

MATÉRIA ESCURA:

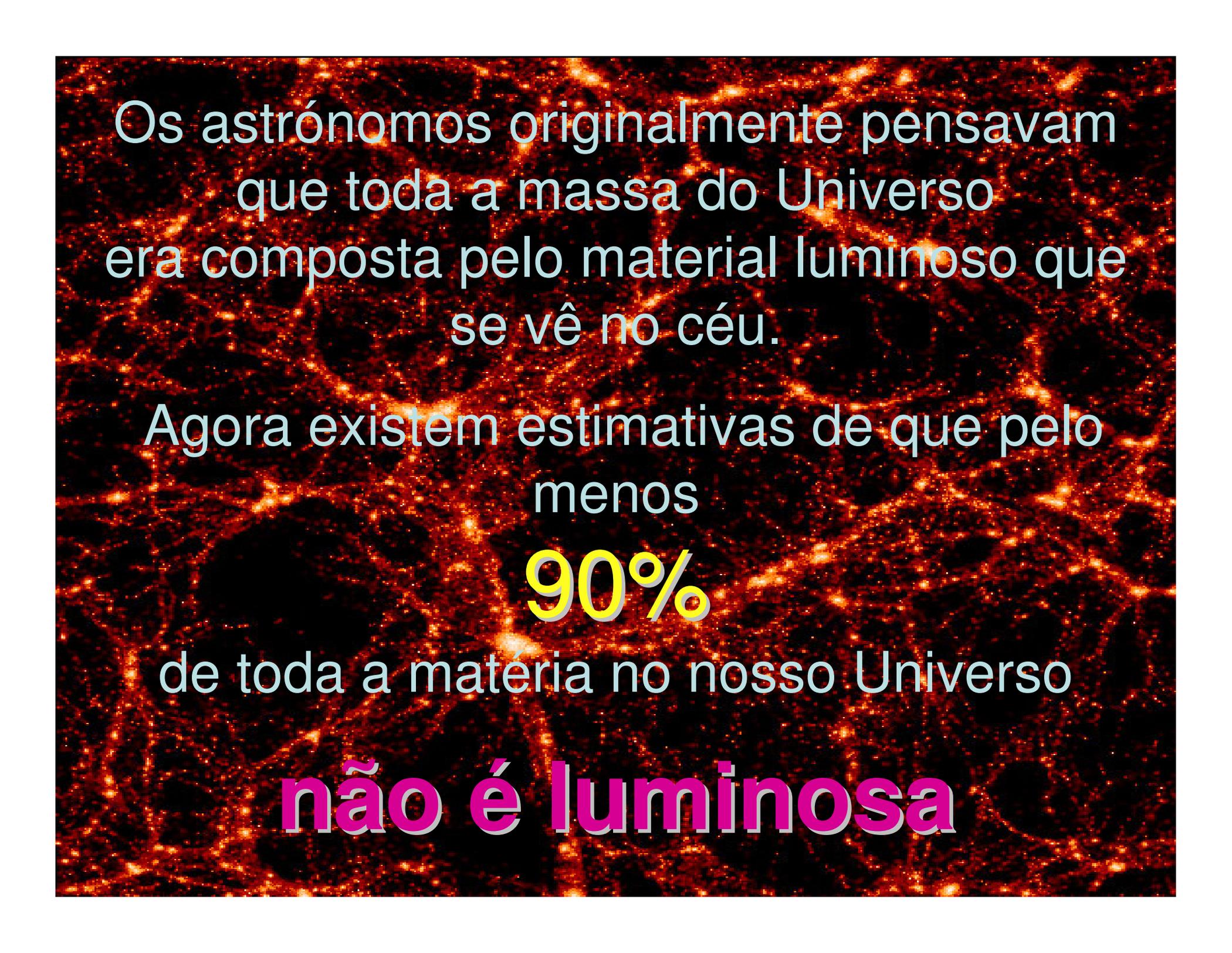
A MATÉRIA PRIMA DO NOSSO UNIVERSO

ANGELINO GONÇALVES

UNIVERSIDADE DA MADEIRA

14 DE JULHO DE 2003





Os astrónomos originalmente pensavam
que toda a massa do Universo
era composta pelo material luminoso que
se vê no céu.

Agora existem estimativas de que pelo
menos

90%

de toda a matéria no nosso Universo

não é luminosa

A

MATÉRIA ESCURA

não tem praticamente nenhuma interacção
com a

“MATÉRIA NORMAL”.

A radiação que ela emite ou é muito fraca
ou não existe, e por isso só pode ser
detectada pela sua influência gravitacional.

A presença de

MATÉRIA ESCURA

nas galáxias e enxames de galáxias tem um efeito na cinética destes sistemas, e tem muitas implicações para a

formação de estrutura.

Historicamente, a maior parte dos acontecimentos em relação à

MATÉRIA ESCURA

aconteceram durante o **Século XX**, mas já houve sugestões de que havia

MATÉRIA ESCURA

antes de **1900**, com indicações de que existiam

objectos não-luminosos.

No início do **Século XX** os astrónomos encontraram uma relação aproximada **massa-densidade** na vizinhança do Sol, utilizando a distribuição das estrelas e as suas velocidades.

A conclusão desta descoberta é que existia

MATÉRIA ESCURA.

(**3** **estrelas escuras** para **cada estrela luminosa**).

Durante os **anos 30** os Astrónomos
concluíram que as Galáxias no
Enxame de Coma
estavam movimentar-se muito rapidamente.

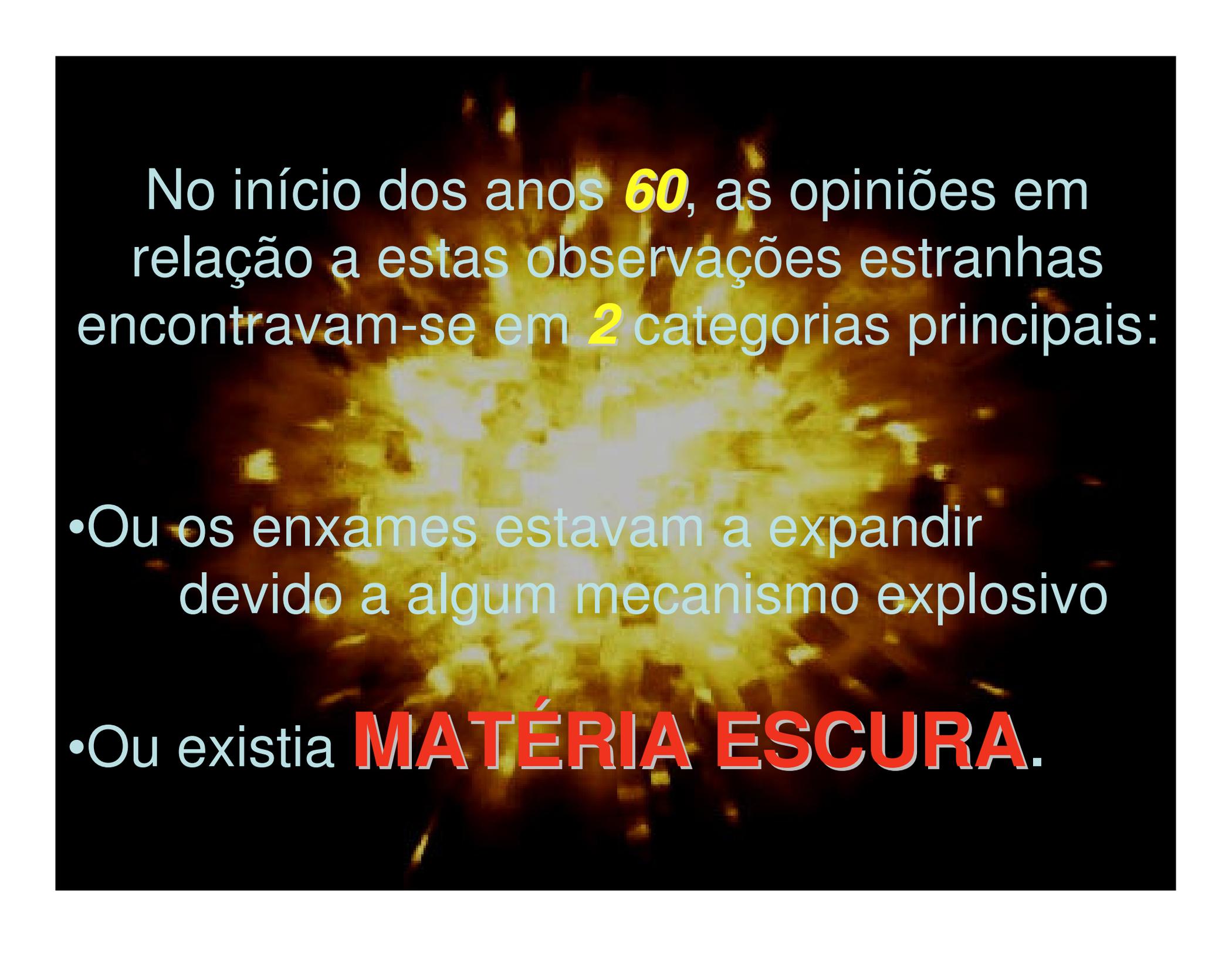
Também em **1936**, observações revelaram
que as galáxias do

Enxame de Virgem
estavam a movimentar-se rápido demais
mas não escapavam do enxame, como era
de esperar.

Durante os **anos 40 e 50**, os Astrónomos observaram o movimento de enxames dentro dos

***super-enxames de Virgem,
Hercules e Canum
Venaticorum,***

encontrando novamente as velocidades dos enxames muito altas.



No início dos anos **60**, as opiniões em relação a estas observações estranhas encontravam-se em **2** categorias principais:

- Ou os enxames estavam a expandir devido a algum mecanismo explosivo
- Ou existia **MATÉRIA ESCURA**.

No princípio da década de **70**, os Radio Astrónomos concluíram que o

gás de hidrogénio

na parte exterior das galáxias estava com a mesma velocidade que o

gás de hidrogénio

perto do centro, o que não deveria acontecer.

Em **1974**, foi feita uma simulação de computador de um disco luminoso de uma galáxia, sem um halo esférico de

MATÉRIA ESCURA.

Este disco tornou-se instável, e algumas estrelas eram lançadas para fora do disco.

Assim, concluíram que era necessário um halo esférico, pelo menos do tamanho do disco luminoso, para dar estabilidade ao disco.

Existe evidência da existência de

MATÉRIA ESCURA

dentro do nosso próprio grupo local.

M31 e a ***VIA LÁCTEA*** estão a aproximar-se um do outro a uma velocidade de cerca de **100** Km/s.

Esta velocidade é demasiado alta se considerarmos a atracção gravitacional entre as **2** espirais gigantes e as galáxias anãs.



Os Astrónomos concluíram que deve haver
à volta de

10 vezes mais

MASSA ESCURA

do que

MASSA LUMINOSA.

A

MATÉRIA ESCURA

também é necessária para explicar a
estrutura das

Galáxias de Anel Polar,

estruturas raras que consistem num anel de
estrelas à volta de uma esfera de estrelas.

A

MATÉRIA ESCURA

é geralmente subdividida em **2** categorias:

Aquela que é composta por

- ***material bariónico***

e a que é composta de

- ***material não-bariónico.***

Os candidatos

bariônicos

emitem apenas radiação de um

corpo negro

muito fraca, e os melhores candidatos são em geral aglomerações de partículas em vez de partículas individuais.

Os candidatos
não-bariónicos
são *neutros*.

A falta de carga implica que não existe nenhuma interacção com outra matéria carregada e por isso estas partículas não emitem radiação.

Pensa-se que eles existem em partículas individuais, separadas.

neutrino

Candidatos bariônicos

A sugestão que a

MATÉRIA ESCURA

tem a mesma velocidade rotacional que a

matéria visível,

sugere que ambos são compostos do mesmo tipo de material ***bariônico***.

Os candidatos para a

MATÉRIA ESCURA

que compõem o halo ***escuro*** de uma
Galáxia ou enxame são chamados

***“Massive Astronomical Compact Halo
Objects”***,

ou

MACHOs.

○ melhor candidato para

MATÉRIA ESCURA bariônica

são as

anãs brancas.

Há evidência de que os halos das Galáxias
são compostas por mais de **50%** de

anãs brancas.

Outro candidato é o

gás frio

Existem evidências a favor e contra de que este ***gás*** constitua a maior proporção da

MATÉRIA ESCURA.

Outros candidatos, incluindo

anãs castanhas, objectos do tamanho de Júpiter, estrelas infravermelhas fracas, estrelas de neutrões e buracos negros

são hipóteses, mas não são bons
candidatos para

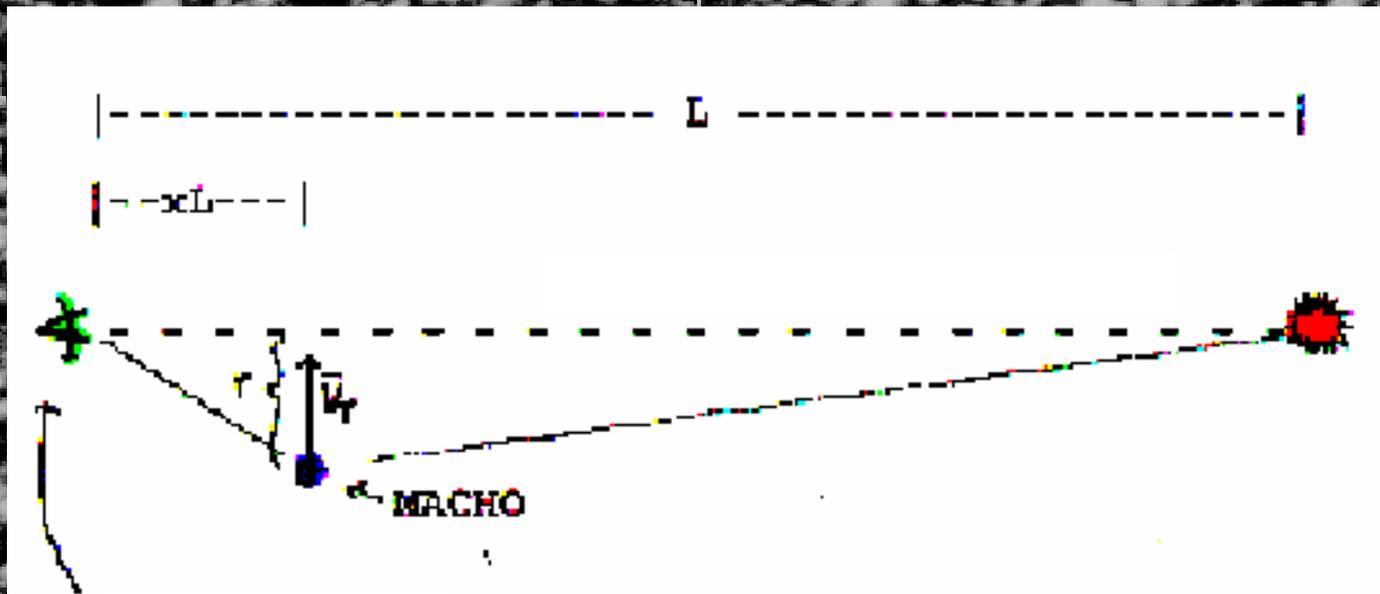
MATÉRIA ESCURA bariónica.

Microolentes.

Uma das formas de procurar qualquer tipo de **MACHOs**, é procurar **MACHOs** que são

microlentes gravitacionais

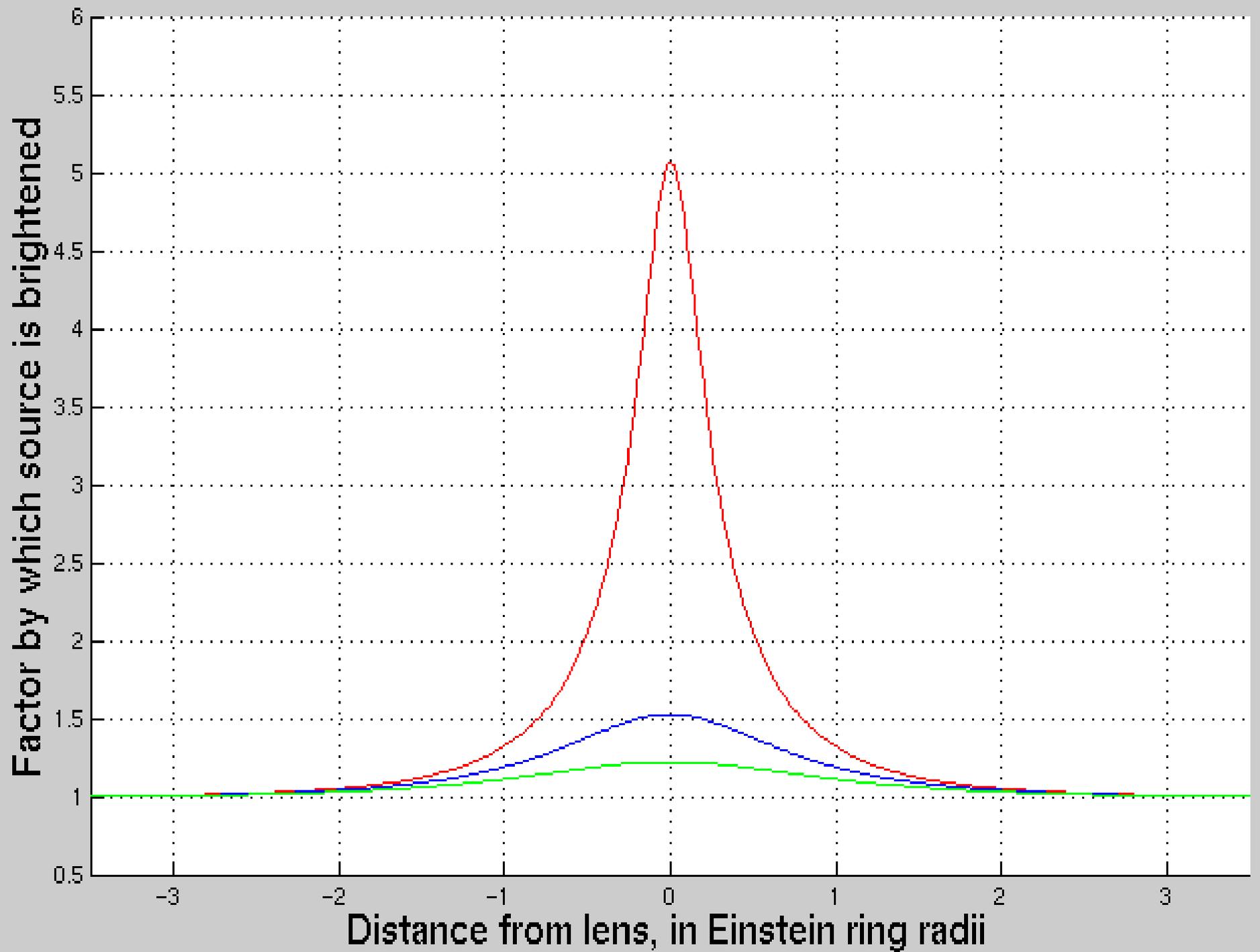
da luz que vem das estrelas distantes.



Se o evento durar **30 min**, a massa do **MACHO** é **$10^{-7} M_0$** , o valor típico para um **planeta**.

Se $\langle t \rangle$ for de **3 semanas**, a massa é **$0.1 M_0$** , valor típico para uma estrela **anã vermelha**.

Um $\langle t \rangle$ de **5 -8 semanas** indica uma massa do **MACHO** na região de uma **anã branca**.



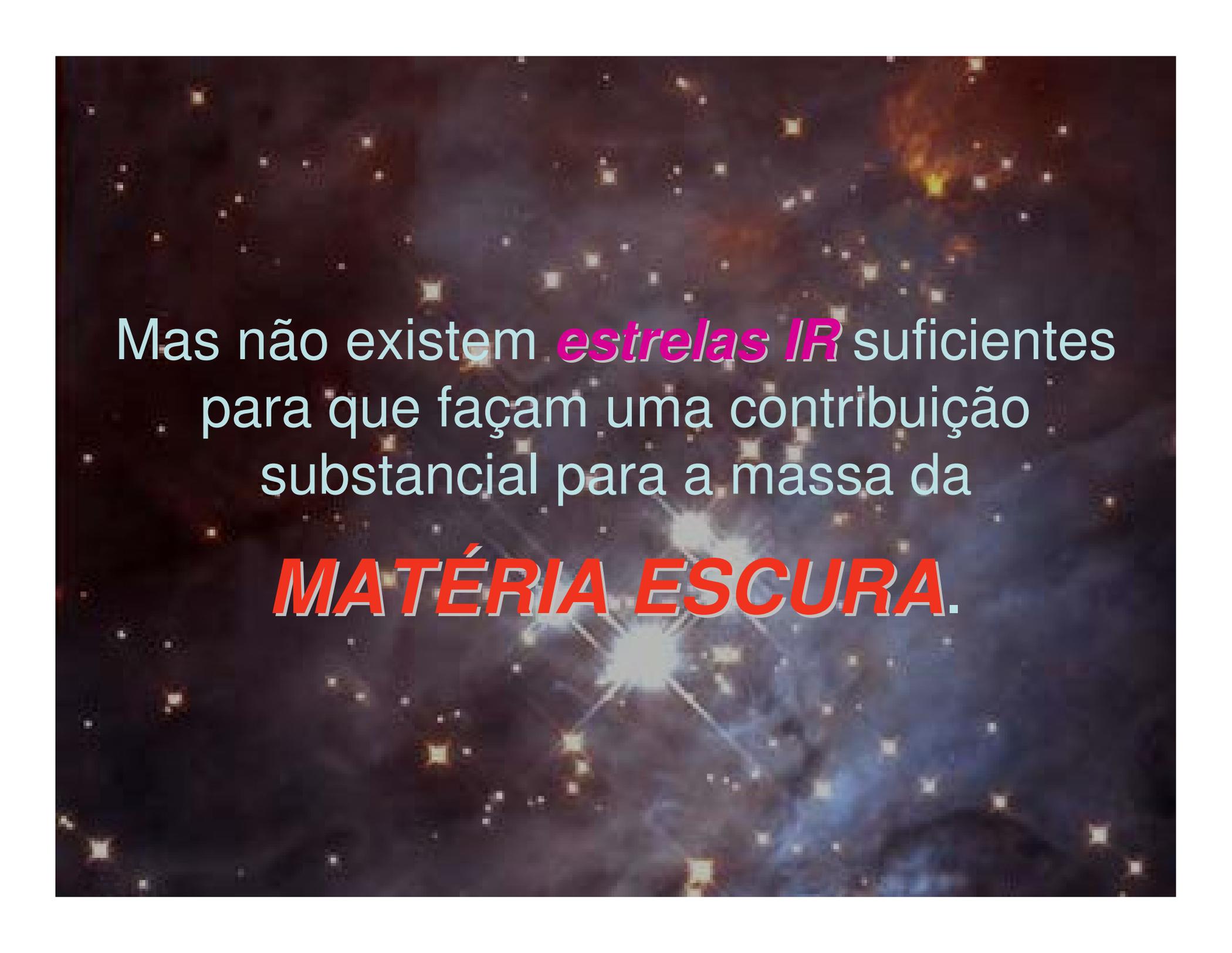
Estrelas IR fracas.

O próximo candidato para

MATÉRIA ESCURA bariónica

são ***estrelas infravermelhas fracas***, que
radiam mais na zona do ***IR*** do que no
visível.

As ***estrelas IR*** tem uma massa à volta de
0.1 M₀.



Mas não existem *estrelas IR* suficientes
para que façam uma contribuição
substancial para a massa da

MATÉRIA ESCURA.

Anãs castanhas.

Outro candidato para

MATÉRIA ESCURA bariônica

são as

anãs castanhas.

The background of the slide features a bright, orange-red star on the right side, partially obscured by a dark, circular foreground object on the left. The text is overlaid on this background.

Também chamadas

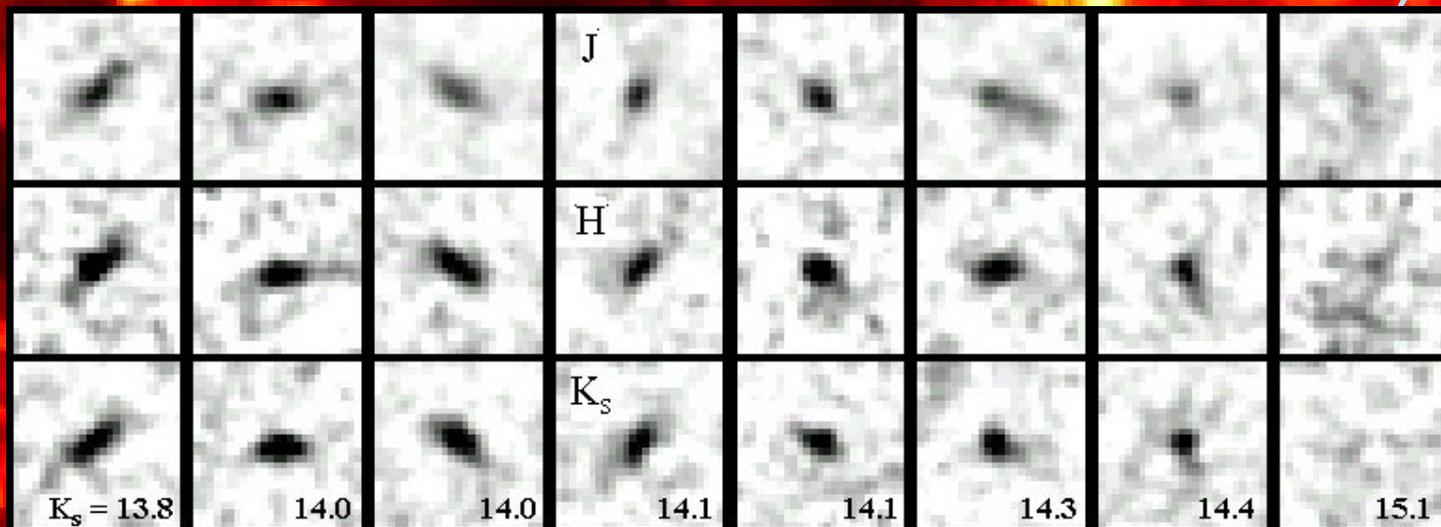
“estrelas abortadas”,

têm à volta de **$0.8 M_0$** , e não podem converter **hidrogénio** em **hélio**.

A única energia radiada é devido à contracção gravitacional, razão que as torna muito difíceis de detectar.

Galáxias de baixo brilho superficial.

Galáxias de baixo brilho superficial (*LSB*) também contribuem. (*Galáxias difusas* com brilho superficial **5 -20 vezes** inferior ao brilho das *Galáxias normais*)



A sua contribuição exacta ainda está incerta devido ao facto de ainda não sabermos quantas existem.

As próprias *Galáxias LSB* contêm grandes quantidades de

MATÉRIA ESCURA,

que podemos medir a partir das suas curvas de rotação.

A diagram of a neutron star. It features a central blue sphere representing the core. Surrounding this core are several concentric, brown, elliptical lines that represent the star's magnetic field. The lines are more densely packed near the poles and spread out towards the equator. A vertical black line passes through the center of the star, and a horizontal black line is visible near the top pole. The background is a light gray.

Estrelas de Neutrões.

Têm massa entre **1.4** e **2 M_0** , mas não têm uma contribuição muito grande para a massa da

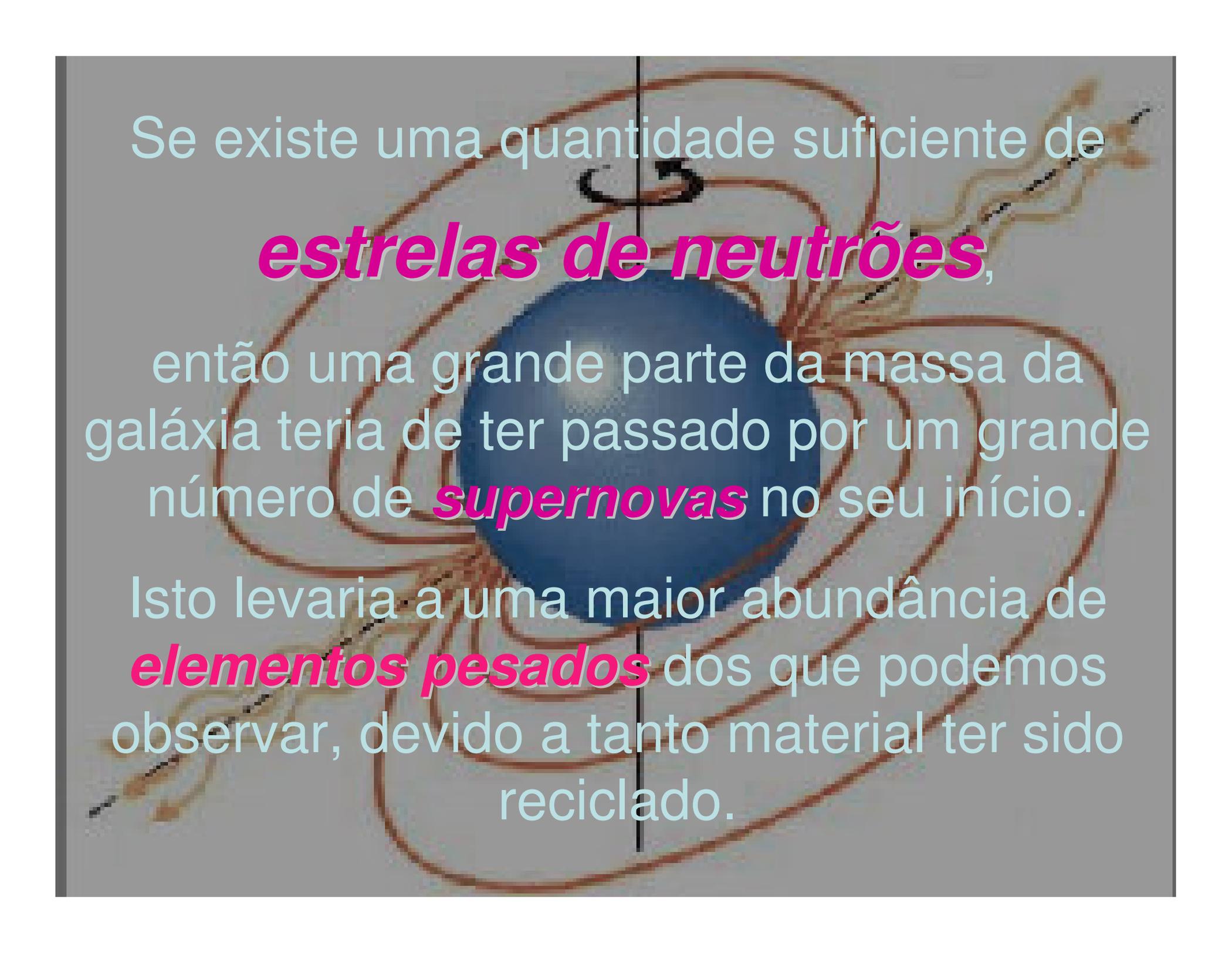
MATÉRIA ESCURA.

A diagram of a neutron star, depicted as a blue sphere with a vertical axis and several concentric, slightly tilted rings around it. The background is a light gray with some faint, abstract lines.

As estrelas que formam
estrelas de nêutrons

têm à volta de **$10 M_{\odot}$** .

Por isso mais do que **$8 M_{\odot}$** são libertadas durante a ***supernova***, para constituírem material para formar ***estrelas novas***, ou para permanecer como ***gás interestelar***.



Se existe uma quantidade suficiente de

estrelas de neutrões,

então uma grande parte da massa da galáxia teria de ter passado por um grande número de ***supernovas*** no seu início.

Isto levaria a uma maior abundância de ***elementos pesados*** dos que podemos observar, devido a tanto material ter sido reciclado.

Buracos Negros.

Enormes Buracos Negros

são normalmente vistos de forma suspeita
como candidatos a

MATÉRIA ESCURA bariónica,

porque fariam com que as velocidades dos
objectos na sua vizinhança aumentassem
drasticamente.

Como a componente das velocidades normais ao disco também iriam ser amplificadas, os discos das espirais iriam ficar mais grossos; o que não se observa.

Buracos Negros

primordiais, formados no início do Universo, são candidatos a

MATÉRIA ESCURA

Irregularidades no Universo primordial podem ter causado o colapso de matéria, levando à formação de estrelas muito grandes com um tempo de vida muito curto, formando de seguida

Buracos Negros

e

Estrelas de Neutrões



No momento da sua morte, estes

Buracos Negros

iriam ejectar pouca ou nenhuma massa.

Se não tivesse sido assim já teríamos observado sinais da sua existência.

Gás

A qualquer temperatura ou densidade,
todo o

gás

emite ou absorve nalguma parte do
espectro electromagnético, fazendo com
que seja difícil esconder

gás

na vizinhança do Sistema Solar.

Gás bariónico frio

distribuído uniformemente na Via Láctea não é, por isso possível, porque desse modo já teríamos visto as linhas de absorção na luz vinda de outras Galáxias.

Enquanto estes factos sugerem que o

gás

não pode ser

MATÉRIA ESCURA

porque não está escondido, há evidência
que sugere que existe

gás bariónico frio,

tanto, ***luminoso*** como ***não-luminoso***, em
Galáxias e Enxames.

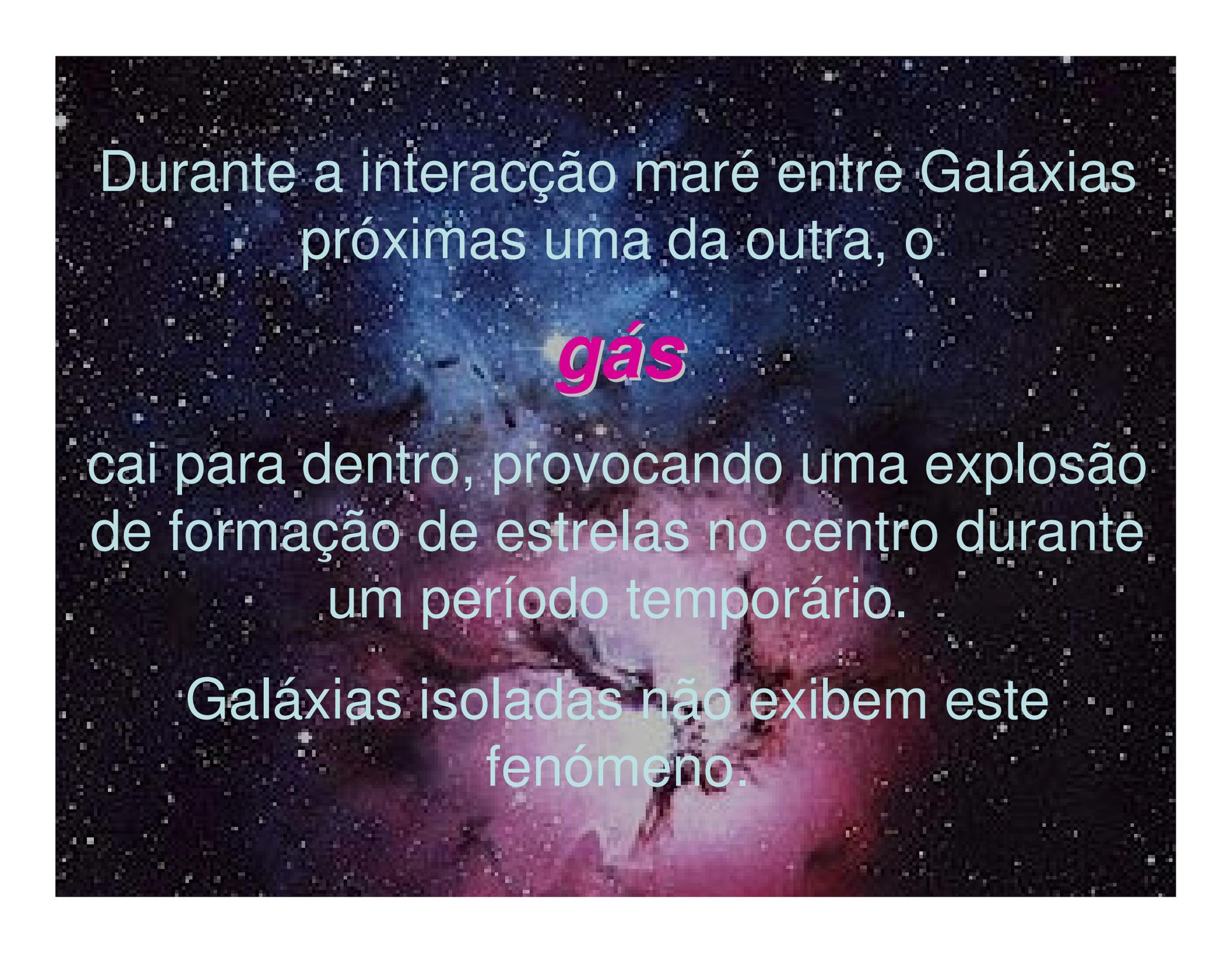
As propriedades da formação de estrelas nas Galáxias fornecem evidência de que a

MATÉRIA ESCURA

existe na forma de

gás molecular fractal,

frio e bariónico.



Durante a interacção maré entre Galáxias próximas uma da outra, o

gás

cai para dentro, provocando uma explosão de formação de estrelas no centro durante um período temporário.

Galáxias isoladas não exibem este fenómeno.

Existe *gás* que emite em raios-X nos enxames ricos. Este

gás quente

é um bom indicador de

MATÉRIA ESCURA

nos enxames; ele acumula perto de sobre-
densidades de matéria *não-luminosa*
como de matéria *luminosa*.

Os astrónomos estimam que a contribuição da massa do **gás** é igual à massa com que as **estrelas** contribuem para a massa final do sistema, ou seja,

$$\Omega_{\text{gás}} = \Omega_{\text{luminosidade}} = 0.05,$$

aproximadamente.

Por isso,

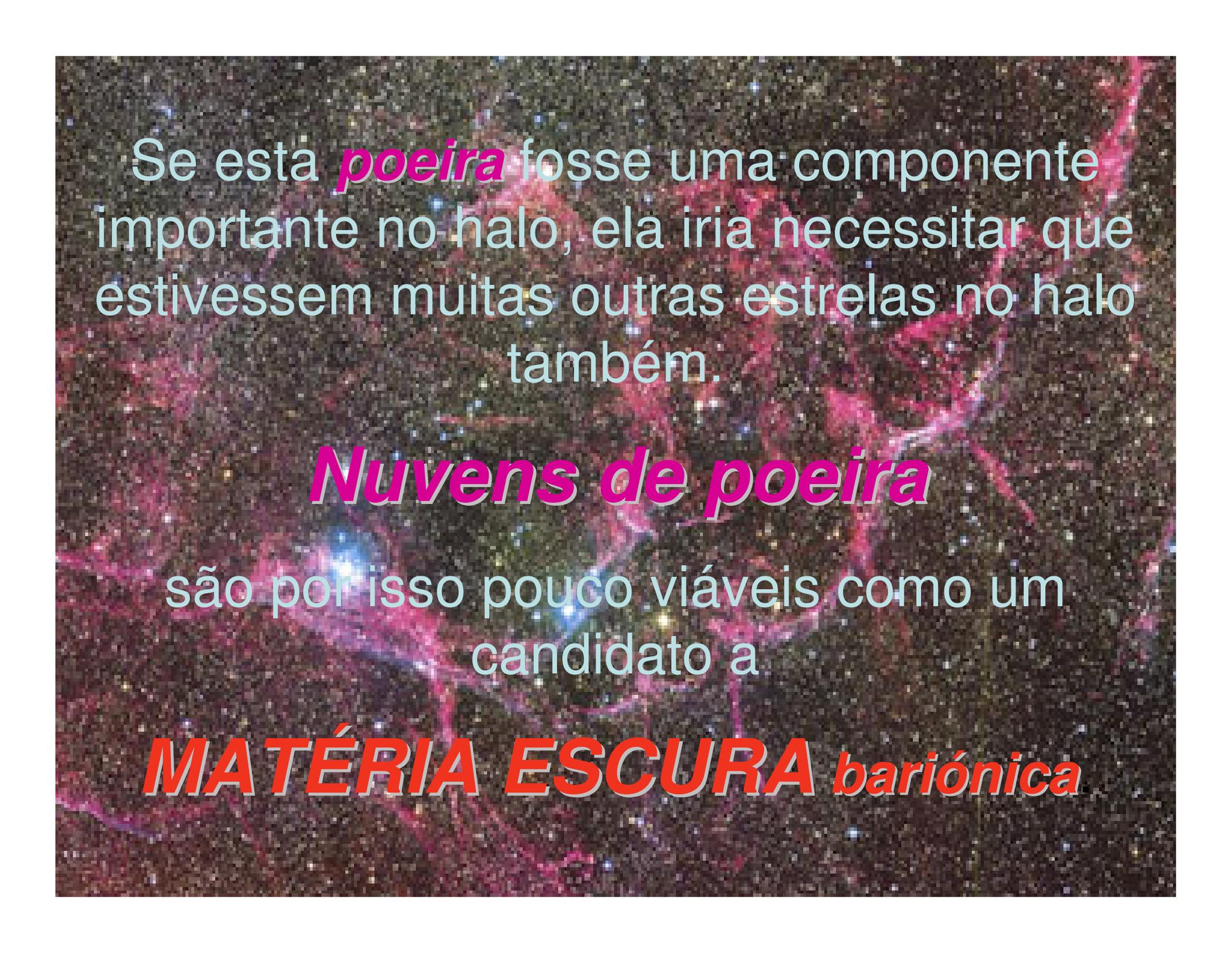
$$\Omega_{\text{Barião}} = 0.1.$$

Nuvens de poeira.

Nuvens de poeira,

que consistem de elementos pesados (> *He*), iriam avermelhar e absorver a luz vinda do espaço.

Os elementos pesados, menos que **2%** por massa de todos os elementos, são produzidos no interior das estrelas e ejectados para o meio interstelar durante *supernovas*.



Se esta *poeira* fosse uma componente importante no halo, ela iria necessitar que estivessem muitas outras estrelas no halo também.

Nuvens de poeira

são por isso pouco viáveis como um candidato a

MATÉRIA ESCURA bariônica

Conjuntos de Quarks.

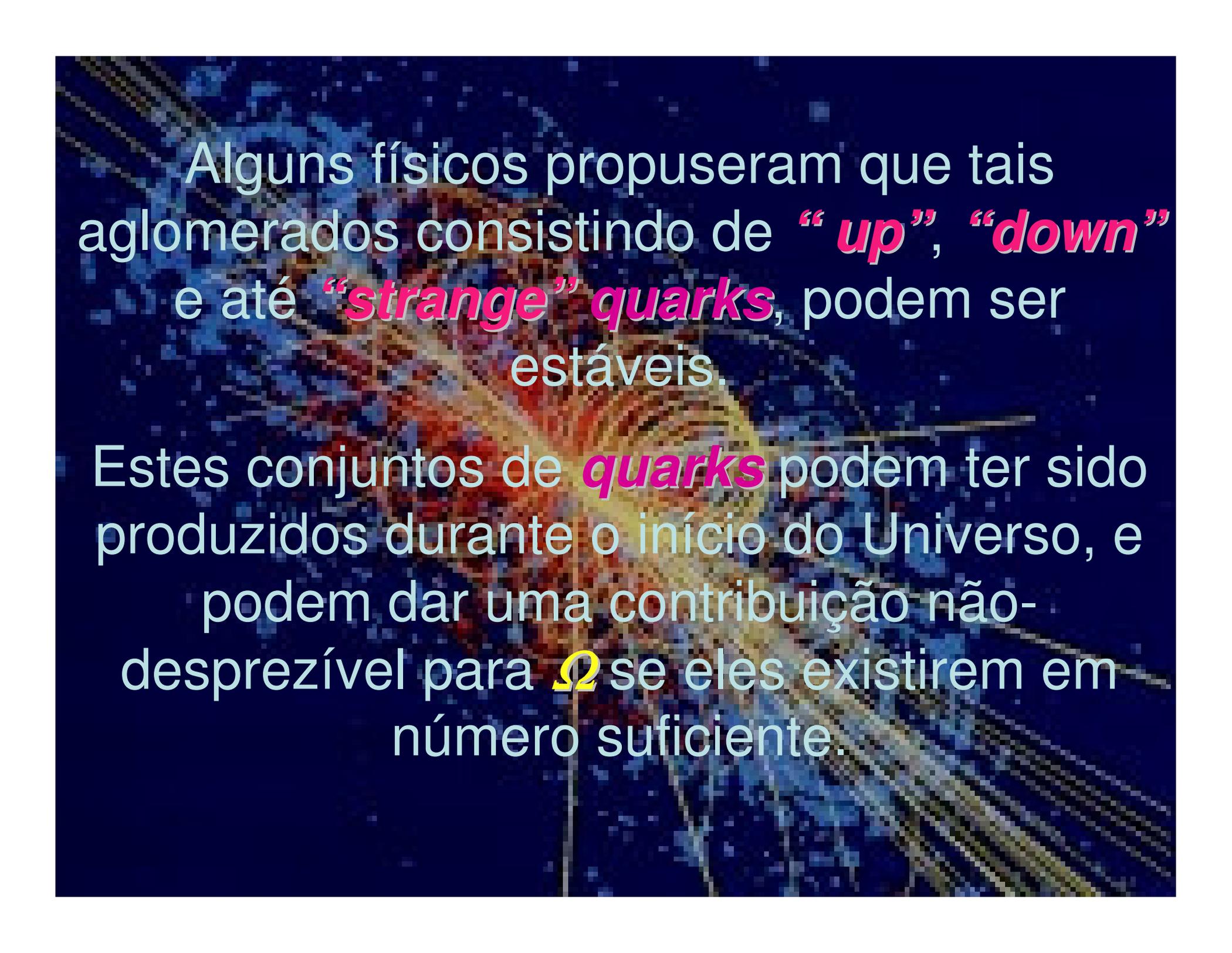
Outro candidato *bariônico* são os conjuntos de

quarks,

aglomerações hipotéticas de muitos

quarks,

de *1 mm* a *1 m* de diâmetro, extremamente pesados e de movimento lento.

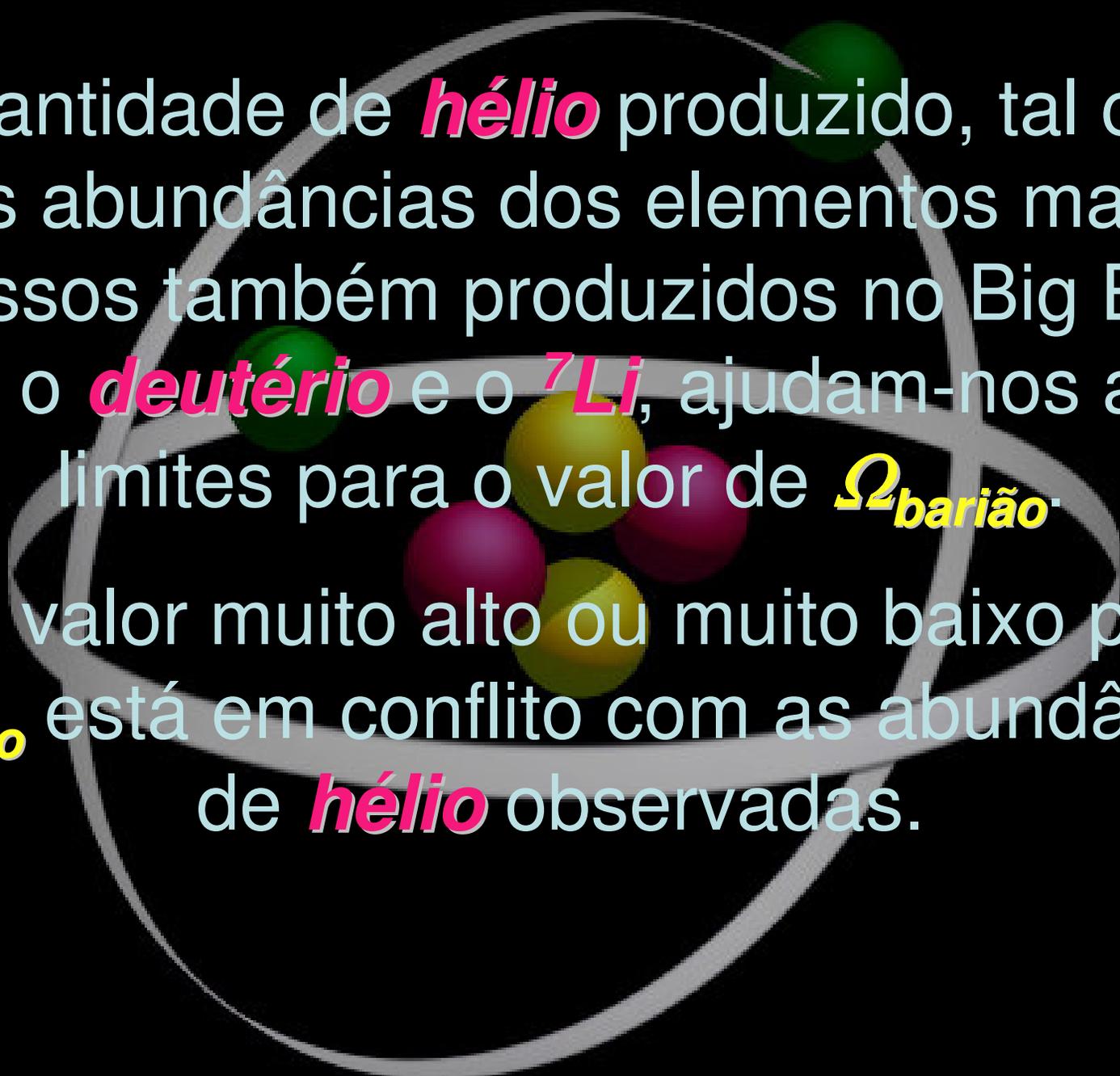


Alguns físicos propuseram que tais aglomerados consistindo de “*up*”, “*down*” e até “*strange*” *quarks*, podem ser estáveis.

Estes conjuntos de *quarks* podem ter sido produzidos durante o início do Universo, e podem dar uma contribuição não-desprezível para Ω se eles existirem em número suficiente.

Matéria escura não-bariônica.

É possível determinar a contribuição de toda a matéria ***bariônica*** no Universo, ***luminoso*** e ***não-luminoso***, ao parâmetro de densidade Ω , observando o ***Hélio*** produzido a partir dos bariões durante o nucleossíntese do Big Bang.



A quantidade de **hélio** produzido, tal como as abundâncias dos elementos mais escassos também produzidos no Big Bang, como o **deutério** e o ${}^7\text{Li}$, ajudam-nos a fixar limites para o valor de $\Omega_{\text{barião}}$.

Um valor muito alto ou muito baixo para $\Omega_{\text{barião}}$ está em conflito com as abundâncias de **hélio** observadas.

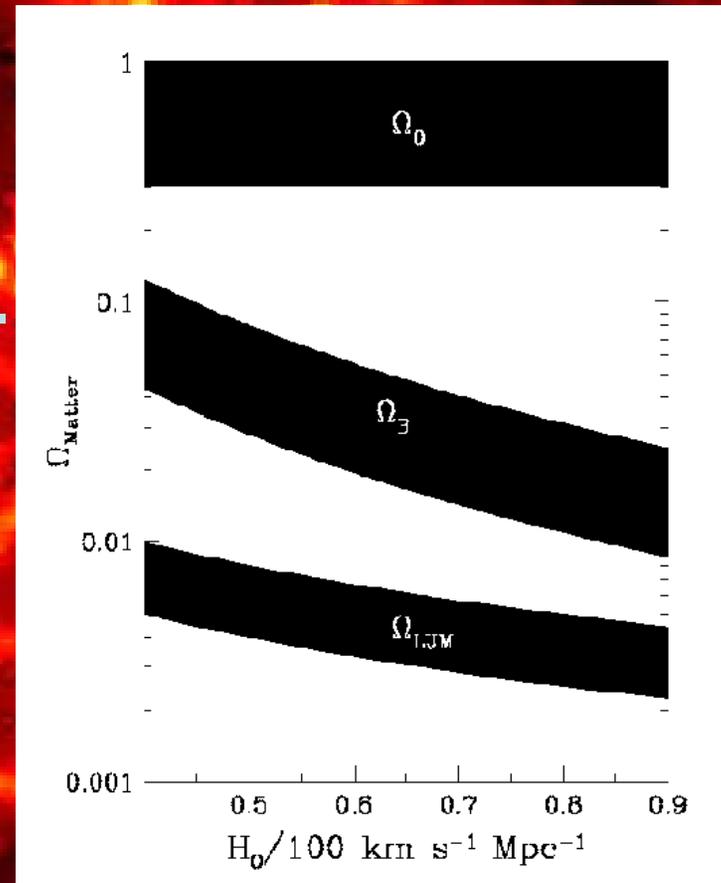
Como $\Omega_{\text{bari\~{a}o}}$ é um valor tão baixo, e acreditamos que Ω_0 está próximo de **1**, como indica a inflação, chegamos à conclusão que a maior parte da matéria no Universo é *não-bariônica*.

$\Omega = 1$ implica

$$\Omega_{\text{bari\~{a}o}} = 0.05 - 0.1$$

e

$$\Omega_{\text{n\~{a}o-bari\~{a}o}} = 0.9 - 0.95$$



Porque toda a *matéria luminosa* é *bariônica*, a existência de

matéria não-bariônica

implica a existência de

MATÉRIA ESCURA não-luminosa.

MATÉRIA ESCURA *não-bariônica*

está dividida em **2** categorias genéricas,

MATÉRIA ESCURA *fria,*

CDM,

e ***MATÉRIA ESCURA*** *quente,*

HDM.



As partículas da

MATÉRIA ESCURA *fria*,

que também são chamadas “*Weakly Interacting Massive Particles*”, ou ***WIMPs***, tipicamente têm massas superiores e movimentam-se a velocidades inferiores às partículas ***HDM***.

As diferenças chave são relevantes para a ***formação de estrutura***.

Neutrinos.

O

neutrino

é um exemplo de *HDM*, porque não tem quase massa nenhuma.

É um excelente candidato a

MATÉRIA ESCURA.



Existem **3** famílias conhecidas de *leptões*,
e por isso **3** tipos de *neutrinos*
(mais **3** *anti-neutrinos*).

Se existissem mais famílias de *leptões* e
neutrinos ainda não detectados, estas
novas partículas poderiam compor a

MATÉRIA ESCURA não-barionica.



neutrino

As abundâncias por nós calculadas do *hélio* primordial sugerem que existem apenas **3** tipos de

neutrinos,

o que constitui uma restrição na contribuição dos

neutrinos

para Ω .

neutrino



Partículas SUSY.

No início do Universo

(antes do **tempo de Planck, 10^{-43} seg,**
ou **$T > 10^{19}$ GeV**)

havia

SUPER-SIMETRIA (SUSY),

em que todas as forças da natureza estão
unidas e indistinguíveis.

Fermiões e bosões

são indistinguíveis nesta era, e podem ser transformados uns nos outros.

Toda a partícula contém uma partícula parceira hipotética

SUSY

com um *spin* que difere por $h/2$.

No entanto, estas partículas, se existirem, e se tiverem massa não-nula e forem suficientemente estáveis para durarem até hoje, irão contribuir para a

massa-densidade

do Universo, e por isso são candidatos a

MATÉRIA ESCURA.

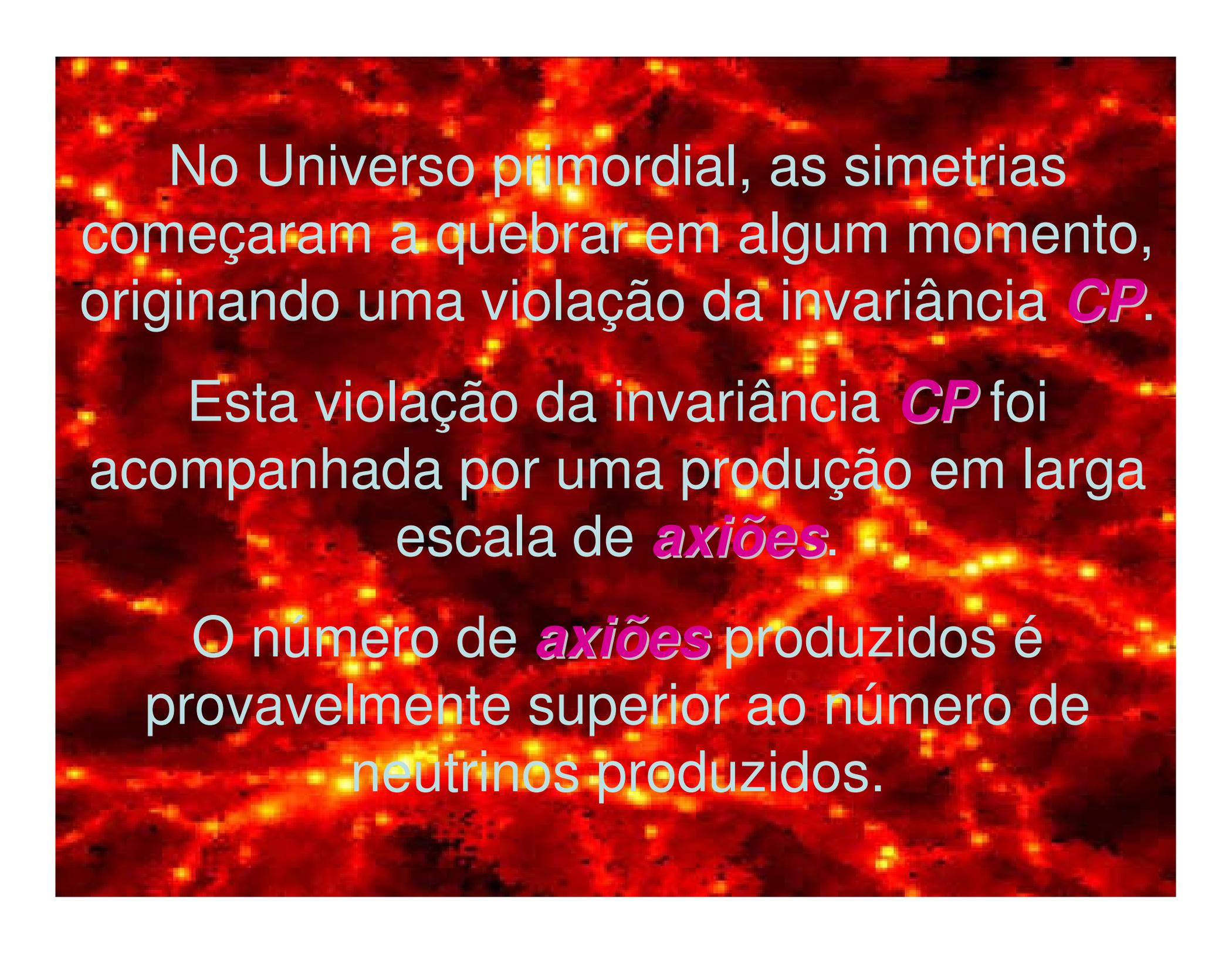
Existem **3** tipos de invariância que se aplicam às leis da física:

- ***Invariância da carga (C)***, a conservação da carga total.
- ***Invariância de paridade (P)***, que diz que se as leis funcionarem para um sistema **S**, então elas devem funcionar para um sistema **S'** espacialmente reflectida na origem.
- ***Invariância do tempo (T)***, que diz que as leis funcionam se o tempo estiver a correr para a frente ou para trás.

Axiões.

As leis da física são reguladas pela invariância CPT (todos os **3** operando simultaneamente), mas violações da invariância P e invariância CP existem.

Os **axiões** foram produzidos no início do Universo durante uma violação da invariância CP .



No Universo primordial, as simetrias começaram a quebrar em algum momento, originando uma violação da invariância *CP*.

Esta violação da invariância *CP* foi acompanhada por uma produção em larga escala de *axiões*.

O número de *axiões* produzidos é provavelmente superior ao número de neutrinos produzidos.

A interacção dos *axiões* é 10^{12} vezes inferior à interacção fraca normal.

Se fosse mais forte, os *axiões* seriam produzidos e emitidos pelas estrelas fazendo com que o tempo de vida das mesmas fosse muito inferior ao observado.

Os *axiões* ainda não foram detectados, porque a sua interacção com a

matéria normal

é muito fraca.

Existem dois intervalos de massa que
fariam com que $\Omega_0 = 1$:

- **MATÉRIA ESCURA** *fria*, **CDM**,
com as massas individuais das partículas à
volta de **1 GeV/c²**,
- e
- **MATÉRIA ESCURA** *quente*, **HDM**,
com as massas individuais das partículas
entre **10 - 100 eV/c²**.

CDM

A massa exacta da

MATÉRIA ESCURA *fria*

depende da força que as partículas têm quando interagiram com outra matéria, tal como o valor do tempo e da temperatura quando as partículas se separaram da outra matéria.

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of red, orange, and yellow spots against a dark background, representing temperature variations in the early universe.

Partículas

CDM

interagem entre si gravitacionalmente e interagem fracamente com as outras partículas por meio de interações fracas normais.

HDM

Muito mais leves em massa do que as
partículas de

MATÉRIA ESCURA *fria,*

as partículas de

MATÉRIA ESCURA *quente*

movimentam-se a velocidades relativísticas.

Formação de estrutura.

Estruturas visíveis (*bariônico*) formam apenas depois da *matéria bariônica* se ter separado da radiação.

Antes de se separarem, os *bariões* não podiam contrair-se gravitacionalmente por entre o campo de radiação.

A

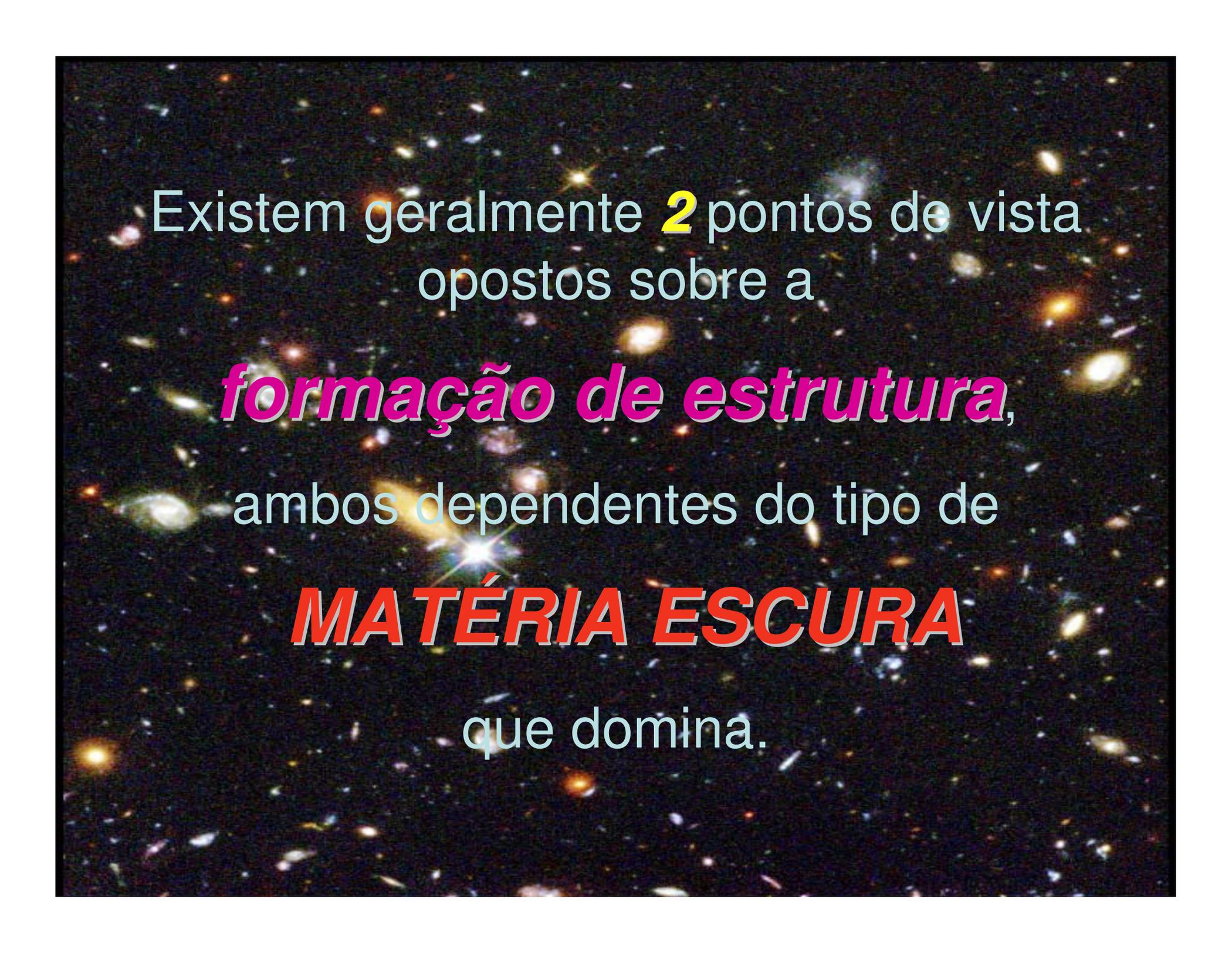
formação de estrutura

não é apenas determinada pela
matéria bariônica.

A ***matéria não-bariônica*** também participa
de uma forma crítica.

A grande diferença entre ***CDM*** e ***HDM*** é a
sua função na

formação de estrutura.



Existem geralmente **2** pontos de vista
opostos sobre a

formação de estrutura,

ambos dependentes do tipo de

MATÉRIA ESCURA

que domina.



O domínio por parte de

HDM

conduz-nos ao

método de defragmentação,

onde estruturas do tamanho de enxames
formam-se primeiro, e as galáxias só
aparecem depois.

A field of galaxies in the background, showing various shapes and colors (yellow, orange, blue, white) against a dark space.

A

CDM

conduz-nos ao método de

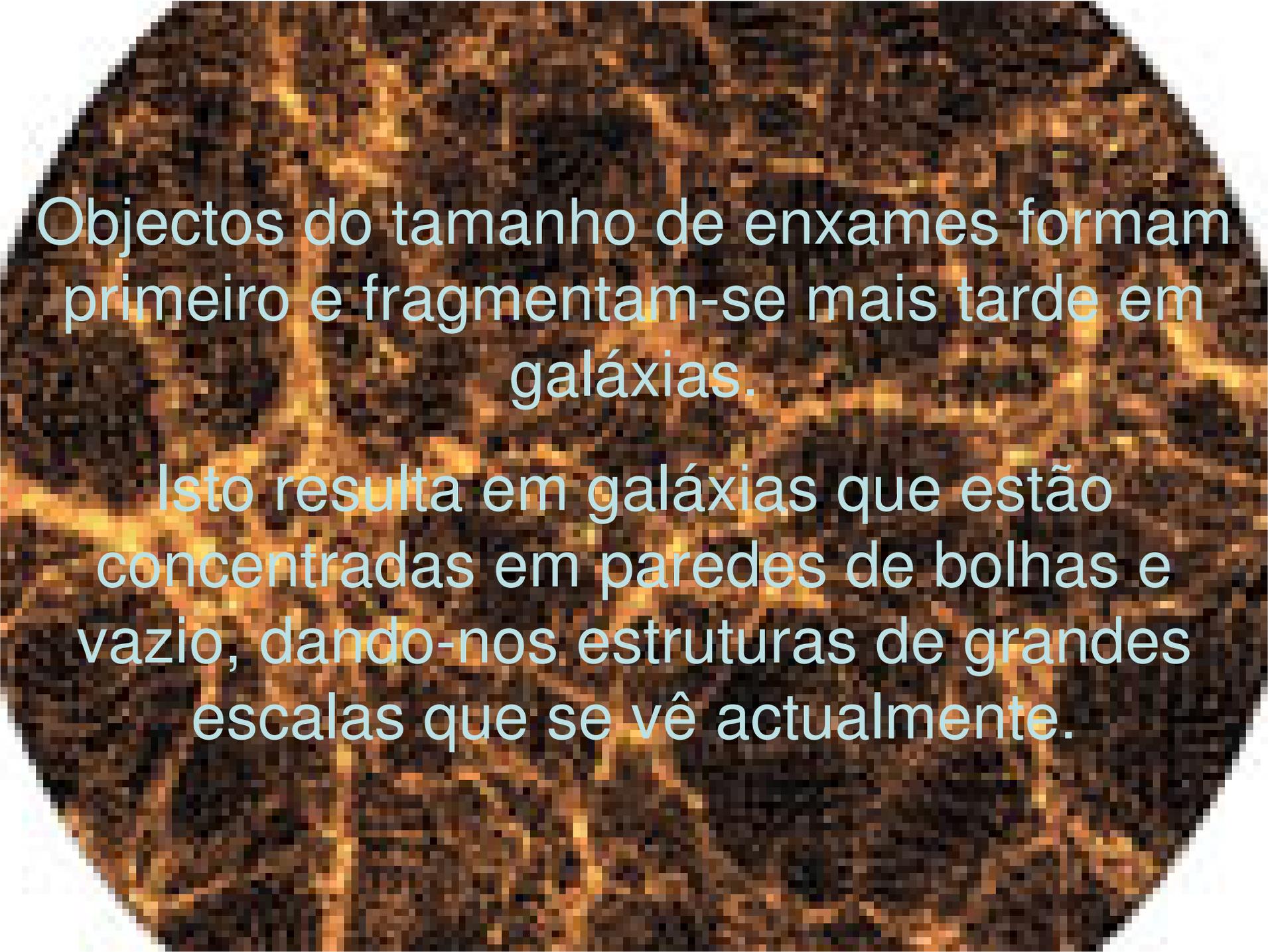
agrupamento em hierarquia,

onde as galáxias formam-se primeiro, e depois agregam-se para formar grupos de galáxias, que por sua vez agregam-se para formar enxames pobres, depois enxames ricos, e por fim super-enxames.

Porque as partículas **HDM** têm velocidades muito próximas de **c**, a gravidade não vai confiná-las até que as suas velocidades tenham baixado para velocidades não-relativísticas.

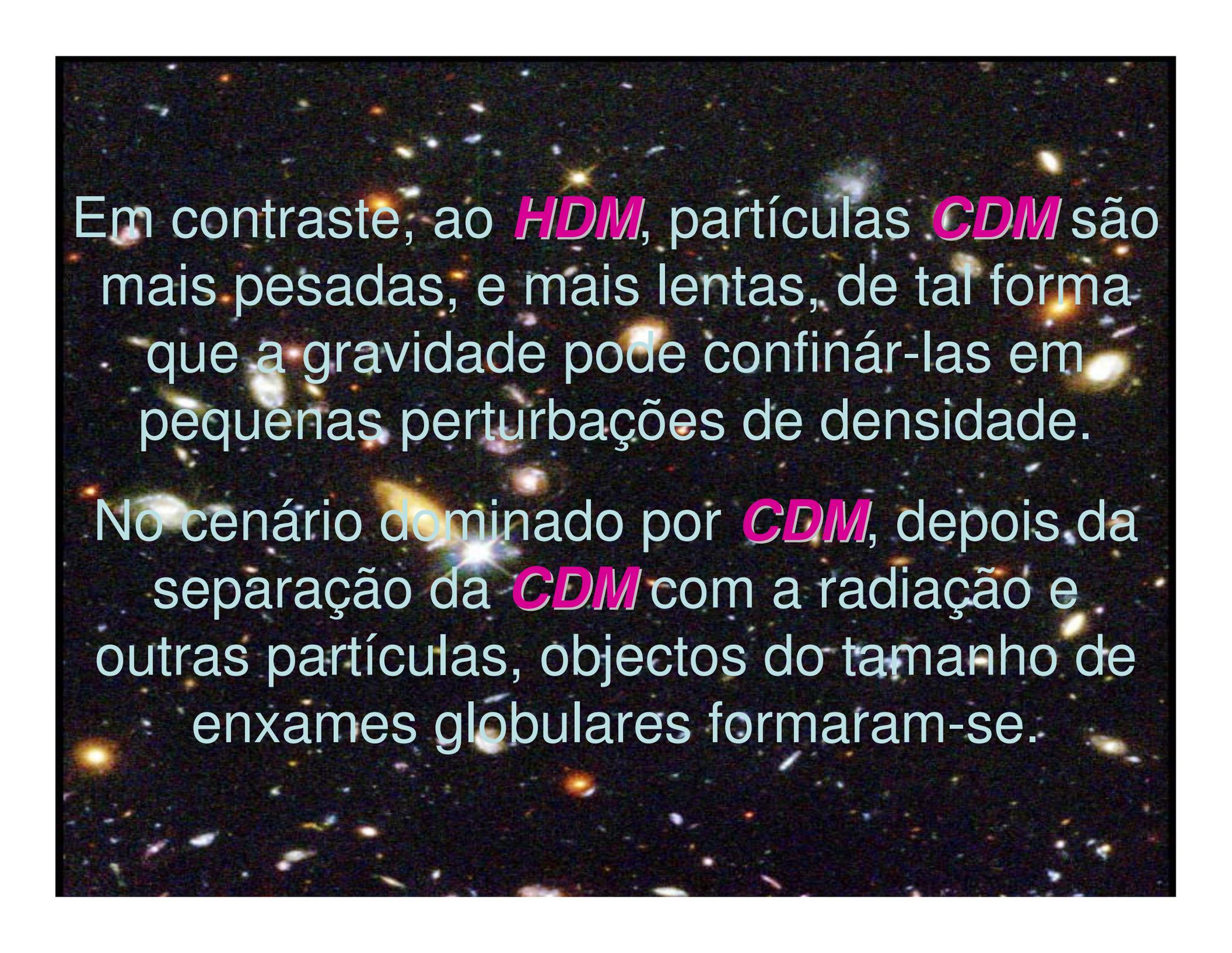
Quaisquer pequenas flutuações na densidade tendem a ser eliminadas pela corrente de neutrinos.

O resultado, se **HDM** dominar, é que as pequenas perturbações são eliminadas, e as grandes perturbações ficam.



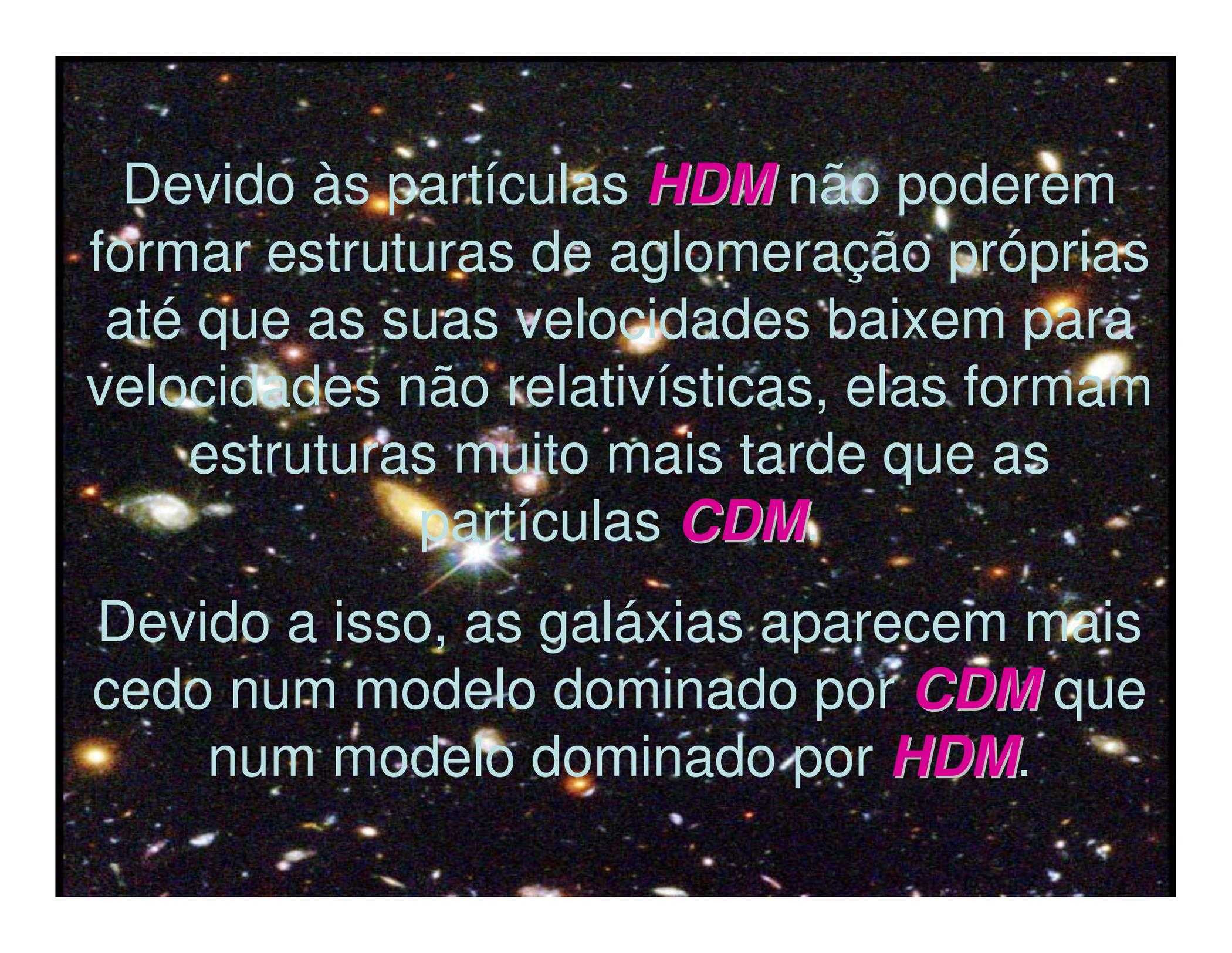
Objectos do tamanho de enxames formam primeiro e fragmentam-se mais tarde em galáxias.

Isto resulta em galáxias que estão concentradas em paredes de bolhas e vazios, dando-nos estruturas de grandes escalas que se vê actualmente.



Em contraste, ao **HDM**, partículas **CDM** são mais pesadas, e mais lentas, de tal forma que a gravidade pode confiná-las em pequenas perturbações de densidade.

No cenário dominado por **CDM**, depois da separação da **CDM** com a radiação e outras partículas, objectos do tamanho de enxames globulares formaram-se.



Devido às partículas **HDM** não poderem formar estruturas de aglomeração próprias até que as suas velocidades baixem para velocidades não relativísticas, elas formam estruturas muito mais tarde que as partículas **CDM**.

Devido a isso, as galáxias aparecem mais cedo num modelo dominado por **CDM** que num modelo dominado por **HDM**.

Em todos os *modelos*, Ω_{total} é posto em **1**,
como indica a inflação.

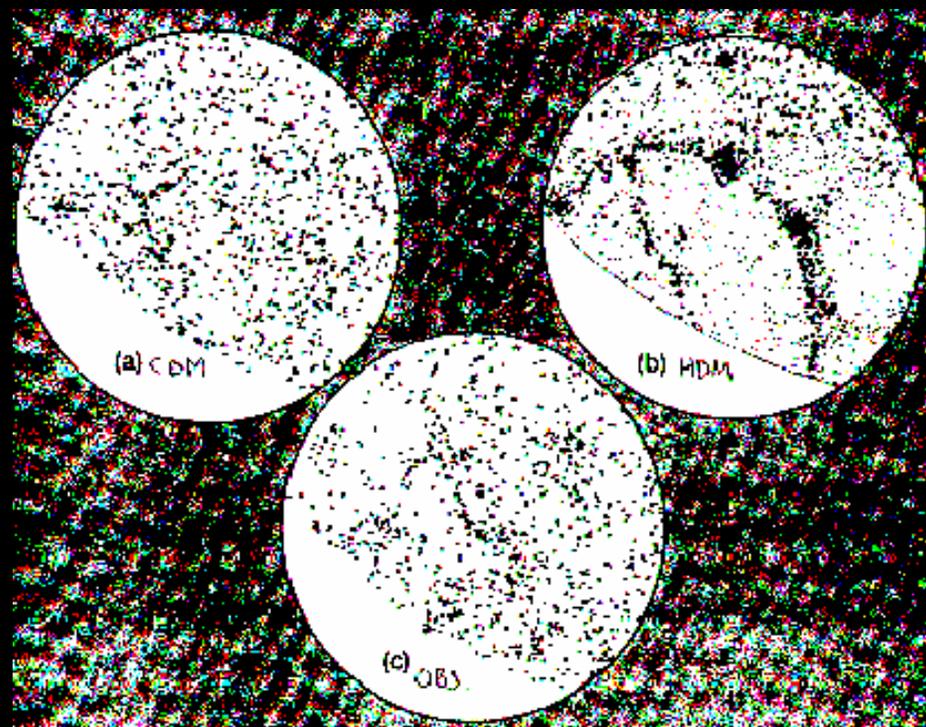
Modelos que são puramente *bariónicos*
($\Omega_{bariónico} = 1$) não são plausíveis. Não só
porque não se assemelham com o que é
observado, mas porque as abundâncias de
elementos leves seria diferente do que é
observado.

Modelos de apenas **HDM** ($\Omega_m = 1$) também não são plausíveis.

Não se assemelham ao que é observado, uma vez que o Universo tende a ter mais aglomeração de matéria do que os **modelos** de **HDM**.

(e há um excesso de enxames das grandes galáxias).

Modelos de apenas **CDM** ($\Omega_{\text{CDM}} = 1$) são um melhoramento dos **modelos HDM**; os **modelos CDM** têm uma maior quantidade de aglomeração. **Modelos CDM + bárions** ($\Omega_{\text{CDM}} = 0.95$, $\Omega_{\text{bárions}} = 0.05$) produzem resultados semelhantes.



Certas combinações de **CDM**, **HDM** e **matéria bariônica** tendem a resolver a maioria dos problemas.

$$(\Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{neutrino/HDM}} + \Omega_{\text{bariões}} = 1,$$

como indica a inflação,

e

$$\Omega_{\text{bariões}} = 0.05,$$

do Big Bang nucleosíntese).

A sugestão de

MATÉRIA ESCURA *fria desviada,*

ou ***TDM***,

é uma tentativa de reconciliar as falhas de
CDM e ***HDM***.

O ***TDM*** é matematicamente possível, mas os modelos que utilizam ***TDM*** mostram ser incompatíveis com as observações do ***CMBR***, principalmente nas grandes escalas

Formação de galáxias favorecidas.

O conceito de *formação de galáxias favorecidas* responde à pergunta se é verdade ou não que a *matéria bariônica* luminosa está distribuída da mesma forma que a

MATÉRIA ESCURA.



Um *modelo* que insiste em ter a densidade *bariônica* exactamente proporcional à quantidade de

MATÉRIA ESCURA

num dado local não é consistente com o que as observações revelam.

Formação de galáxias favorecidas

assume que a *matéria bariônica* está concentrada apenas nos picos mais altos da concentração da

MATÉRIA ESCURA,

e os *modelos* que utilizam

formação de galáxias favorecidas

são mais consistentes com o que é observado.

Uma explicação física possível para a *formação de galáxias favorecidas* é a de que existe uma densidade mínima de *matéria bariônica* para a formação de estrelas, mas esta densidade *bariônica* é dependente na densidade da **MATÉRIA ESCURA**, chegando a esse mínimo apenas quando a densidade da **MATÉRIA ESCURA** é suficiente.

Defeitos topológicos.

A discussão sobre a ***formação de estrutura*** no Universo não fica completa sem falar de

defeitos topológicos.

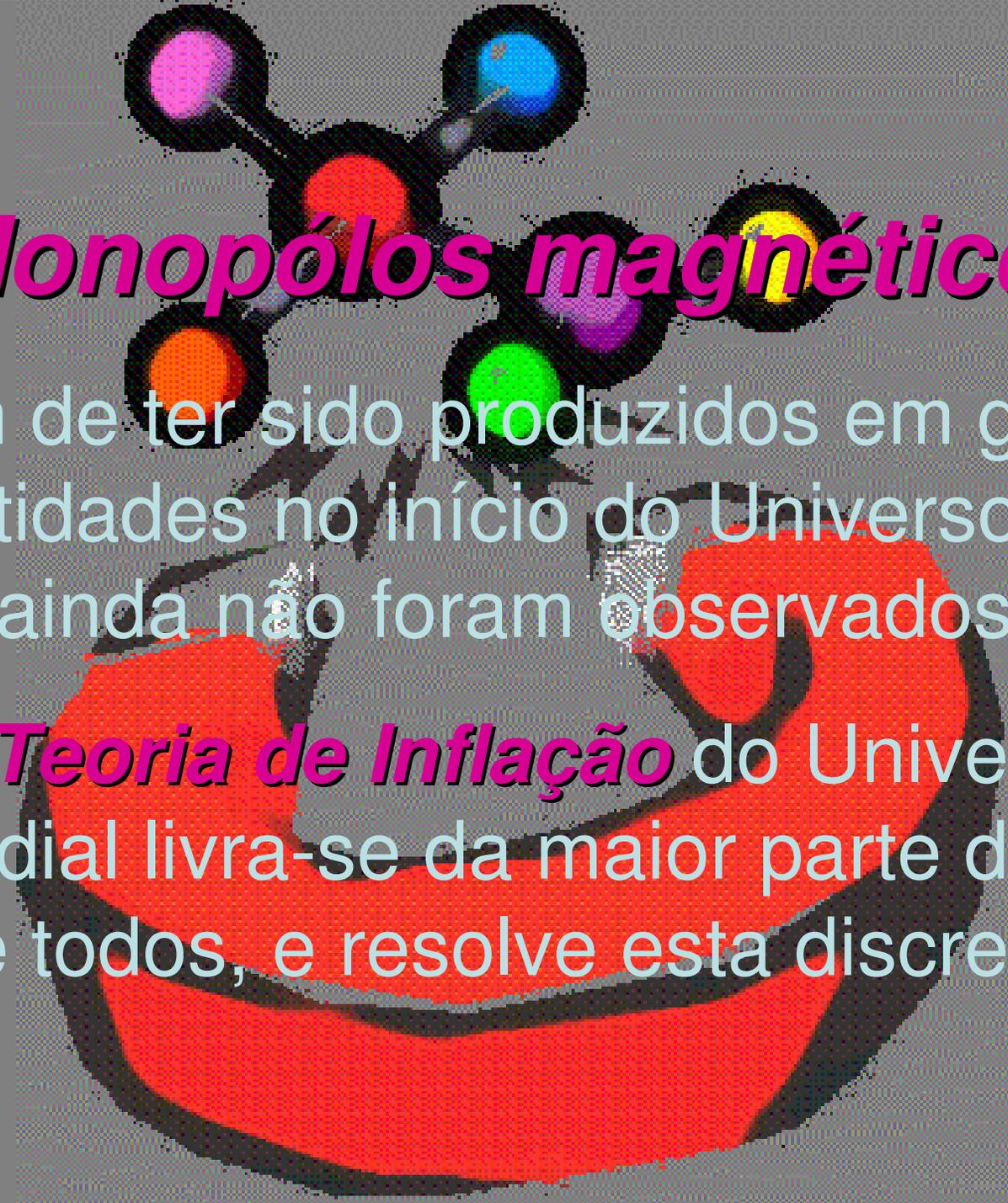
Supersimetria (SUSY) estava presente apenas no Universo primordial quente. A simetria foi quebrada em algum ponto, conforme o Universo arrefeceu.

A perda de simetria não ocorreu em todo o lado ao mesmo tempo, resultando em

defeitos topológicos

tais como os

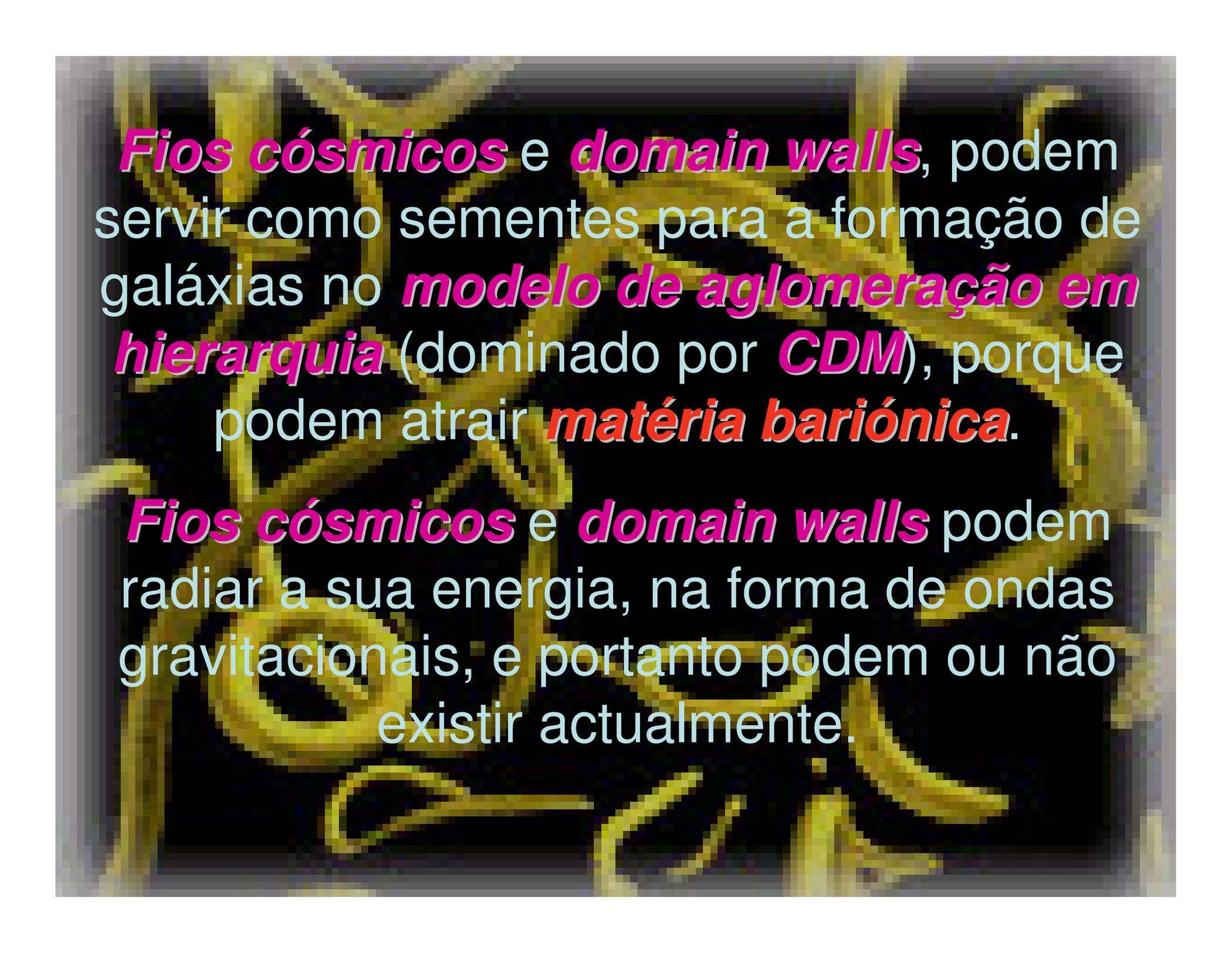
- ***monopólos magnéticos***
- ***fios cósmicos unidimensionais***
- ***paredes cósmicas bi-dimensionais***
(***domain walls***).



Monopólos magnéticos

teriam de ter sido produzidos em grandes quantidades no início do Universo, mas ainda não foram observados.

A ***Teoria de Inflação*** do Universo primordial livra-se da maior parte deles se não de todos, e resolve esta discrepância.

The background of the slide features a complex network of yellow and orange filaments, representing cosmic filaments, set against a dark, almost black background. These filaments are interconnected, forming a web-like structure that is characteristic of the hierarchical model of galaxy formation. The text is overlaid on this background, with key terms highlighted in pink and orange.

Fios cósmicos e ***domain walls***, podem servir como sementes para a formação de galáxias no ***modelo de aglomeração em hierarquia*** (dominado por ***CDM***), porque podem atrair ***matéria bariónica***.

Fios cósmicos e ***domain walls*** podem radiar a sua energia, na forma de ondas gravitacionais, e portanto podem ou não existir actualmente.

Matéria não-bariônica num fluido quântico.

A ***matéria não-bariônica*** tem um papel importante na ***formação de galáxias***, e não apenas na ***formação de estrutura*** de grande escala.

Os astrónomos propuseram um mecanismo que explica a formação de estrelas em galáxias elípticas e envolve

MATÉRIA ESCURA não-bariónica

como um

fluido quântico.

Um sistema de bósons tornam-se num

fluido quântico

em temperaturas baixas.

A quantidade de ***momento angular*** total determina quanto eficiente será a formação de estrelas.

Se a galáxia tiver uma pequena quantidade de ***momento angular total***, a formação rápida de estrelas só terá lugar perto do centro da galáxia (dando lugar a uma ***galáxia espiral***).

Se as interacções de maré entre as pre-galáxias existirem, elas irão ter grandes quantidades de ***momento angular total***.

Os vórtices quânticos na maior parte da galáxia serão suficientemente intensos para captar ***matéria bariónica***, e vai haver uma rápida formação de estrelas por todas as partes da galáxia, dando origem a uma ***galáxia elíptica***.

As

galáxias elípticas

jovens têm uma formação de estrelas muito superior às

galáxias espirais

da mesma idade.

MATÉRIA ESCURA:

A MATÉRIA PRIMA DO NOSSO UNIVERSO

