



Universidade Federal do ABC

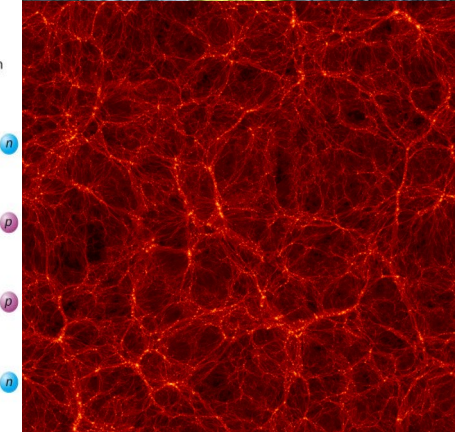
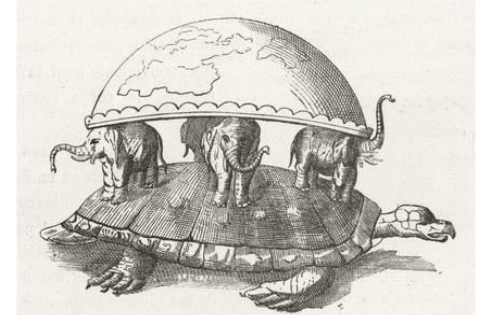
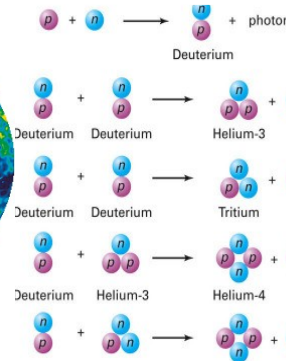
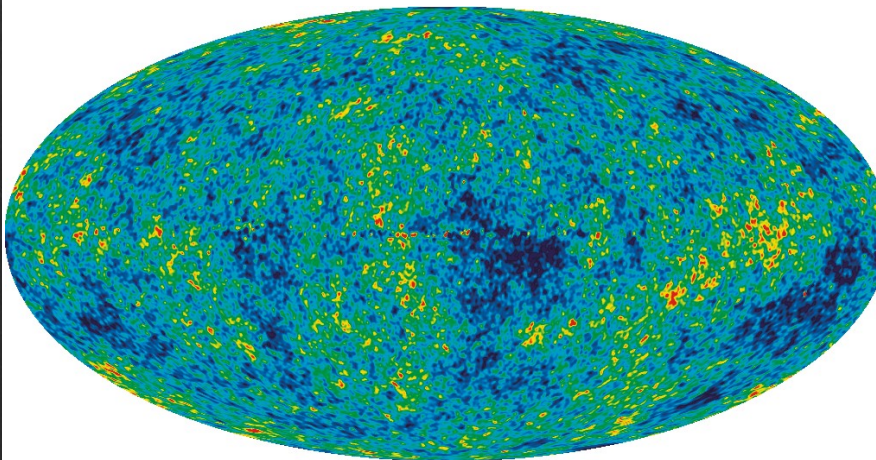
Introdução à Cosmologia

17. O Futuro do Universo e Modelos Alternativos

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>

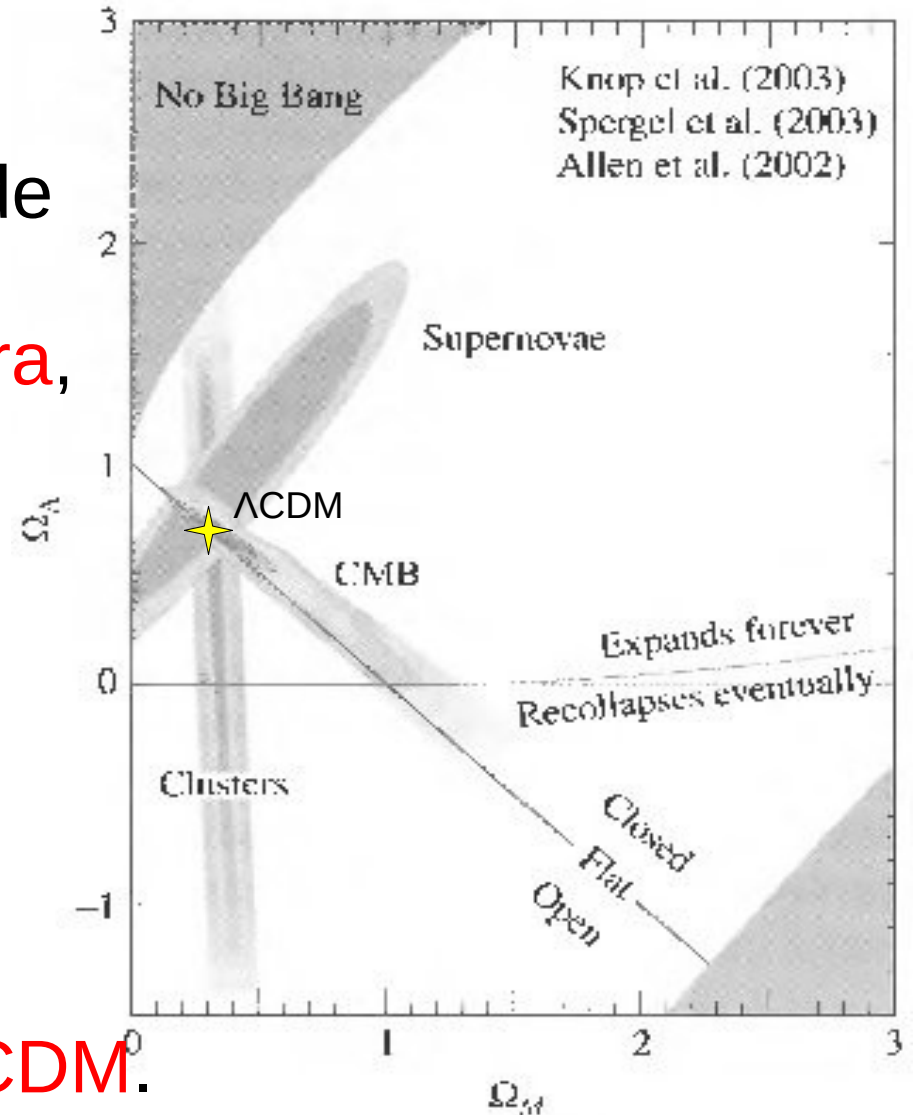


O Futuro do Universo

Resumo das aulas passadas

O **destino** do **Universo** depende basicamente das **densidades** da **matéria** e da **Energia Escura**, em unidades da **densidade crítica** (que depende da constante de Hubble).

Vários **métodos diferentes** e **independentes** de **determinação** de $\Omega_{m,0}$ e $\Omega_{\Lambda,0}$ levam a **resultados compatíveis** com o **modelo Λ CDM**.



O Futuro do Universo

Melhor explicação das várias regiões deste diagrama.

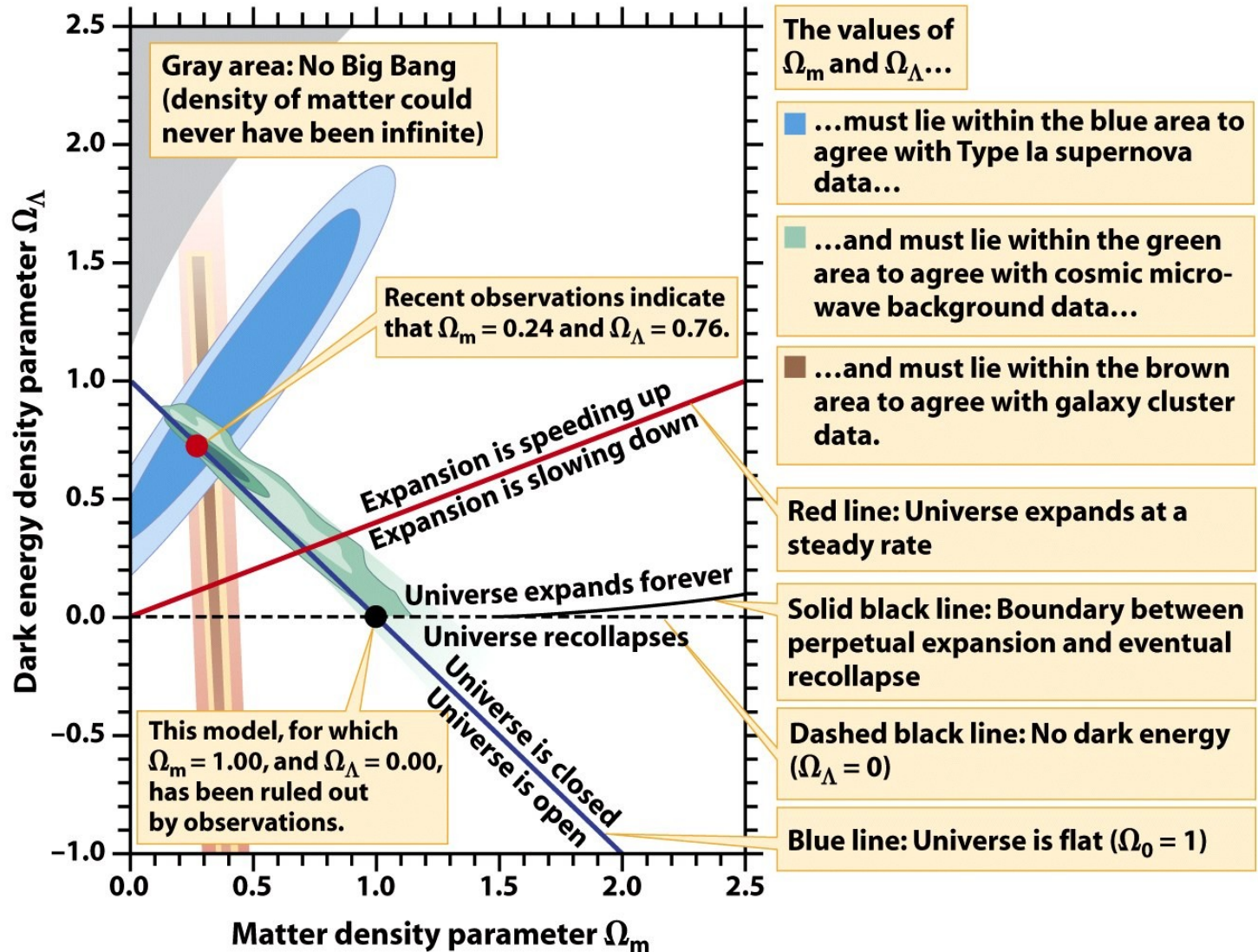


Figure 26-19
Universe, Eighth Edition
 © 2008 W. H. Freeman and Company

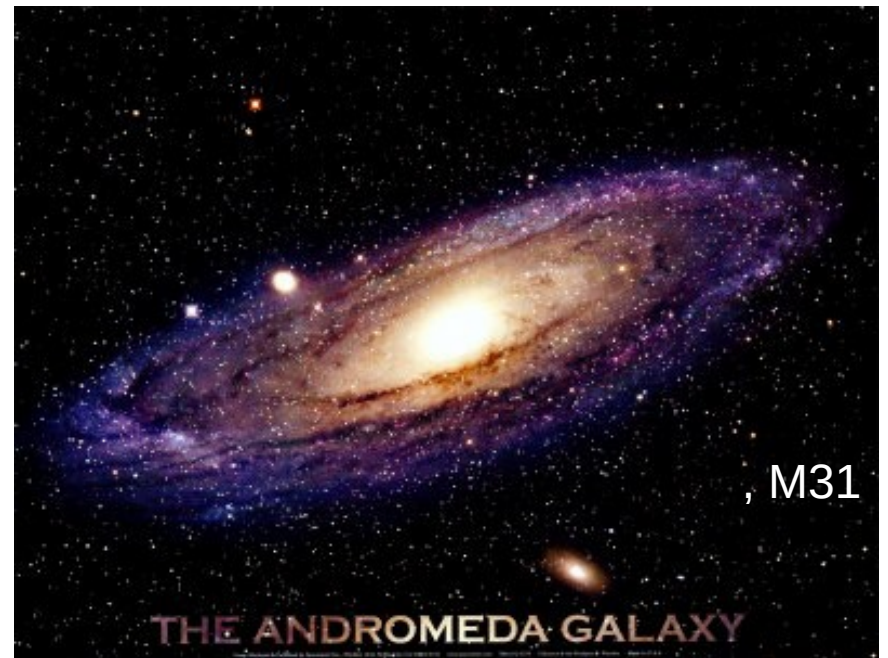
O Futuro do Universo

Como se desenvolverá o Universo no futuro?

Medindo o **espectro** da galáxia de **Andrômeda** encontramos um deslocamento para comprimentos de onda mais curtos, um **blueshift**, das linhas espectrais.

=> **Efeito Doppler**

=> **Andrômeda** está se **aproximando** da **Via Láctea** com 120 km/s.



O Futuro do Universo

=> Em uns 4 bi. anos, as duas maiores galáxias do Grupo Local colidirão, formando uma galáxia elíptica gigante, "Lactômeda", como previsto no cenário *bottom-up*.

O Sistema Solar vai provavelmente parar mais longe do centro da nova galáxia, ou será expulso.

Algum tempo depois, Triângulo e as galáxias menores do Grupo Local se juntarão também, tal que em uns 10^{11} a 10^{12} anos, o Grupo Local será unido em uma galáxia grande.



Impressão artística (e pouco realista) da colisão Via Láctea-M31 vista da Terra.

O Futuro do Universo

Enquanto isto, se o modelo Λ CDM for certo (e não tiver nenhum ingrediente faltando), em $1.5 \cdot 10^{11}$ anos, a distância entre esta galáxia e as outras ultrapassará o horizonte de partículas, e não teremos mais ligação causal com as outras galáxias (mas continuamos vendo o passado delas).

Em $8 \cdot 10^{11}$ anos, as outras galáxias começarão a aparecer cada vez mais fracas até que, em uns $2 \cdot 10^{12}$ anos, elas se tornarão invisíveis, por que até os raios gama emitidos nelas estarão *redshiftados* para comprimentos de onda maiores que o diâmetro do Universo observável.

=> Estaremos isolados.

O Futuro do Universo

Tudo dentro das galáxias **resfriará** e acabará em **objetos "mortos"** (Buracos Negros, Estrelas de Nêutrons, Anãs Brancas, Anãs Marrons, etc.): *Big Freeze*.

Possivelmente o Universo será dominado por Buracos Negros, que (de novo, possivelmente) evaporarão como Radiação Hawking.

Mais detalhes sobre a evolução futura do Universo:

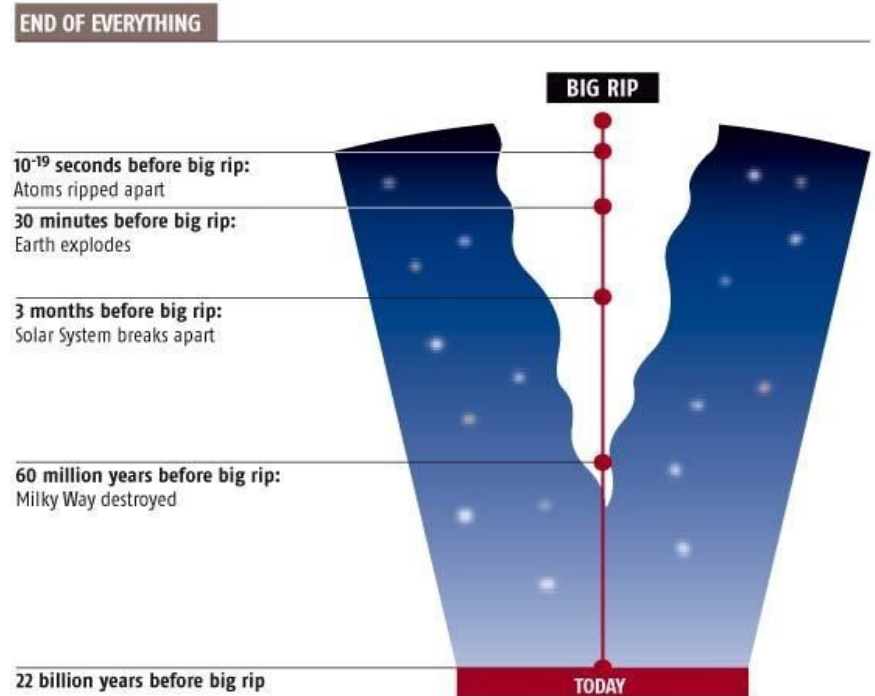
https://en.wikipedia.org/wiki/Future_of_an_expanding_universe

O Futuro do Universo

Certas teorias da física de partículas predizem, que o **próton** seja **instável**, decaindo com um tempo de vida da ordem de 10^{34} anos.

Neste caso, tudo termina em **fótons** e **leptons**.

Ainda há teorias (i. e. Energia Fantasma => daqui a pouco) que afirmam que, num futuro mais distante ainda, tudo se **desintegrará**: galáxias, os objetos mortos e, por último, átomos e partículas elementares: **Big Rip**.



O Futuro do Universo

Porém, nunca se sabe se não está faltando algum ingrediente na nossa teoria...



Outros Modelos Cosmológicos

... o que nos leva aos **modelos alternativos** do **Universo**.

Será que Inflação- Λ CDM é a resposta final?

Não existem **outros modelos cosmológicos**?

Outros Modelos Cosmológicos

Sim, **muitos!**

Alguns exemplos (não completa, mas espero que os mais conhecidos estão lá):

- Estado Estacionário e Estado Quasi-Estacionário,
- Quintessência,
- MOND (*Modification of Newtonian Dynamics* ou "Modificação da Dinâmica Newtoniana") e outras teorias se usando de "gravitação alternativa",
- Universo Anisotrópico
- Matéria Escura e Energia Escura Exóticas
- Luz cansada,
- Periodicidade do *Redshift* e *Redshifts* intrínsecos,
- Hipótese dos números grandes de Dirac,

Outros Modelos Cosmológicos

Sim, **muitos!**

Alguns exemplos (não completa, mas espero que os mais conhecidos estão lá):

- Cosmologia do plasma,
 - Teoria das cordas,
 - Cosmologia de Branas
 - Universo cíclico,
 - Multiverso,
- e muitos, muitos outros.

Existem quase tantas teorias quanto cosmólogos (e algumas de *crackpots* também).

Estado Estacionário

Este já conhecemos

Hoyle, Gold e Bondi (1948)

Nos anos 50 o **grande concorrente** do Modelo do *Big Bang*:

- O Universo está no **mesmo estado** "desde sempre" e "para **sempre**".
- A **diluição** da **matéria** por causa da **expansão** do Universo é compensada por **criação** de matéria no **espaço intergaláctico**.



Hoyle



Bondi



Gold

Estado Estacionário

Calculando a **densidade** da matéria sendo criada "do nada":

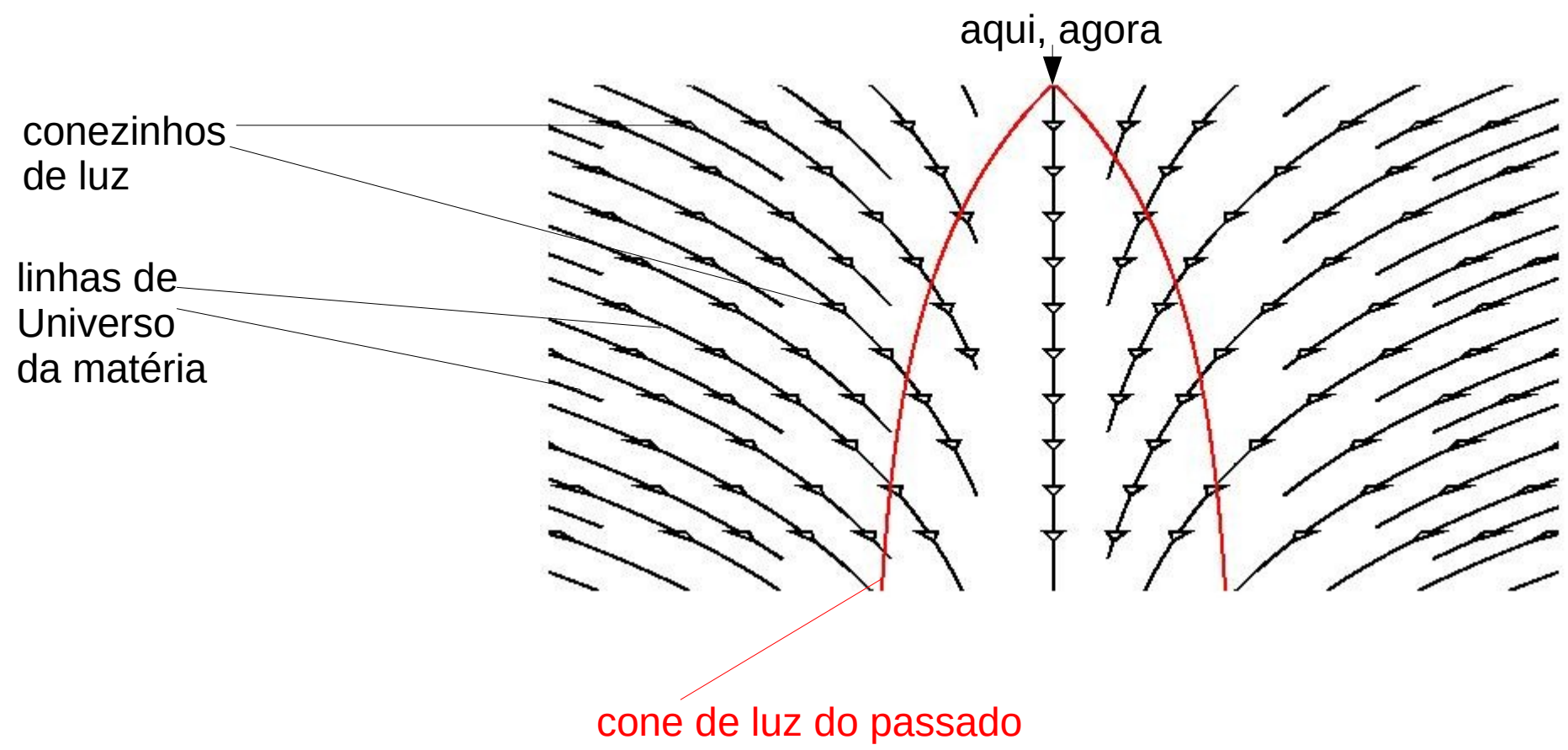
O **Universo dobra** de tamanho em t_H , seu **volume** aumenta por um **fator 8**, então a **taxa de criação de matéria** para **manter** o Universo é $\sim 8\rho_0/t_H = 8\rho_0 H_0$. Isso equivale a **alguns átomos de H** por **cm³** a cada **10¹⁰ anos**, uma taxa **minúscula** para ser medida.

(Sorte deles; assim fica difícil refutar por falta de detecção desta criação de matéria)



Estado Estacionário

Diagrama Espaço-Tempo da Teoria do Estado Estacionário



Estado Estacionário

Mas:

- **Fere** a **conservação** de **massa/energia**,
- **Não** consegue explicar a **abundância** de **hélio** (e deutério) no Universo,
- Nem a **Radiação Cósmica de Fundo**
- Não explica, por que quasares (Buracos Negros ativos em centros de galáxias) existem apenas em alto *redshift*.

=> Caio em **descrença**



Estado Quase-Estacionário

Mas o Hoyle não desistiu

Junto com Geoffrey Burbidge (do artigo B²HF) e Jayant Vishnu Narlikar, ele apresentou em 1993 (!) a teoria do **Estado Quase-Estacionário**, segundo aquela o Universo é criado em "*mini Bangs*" no decorrer do tempo, e passa por **expansões** e **contrações periódicas**.



Hoyle



Burbidge

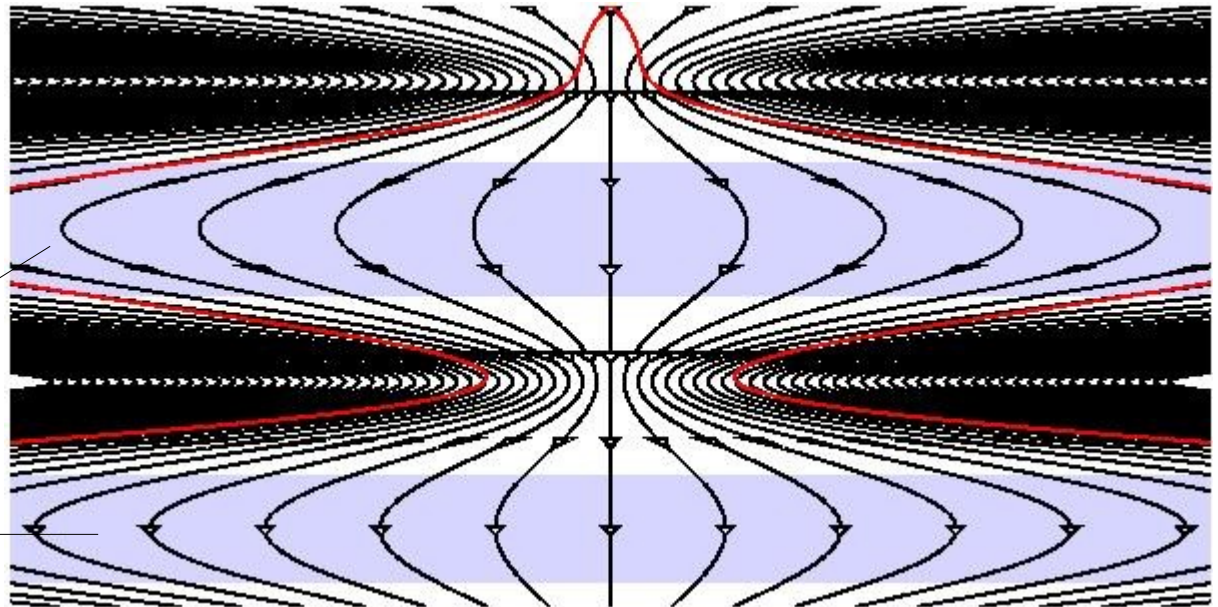


Narlikar

Estado Quase-Estacionário

Diagrama Espaço-Tempo

Mas esta teoria tem um monte de **problemas** e foi destruída por Edward Wright e outros.

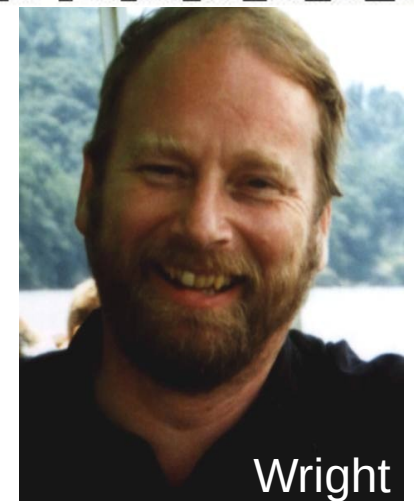


Nestas épocas o fator de escala teria sido maior que hoje
=> A luz emitida então nós chegaria *blueshiftado*, o que não é observado.

Além disso, o espectro angular da RCF não bate.

Site citando erros das teorias do Estado Estacionário e do Estado Quase-Estacionário:

<https://www.astro.ucla.edu/~wright/stdystat.htm>



Wright

Quintessência

"quinto elemento", além da matéria bariônica, radiação (fótons + neutrinos), CDM e curvatura.

É um **tipo hipotético de Energia Escura**, Q , com **densidade** e w_Q **variando** com o tempo (lembrete: em Λ CDM, $Q = \Lambda = \text{const.}$ e $w_Q = w_\Lambda = -1 = \text{const.}$)

Poderia ser ajustado para resolver a Tensão de Hubble.

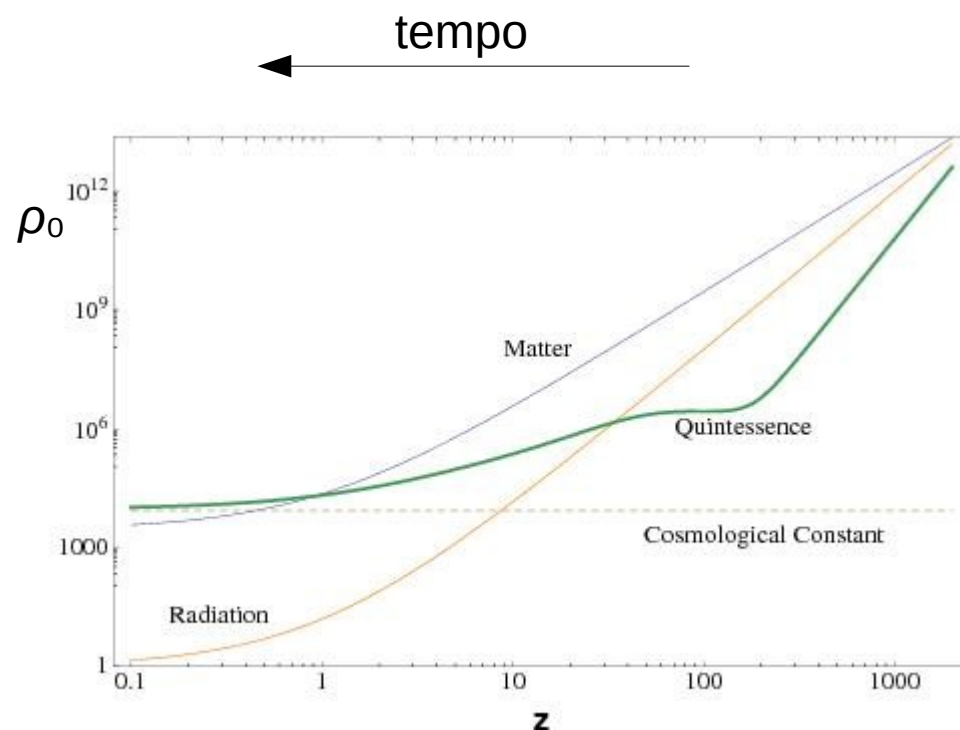


Quintessência

Exemplos

- Q seguindo a densidade da radiação até a época da igualdade radiação-matéria, a partir daquele momento Q começa a se comportar como uma constante cosmológica.

Foi criado para resolver o Problema da Constante Cosmológica, aquele "probleminha" de uns 120 ordens de magnitude, quando se tenta identificara a Energia Escura com a energia do vácuo.



Quintessência

Exemplos

- **Energia Fantasma** ou **K-essência** (de *kinetic essence*), com $w_Q < -1$, o que causaria uma **expansão** mais rápida que exponencial e, no final, um *Big Rip*.
- e outras com nomes tipo "Energia Escura Holográfica".

Problema: parece não ter muito suporte dos dados, e tudo vira possível...

MOND

Modification of Newtonian Dynamics ou "**Modificação da Dinâmica Newtoniana**", proposto em 1983 por Mordehai Milgrom

- Criado para fornecer uma **explicação** alternativa à **Matéria Escura** para as **curvas de rotação constantes** da Via Láctea e de outras **galáxias discos**.

Já que foi criado e ajustado para este fim, MOND consegue explicar estas, incl. a estrutura fina, até melhor que Matéria Escura, que prevê curvas suaves.



MOND

Modification of Newtonian Dynamics ou "**Modificação da Dinâmica Newtoniana**", proposto em 1983 por Mordehai Milgrom

- Fez estas **modificando** à **Lei da gravitação**:

$$F = GMm/\mu r^2, \text{ onde } \mu = 1/(1+a_0/a) \\ \text{ou } \sqrt{1/(1+(a_0/a)^2)},$$

a é aceleração, e $a_0 \approx 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$,

m é a massa de uma estrela orbitando o centro da galáxia, e M , a massa que mantém a estrela na sua órbita (a da parte da galáxia contida na órbita da estrela).



MOND

$$F = GMm/\mu r^2, \text{ onde } \mu = 1/(1+a_0/a)$$
$$\text{ou } \sqrt{1/(1+(a_0/a)^2)},$$

Os limites desta lei são (lista):

- **Perto do centro galáctico**, onde as acelerações a são grandes, $a \gg a_0$:

$F = GMm/r^2$, a **Lei de gravitação**
"tradicional"

- Na **distância**, onde $a \ll a_0$:

$F \propto r^{-1}$ (na verdade, $F = \sqrt{a_0 GM} \cdot m/r$),
o que resulta em uma **curva de rotação constante** (lista),
 $v(r) = \text{const.}$, como observado.

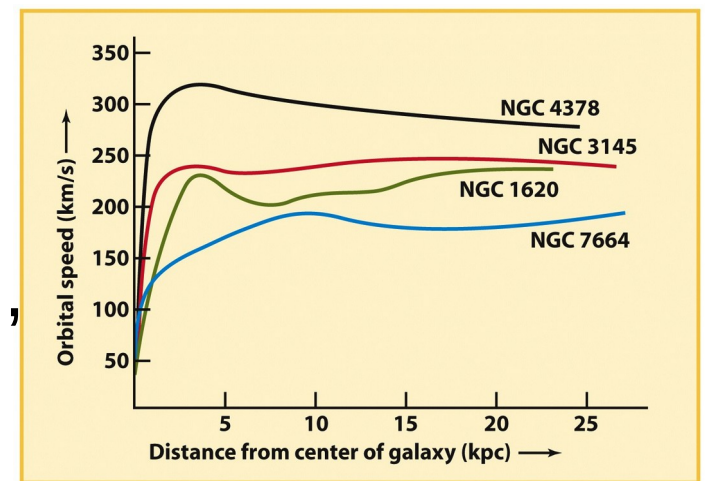
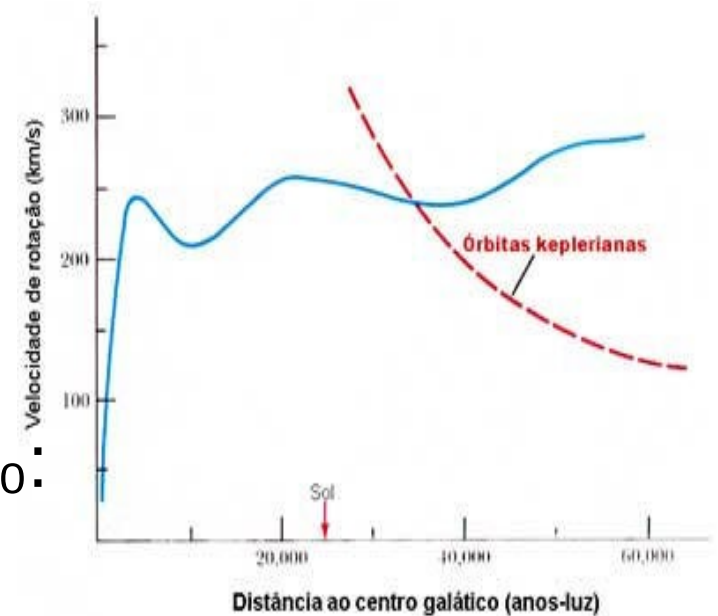


Figure 24-29
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

MOND

Pelos meus cálculos,

No primeiro caso, $\mu = 1/(1+a_0/a)$:

$$F = \frac{1}{2}GMm(1 + \sqrt{1 + 4r^2a_0/GM})/r^2$$

No segundo, $\mu = \sqrt{1/(1+(a_0/a)^2)}$:

$$F = GMm\sqrt{\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + 4r^4a_0^2/G^2M^2})}/r^2$$

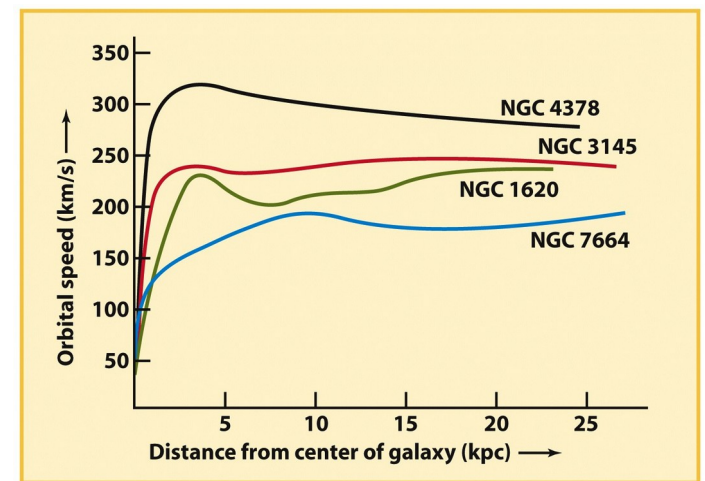
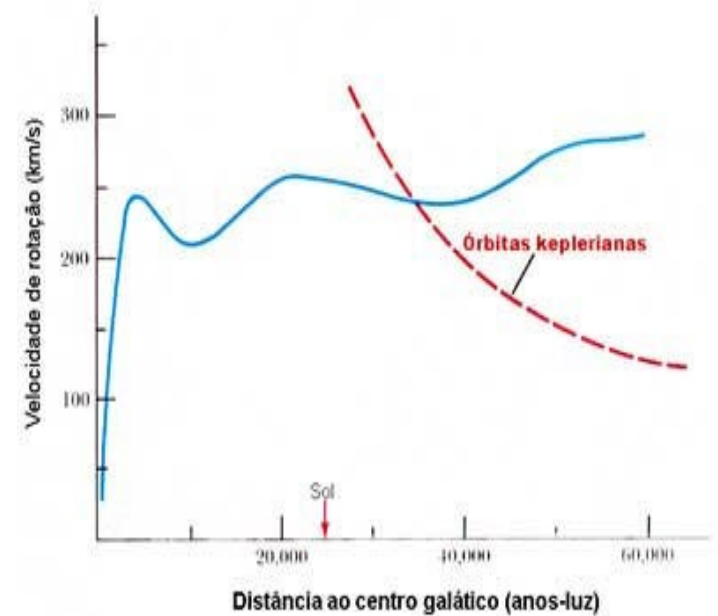


Figure 24-29
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

MOND

MOND consegue até explicar alguns fenômenos além das curvas de rotação.

Mas:

- É uma **modificação empírica**, *ad hoc*, **sem fundamento teórico**
- **Não** explica totalmente a **dinâmica** das **galáxias** em **aglomerados** de galáxias (a correção teria que ser maior)
- **Não** consegue explicar a **não-coincidência espacial** da **massa total** com a **massa bariônica** em **aglomerados** em **colisão**, como o *Bullet Cluster*.
- E outros problemas.

Outras Teorias com Gravitação Alternativa

TeVeS

Tensor-vector-scalar gravity: "versão relativística de MOND", faz **modificações similares** na **Relatividade Geral** que aquelas que MOND faz na Gravitação Newtoniana:

- Explica as curvas de rotação de galáxias discos, mas
- **Estrelas** são **instáveis**, decaindo em ~2 semanas
- **Não** prediz bem o **efeito lente** (quantitativamente)
- Também **não** explica o sistema *Bullet Cluster*.

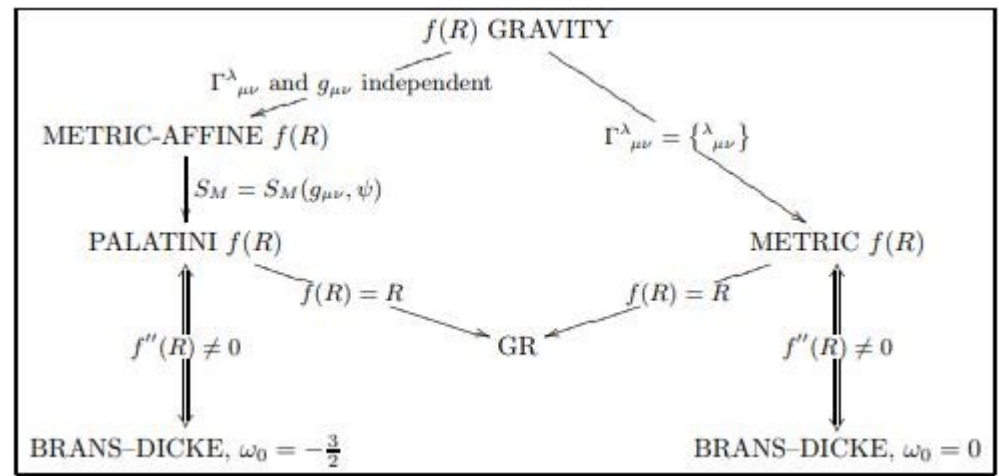
Outras Teorias com Gravitação Alternativa

Universo Machiano

Baseado na **teoria Brans-Dicke**, uma **alternativa** à **Relatividade Geral**, com **constante gravitacional G variando** com a posição.

Gravitação $f(R)$

Faz **extensões** na **Relatividade Geral** para tornar as **Matéria** e **Energia Escuras** redundantes.



Outras Teorias com Gravitação Alternativa

Motivações:

- Problemas para quantizar a Relatividade Geral
- A gravitação é a interação dominante em escalas cosmológicas
 - => se sua descrição não for adequada, poderia ser a origem de todos os problemas em aberto do Λ CDM?
- Classe de modelos nos quais se introduz uma função que depende do tensor de Ricci, R
 - => já há extensões, com dependências mais complexas.

Muitas já são descartadas por observações ou problemas na teoria.

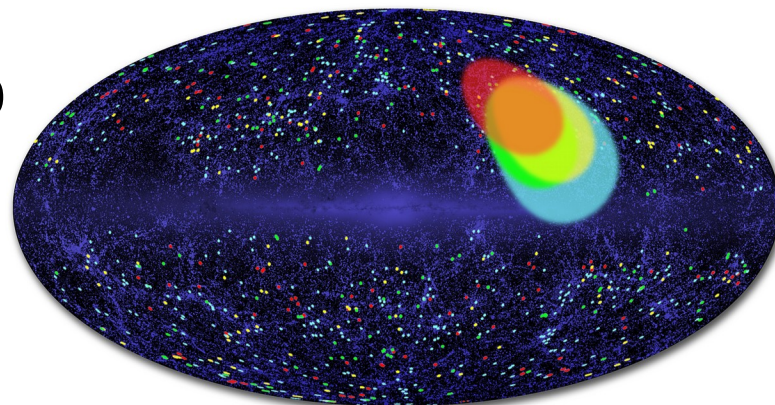
Universo Anisotrópico

OU **Fluxo Escuro**:

Em 2008, astrônomos trabalhando com dados WMAP afirmaram ter detectado uma **corrente** de **galáxias** indo com 600-1000 km/s na direção das constelações de Centauro e Vela (**ferindo** a hipótese da **isotropia** do Universo, parte do **princípio cosmológico**), e sugeriram que isto fosse a sobra da **influência** de **regiões** do Universo **não-mais-visíveis** de antes da Inflação.

A detecção é **controversa**, e muitos cientistas encontram um alto grau de **isotropia** no **Universo**.

"Dark flow" galaxy clusters and flow direction by distance



Matéria Escura e Energia Escura Exóticas

Já que ainda **não** detectamos ou **identificamos** as **Matéria** e **Energia Escuras**, poderia ser que elas têm **propriedades diferentes** do que previstas pelo modelo Λ CDM ("*Cold*", resp. com densidade constante).

Há teorias, segundo aquelas:

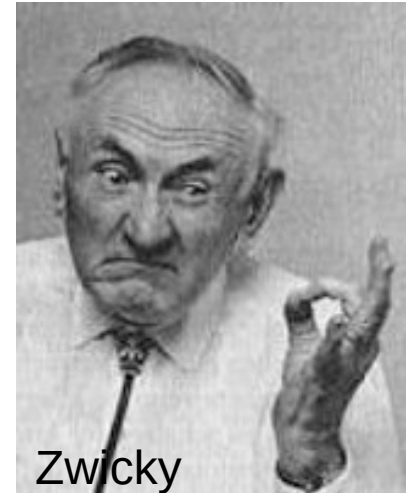
- Matéria Escura decai em Energia Escura
- Ambas são aspectos do mesmo fluido, o Fluido Escuro
- Quintessência e Matéria Escura Morna também são desta categoria

Luz Cansada

Proposta por Fritz Zwicky (o mesmo de uma das primeiras dicas para Matéria Escura) em 1929:

O *redshift* não é devido à *expansão* do Universo, mas à *luz perdendo energia* ("ficando cansada") no seu caminho, devido a uma forma de *fricção* devida à interação gravitacional com estrelas e outro material -, ou por *espalhamento* por material no caminho.

Porém: Em ambas as hipóteses, as imagens dos objetos em alto redshift deveriam ser *borradas*, e *não* deveria ser detectada a *dilatação cosmológica* do *tempo*.



Periodicidade do *Redshift*

Zwicky não foi o único a **não** acreditar na **expansão** do **Universo**.

Alguns astrofísicos propuseram **inconsistências** nas **observações** de **redshifts** de **galáxias** e **quasares**,

uns (Burbridge e Tift) alegando **periodicidades** nas distribuições dos **redshifts** destes objetos (A teoria do Estado Quase-Estacionário prevê isto, entre outras).

Porém, **análises** estatísticas de **amostras** de **redshifts** **não** confirmam isto.

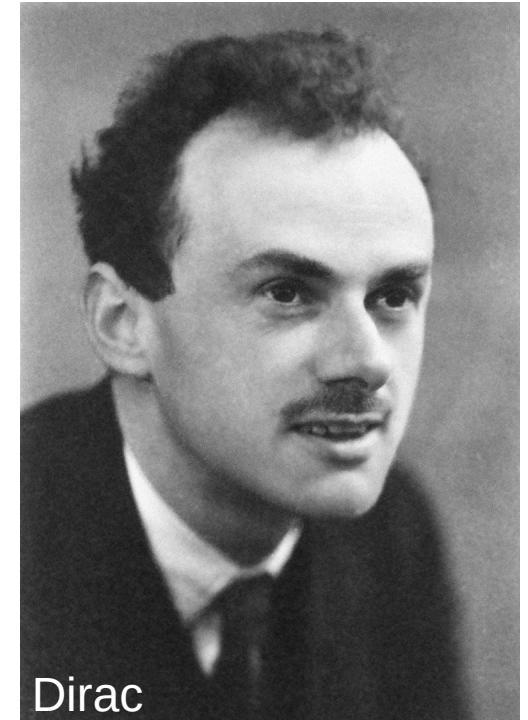
Redshifts Intrínsecos

Um outro (Arp, década de 1960) achou os *redshifts* de alguns **quasares altos demais** para serem cosmológicos (os quasares deveriam estar muito distantes e, então, muito brilhantes) e atribuiu estes a processos **intrínsecos** destes objetos, inventando toda uma teoria sobre natureza e formação deles, incluindo **criação contínua de matéria** pelos **quasares** e **massas variáveis de partículas elementares**.

Mas foram **observadas** as **galáxias-mãe** de muitos quasares (com os mesmos *redshifts*) e confirmado a natureza de **Núcleo galáctico Ativo** deles.
=> Eles **realmente** são muito distantes e brilhantes.

Hipótese dos números grandes de Dirac

Em 1937, Paul Dirac se deu conta, que **algumas razões** entre **constantes naturais** e grandezas tipo **tamanho** e **idade** do **Universo** são de ordem de magnitude similar, e hipotetizou, que isto poderia apontar para uma ligação mais profunda entre conceitos numa futura teoria de tudo.



Muitos criticam estas ideias como numerologia.

Cosmologia do Plasma

Em 1965, Hannes Alfvén propôs esta teoria, intrigado pelo fato, de que maior parte do Universo local consiste de **matéria**, e **não anti-matéria**.

Sugeriu que deveriam existir "**bolhas**" de **matéria** e de **anti-matéria** em **montantes iguais**.

Mas num Universo destes deveria ser produzido um monte de **radiação energética** nas **fronteiras** entre **bolhas opostas**, onde ocorreria **aniquilação matéria-antimatéria**.

Uma saída seria, que a bolha local dominada por matéria comum fosse maior que o Universo observável, mas isto geraria previsões intestáveis.



Alfvén

Teoria das Cordas

Baseada na supersimetria, é uma teoria, naquela as **partículas pontiformes** da **física** das **partículas** são substituídas por objetos 1D chamados **cordas**, e que descreve como estas cordas se **propagam** pelo **espaço** e **interagem**.

As **propriedades** da partícula tipo **massa**, **carga**, etc. são determinadas pelo **estado** de **vibração** da corda.

Não é principalmente uma **teoria cosmológica** (é da física das partículas), mas há **modelos cosmológicos baseados** nela.

Um dos estados de vibração tornaria a partícula um **inflaton**, partícula hipotética responsável pela **Inflação cosmológica** segundo algumas versões de teorias de inflação.

Interessante, mas a teoria faz **previsões testáveis**?

Cosmologia de Branas

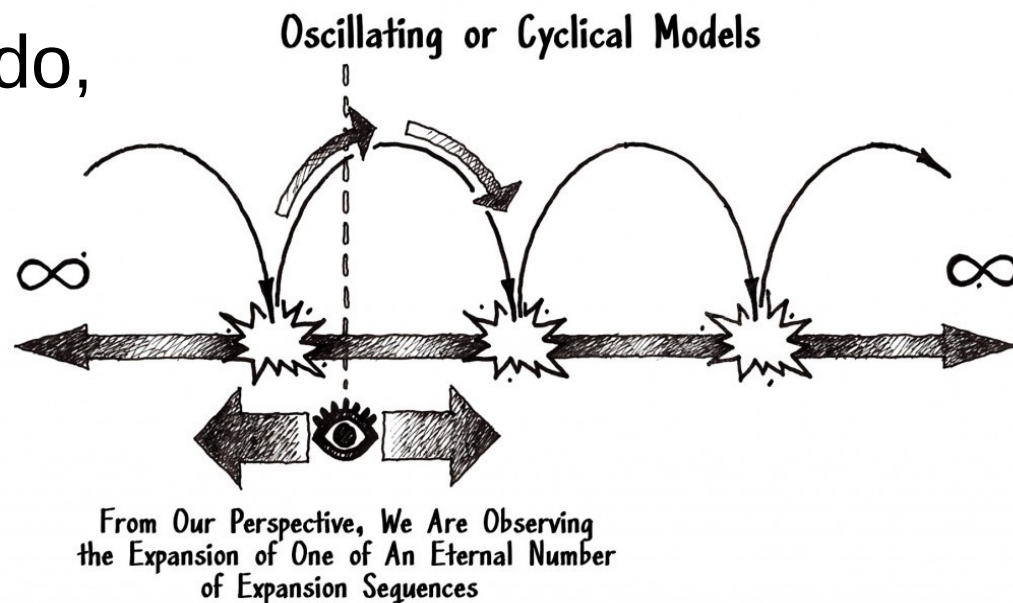
A ideia central é, que o nosso visível Universo 3D é limitado a uma **brana** dentro de um **espaço** com **mais dimensões**, o **híper-espaço**.

Se estas dimensões extras são **grandes**, "coisas" do nosso Universo podem "vazar" pra **fora** pelas **dimensões extras**, explicando, por que a gravitação é tão fraca comparada às outras forças fundamentais, e por que a Energia Escura tem densidade muito menor que prevista pra energia do vácuo.

Interações com **outras branas** podem levar a fenômenos **observáveis** na **nossa brana**.

Universo Cíclico

Nos anos 20 foi considerado, entre outros por Einstein, a possibilidade de a **história do Universo** ser uma **sequência infinita de ciclos** começando por **Big Bangs** e terminando em **Big Crunches**, assim **evitando um começo do tempo**.

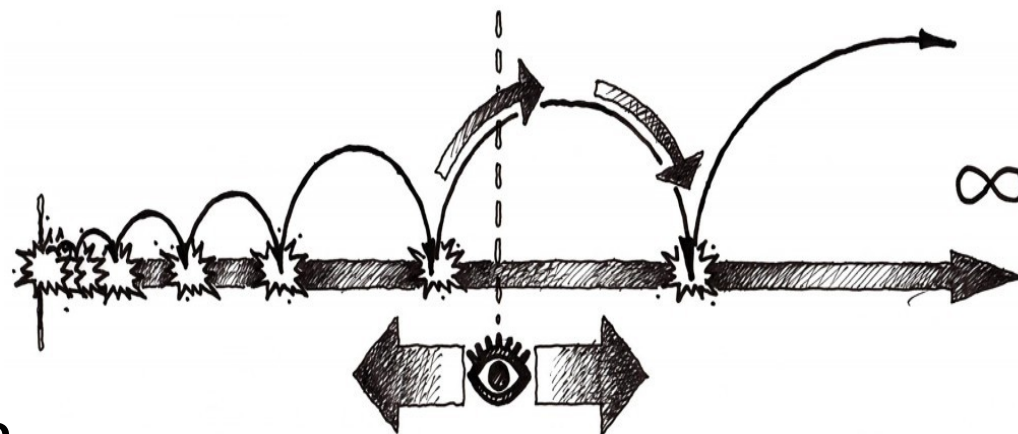


Mas isto **violaria a segunda Lei da Termodinâmica**, já que a **entropia do Universo não aumenta** neste modelo.

Universo Cíclico

Isto implica que **ciclos sucessivos crescem em amplitude e duração**.

Extrapolando de volta no tempo, o modelo resultaria num **começo do tempo** mesmo assim.



As we go back in time, these cycles would be smaller and smaller until, once again, we come to a point of cosmic singularity

E por tudo que vimos nesta disciplina, o Universo **não** parece ser **supercrítico** e **não** vai **recolapsar** (nem sequer uma única vez).

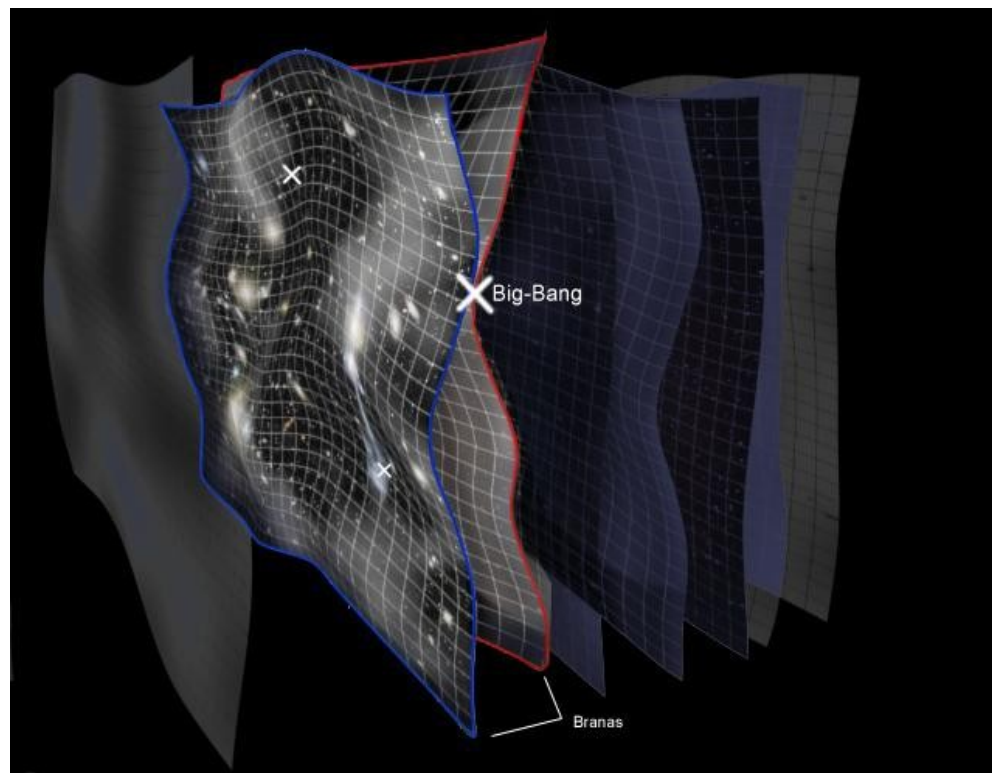
Universo Cíclico

Uma outra saída possível vem da **cosmologia** das **branas**.

Nesta teoria, o nosso Universo faz parte de uma **brana** que **collide** periodicamente com **outras branas** dentro de um hiper-espço, cada colisão causando um novo **Big Bang**.

A **Energia Escura** corresponde a uma **força** entre as **branas** e consegue resolver os **problemas** do **horizonte**, da **planura** e dos **monópolos**.

Teoria **não** muito **testável**.



Multiverso

É o **conjunto hipotético** de **Universos possíveis**, incluindo o Universo em que vivemos.

Estes Universos são chamados **Universos paralelos**.

Supondo que **cada** um destes Universos paralelos tem **Leis físicas diferentes**, ou pelo menos **valores** das **constantes naturais** diferentes, **poucos** deles permitiriam o surgimento de **vida inteligente** (A maioria colapsaria, resfriaria muito rapidamente ou teria um outro fim desagradável).

O **Princípio Antrópico** afirma que vivemos justamente em um dos poucos Universos favoráveis, por que senão, não estaríamos lá para nos fazermos estas perguntas.

Soa plausível, mas tem **nada** que possa ser **testado**.

Outros Modelos Cosmológicos

A resposta a nossa pergunta inicial é, então:
Sim, existem **muitos** outros **modelos cosmológicos**!

Mas todos estes:

- ou **não** são **compatíveis** com as **observações**,
- ou fazem **previsões intestáveis**,
- ou são **mais complicados e menos plausíveis** do que Λ CDM
(não são favorecidos pela Navalha de Occam).

Por enquanto, o **modelo Λ CDM** é o mais convincente que temos, na opinião da maioria dos cosmólogos e astrônomos.

(Possíveis) Observações Futuras

Voltando para Λ CDM:

Já que uns **95% do Universo** ainda **não** foram identificados, estão sendo feitas, ou serão feitas ou planejados mais **experimentos/observações cosmológicas**:

- Os que já foram feitas, mas com **maior precisão**.
- Resolver ou explicar os vários **pontos em aberto**, algumas destas foram vistos nesta disciplina:
 - Desenvolver a **física** para entender o que aconteceu até o **tempo de Planck** (aula Evolução do Universo)
 - Achar **estrelas/galáxias de população III** (aula Formação de Estrutura)
 - Resolver/explicar a **Tensão de Hubble** (aula RCF II)

(Possíveis) Observações Futuras

- Melhorar as teorias explicando, o que causou a **inflação** (aula Inflação)
- Achar as **Ondas Gravitacionais** geradas na **Inflação** (aula Inflação, ainda estamos longe)
- Entender, o que é a **Energia Escura** (aula Energia Escura). Será que ela é **variável**?
- Resolver o Problema da **galáxia anã** (aula Matéria Escura)
- Resolver o ***cuspy halo problem*** (aula Matéria Escura)
- Resolver o Problema de **morfologia galáctica** (aula Matéria Escura)
- Explicar as **galáxias massivas** em **alto redshift** (aula Matéria Escura)

(Possíveis) Observações Futuras

- **Detectar** as partículas da **Matéria Escura**
(aula Matéria Escura)
- **Descobrir** a **natureza** delas (aula Matéria Escura)
- **Criá-las** em **Aceleradores de Partículas**
(aula Matéria Escura)
- Observar o **fundo** de **neutrinos**
(aula Nucleossíntese)
- Resolver o **problema do lítio** (aula Nucleossíntese)
- ...



Universidade Federal do ABC

Introdução à Cosmologia

FIM PRA HOJE

