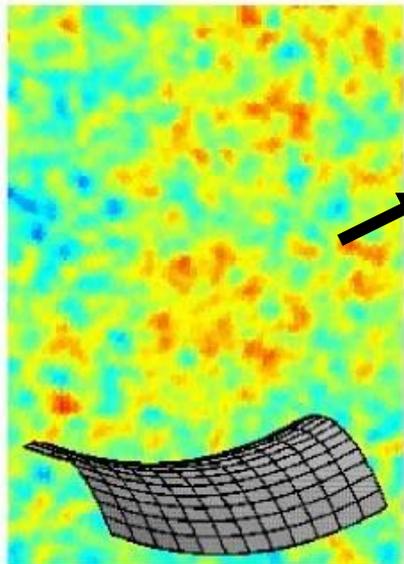
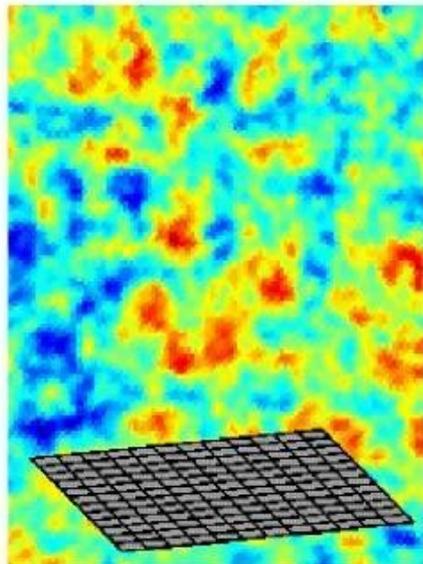
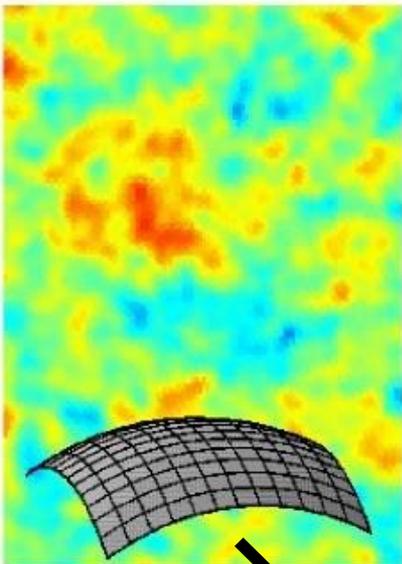
É necessário crescimento de algumas flutuações de densidade

As flutuações da RCF são a ligação entre o BB e a estrutura em grande escala de galáxias no universo e suas distribuições em termos de aglomerados de galáxias e filamentos.

25°



observado



teórico

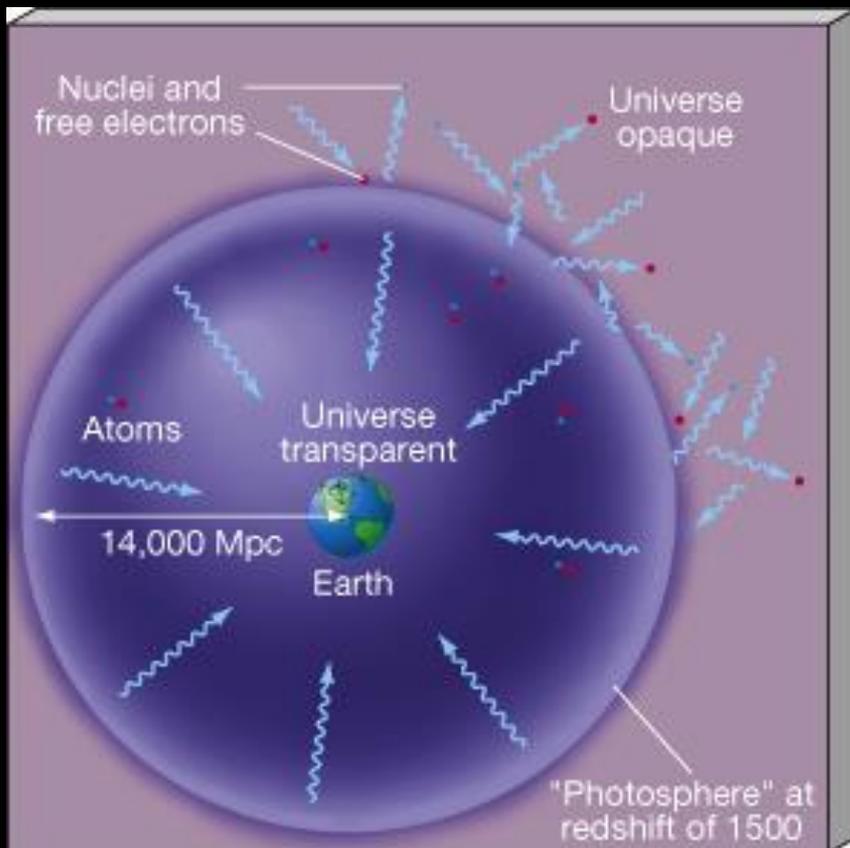
**universo aberto
flutuações menores**

universo fechado: distorção do E-T magnifica as flutuações

PROBLEMAS COM O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

O PROBLEMA DO HORIZONTE

Medimos hoje uma RCF \sim isotrópica \Rightarrow sua temperatura é \sim constante ($T=2,7$ K)



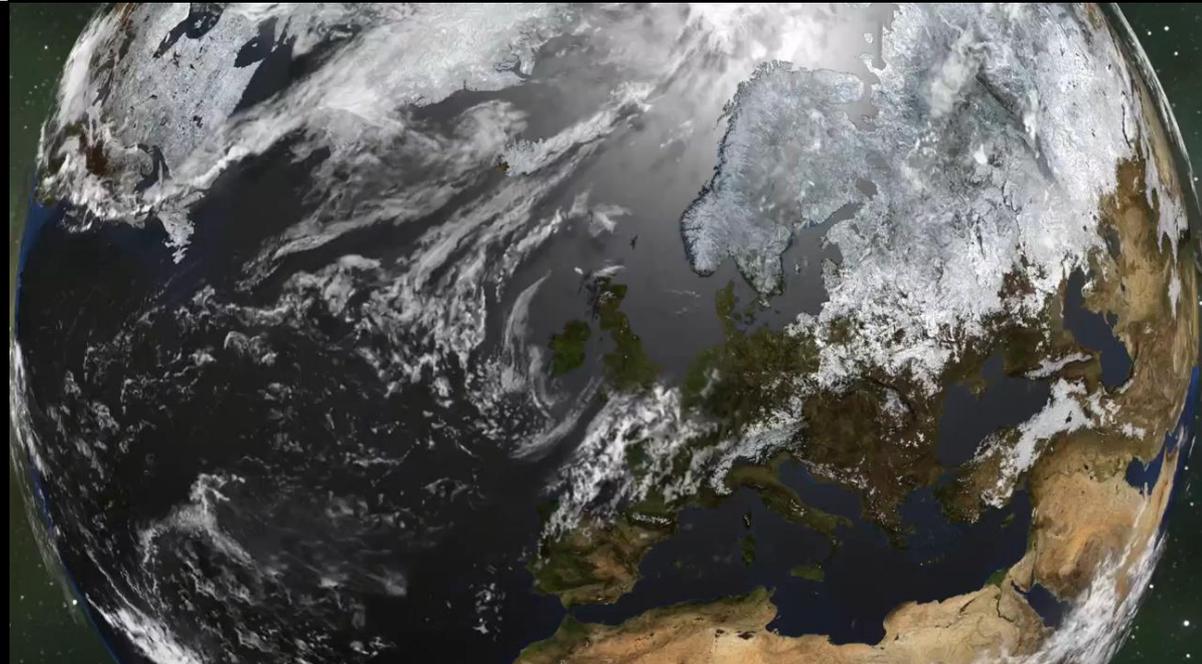
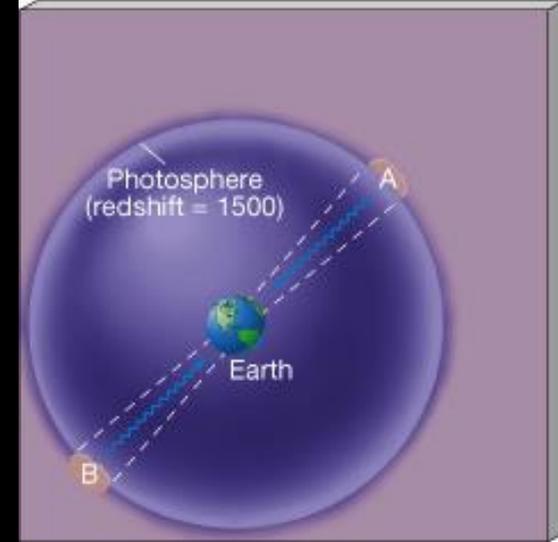
A RCF medida hoje corresponde a uma radiação vinda de uma distância presente de 14 Gpc, o que dá um redshift $z \sim 1500$.

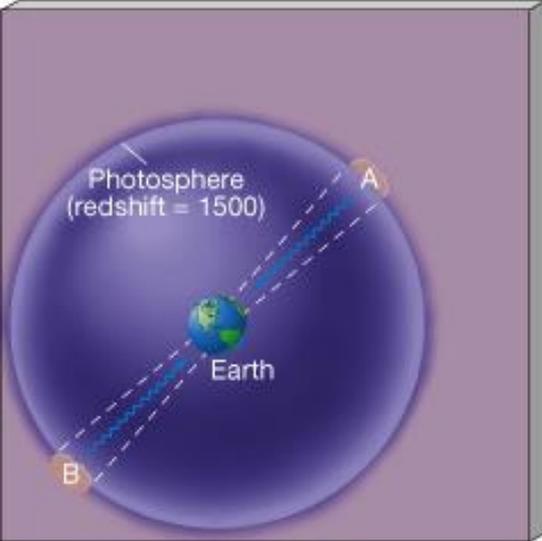
o universo é considerado homogêneo e isotrópico em grandes escalas

A radiação cósmica de fundo apresenta uma grande isotropia: duas regiões opostas no céu têm a mesma aparência.



As duas regiões opostas estiveram conectadas tempo suficiente para transmitir energia uma para a outra e entrar em equilíbrio?





Pelo modelo padrão do Big Bang, mesmo nas fases iniciais do BB quando estas áreas estavam mais próximas, não houve tempo suficiente para a luz atravessar de uma para outra.

Não houve tempo para T e ρ entrar em equilíbrio.



Essas regiões estavam fora do "horizonte" uma da outra.



Conclusão

Os dois limites do universo A e B que hoje observamos não tiveram tempo suficiente de interagir fisicamente entre si.

Então não haveria razão para que os dois extremos, que não possuíam "contato causal" entre si, fossem parecidos!!

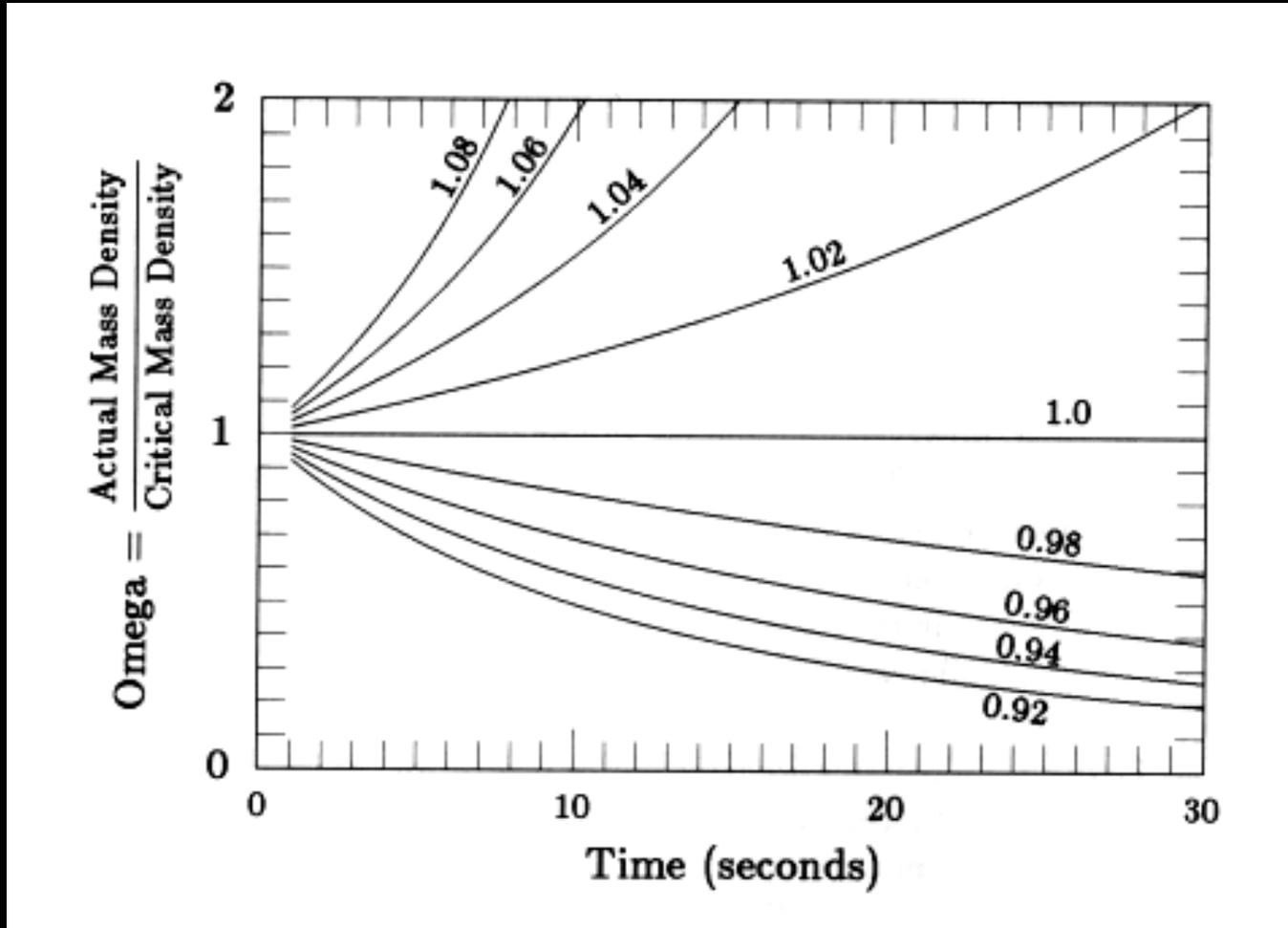
O PROBLEMA DA CURVATURA

**Grupos e aglomerados de galáxias
+ matéria escura $\Omega_M \sim 0,2 - 0,3$**

Energia escura $\Omega_\Lambda = 0,7 - 0,75$

**O valor de Ω_0 é próximo a 1, o que caracteriza
um universo de GEOMETRIA PLANA...**

Para que hoje em dia tenhamos um valor de Ω_0 tão próximo a 1, no passado Ω deve ter sido 0,999999999999999999999999....



Ou seja, no modelo padrão do Big-Bang Ω_0 deve ser muito próximo a 1 desde o início

O MODELO INFLACIONÁRIO DA EXPANSÃO DO UNIVERSO

Harvey Guth e modificado por Steinhardt e Linde (1981)



aplicação de idéias provenientes dos GUTs

Vimos que em $t \equiv t_{\text{GUT}} \sim 10^{-35}$ s
há a separação das forças
forte e eletrofraca  $T \sim 10^{17}$ K
(de acordo com o modelo padrão)



há uma quebra de simetria neste instante

**Quando há quebra de simetria no final da era GUT:
separação da força forte da eletrofraca ($t=10^{-35}$ s)
⇒ há uma mudança significativa na expansão do
universo!**



INFLAÇÃO

Quebra de simetria = transição de fase

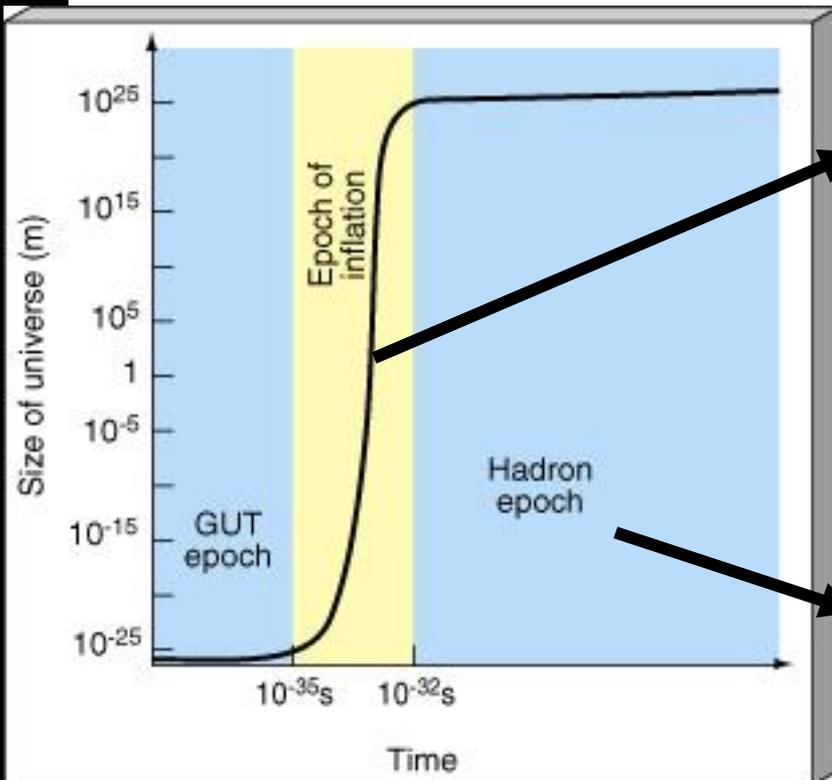


**transições de fase ocorrem nos pontos de unificação das
forças fundamentais ⇒ desacoplamento de uma das
forças causa uma mudança no universo como um todo.**

Em t_{GUT} a transição de fase (separação da força forte) leva a um estado meta-estável durante um certo Δt



ESTADO DE VÁCUO FALSO (força repulsiva Λ torna-se muito maior do que a atrativa da gravidade)

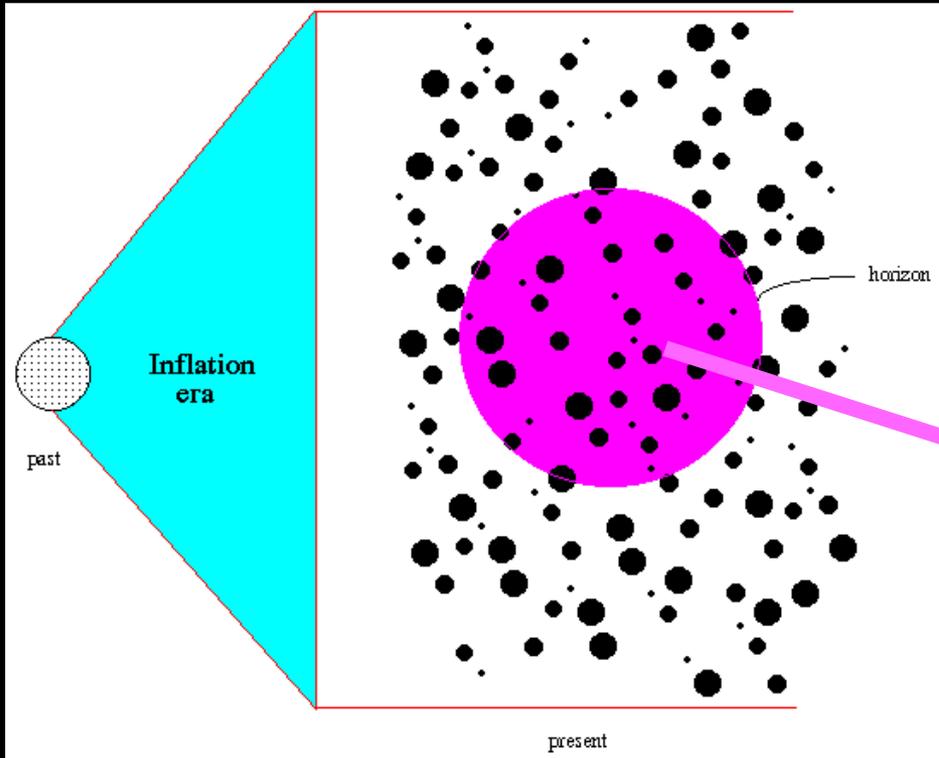


Nesta época o universo aumenta o seu tamanho cerca de 10^{50} vezes !!!

expansão ocorre a $v > c$?! SIM!
expansão na geometria (E-T) do universo e não da matéria e radiação! não há violação da TRG...

Após, o universo continua com a sua expansão normal.

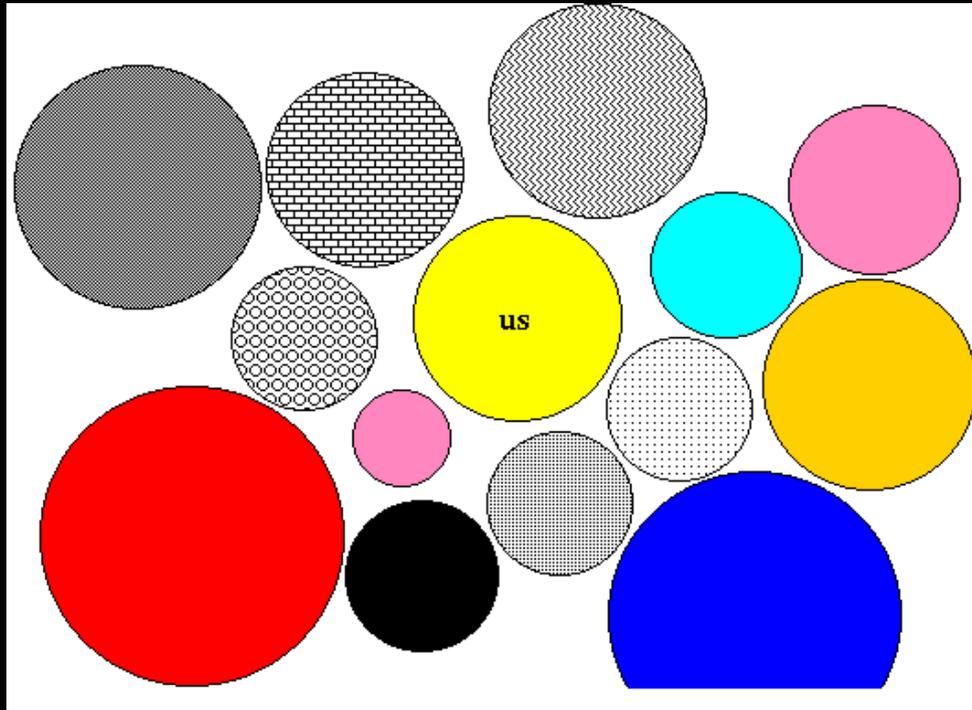
Consequências:



Inflação:
somente uma partedo BB
original está dentro no
nosso horizonte

nosso universo

Após a inflação... Universo de “bolhas”



Nosso universo visível é uma “bolha” de um universo maior

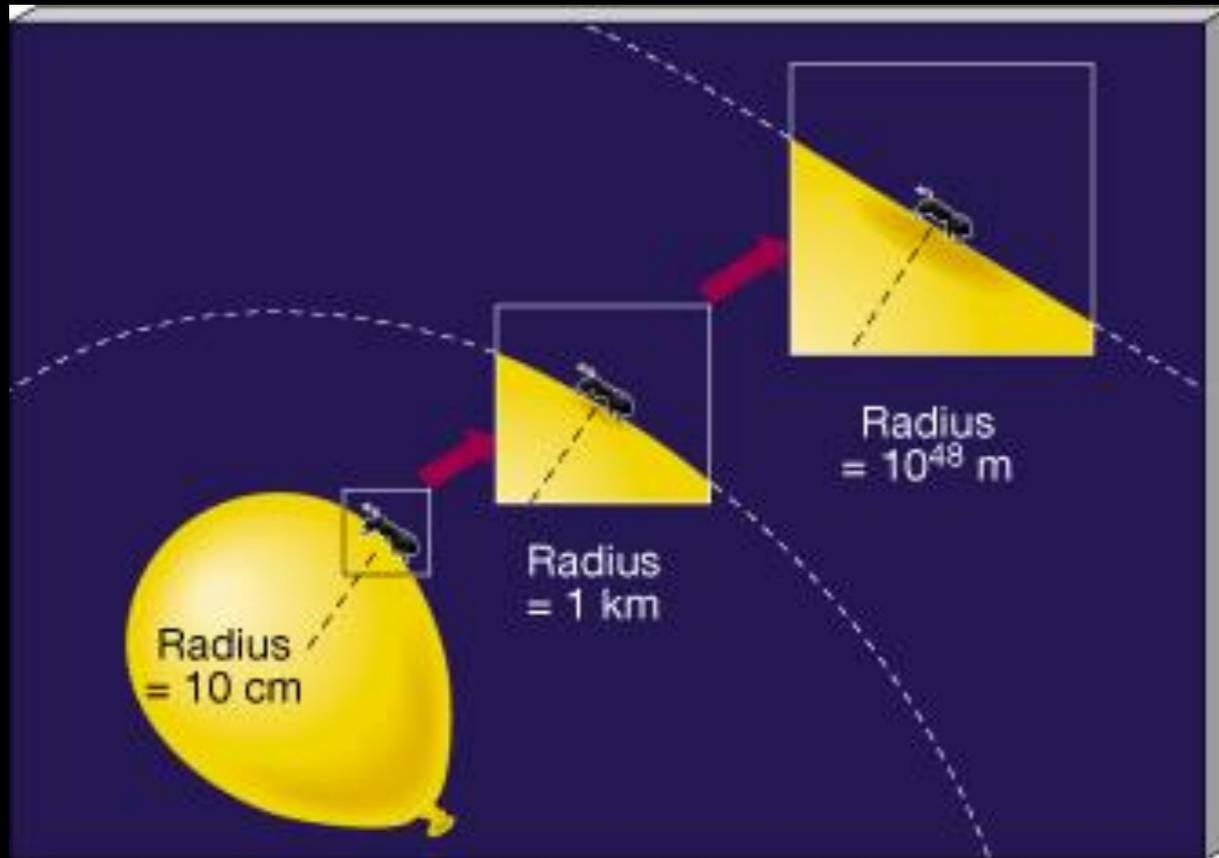
Toda a região dentro da nossa “bolha” é homogênea pq sempre esteve em contato desde a época pré-inflacionária.

Resolução do problema do horizonte: nosso universo é um pequeno pedaço isotrópico de um universo maior

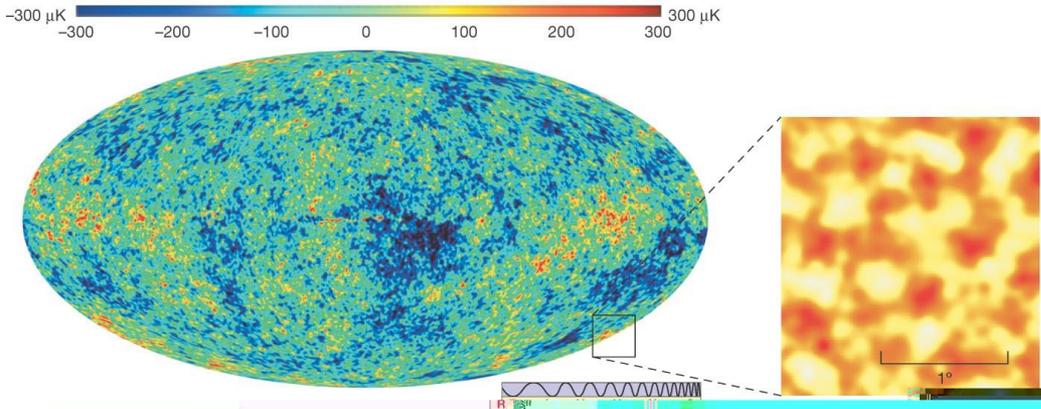


todo o pedaço sempre esteve em contato causal antes e depois da época da inflação, então têm as mesmas propriedades físicas.

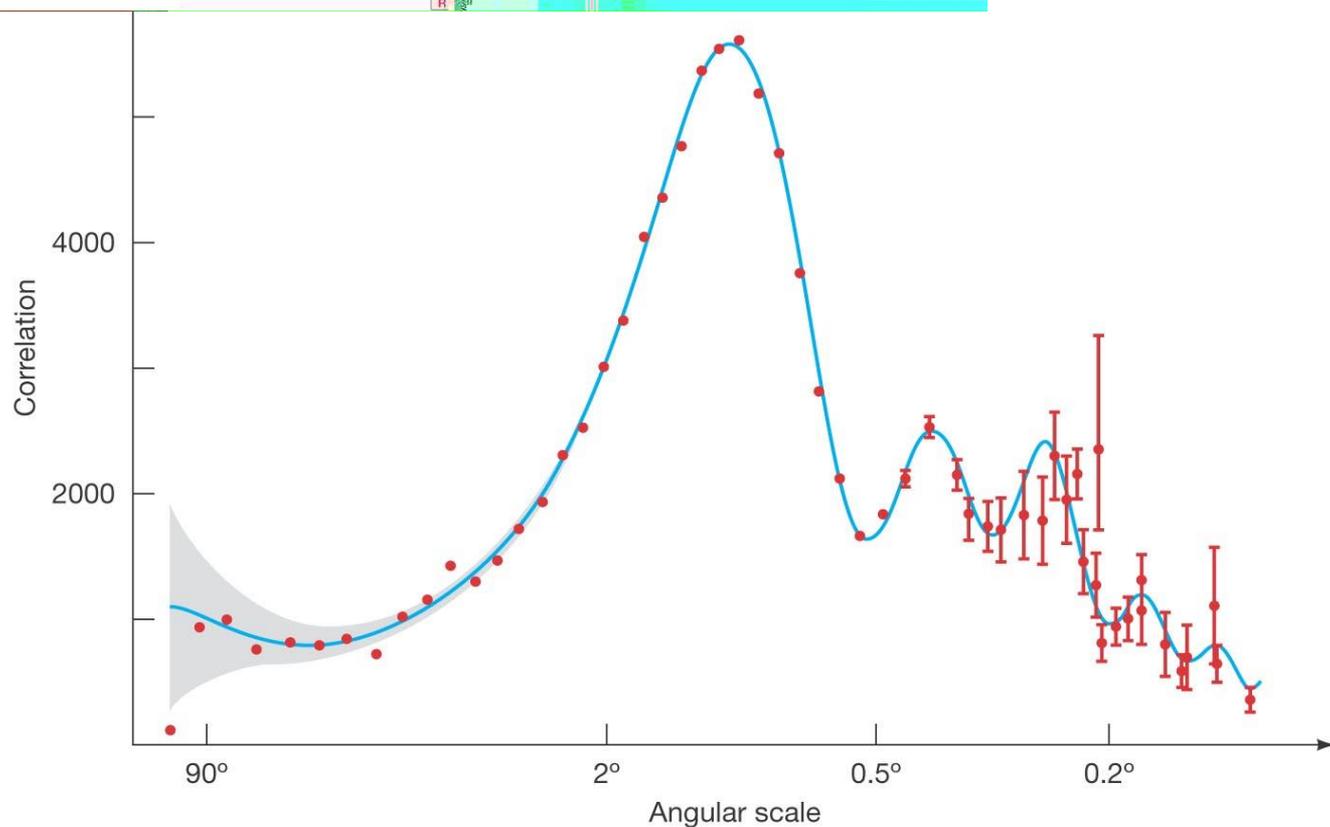
Resolução do problema da curvatura: inflação = *zoom* de uma muito pequena seção do universo (deverá ser localmente plano!)



Qualquer geometria que o universo tivesse antes da inflação ou tenha após a inflação, com o crescimento de 10^{50} vezes o universo observável torna-se plano...



Quantidade de estruturas de diferentes escalas angulares



**Linha azul: modelo teórico para um universo plano $\Omega_0=1$
73% de dark energy, 27% de matéria.**