

Cosmologia III

Ensino de Astronomia na UFABC 2017

Beatriz Yordaky
beatriz.yordaky@hotmail.com



Teorias alternativas e limites do conhecimento humano

- O horizonte cósmico e como ele limita o que podemos conhecer do Universo;
- Radiação cósmica de fundo;
- A noção de infinito e seu uso na física e cosmologia;
- Bóson de Higgs e a expansão cósmica acelerada;
- Física Quântica: princípio da incerteza, gato de Schrödinger e vácuo quântico;
- Multiverso;
- Teoria de supercordas.



Cegueira Cósmica

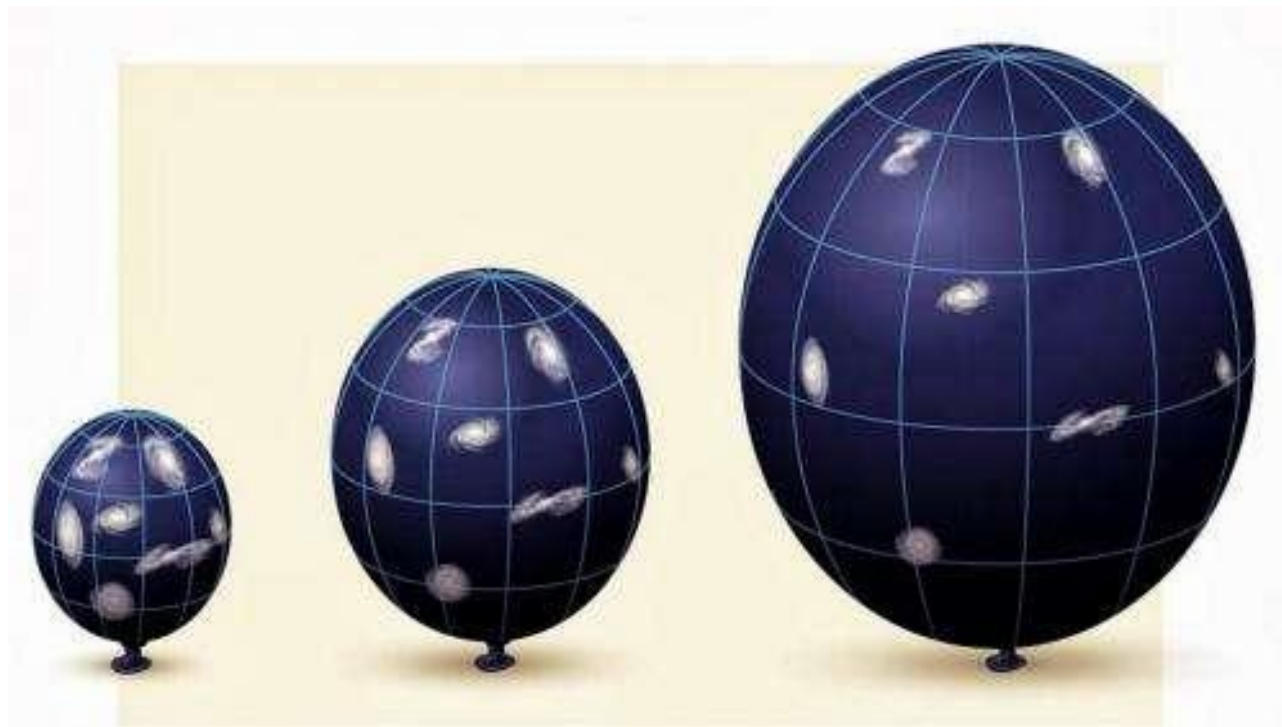
- Universo com idade finita + limite da velocidade da luz
- Pela Teoria da Relatividade sabemos que a velocidade máxima para transmissão de informação no Universo é a da luz, c .
- Luz vinda de regiões muito distantes ainda não teve tempo de chegar até nós.
- Aqui surge nossa primeira limitação intransponível. Vivemos em uma bolha de informação.



Velocidade da luz

- Ao olhar para o céu, estamos olhando o passado
- Mas quanto no passado? $t = d/c$?
- Não! Hoje sabemos que o Universo não é estático, de modo que as distâncias entre nós e as galáxias, por exemplo, eram menores no passado.
- Isso significa que a distância que a luz vinda de uma galáxia cobriu até chegar a nós é **maior** do que seria num universo estático.

Universo em expansão

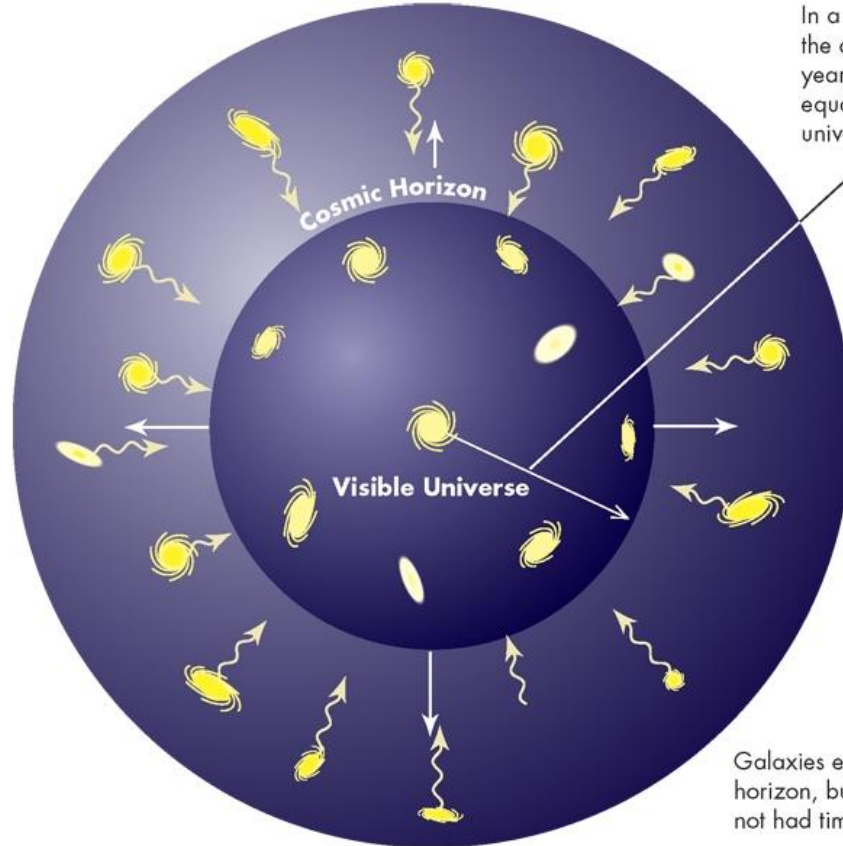


Crédito: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb

Universo observável

- A conta para encontrar o tamanho do Universo observável (que é uma esfera centrada no observador) deve levar em conta a **expansão do universo**.
- É errado dizer que o raio do Universo observável é de 13,77 bilhões de anos-luz. [1, 2]
- Estimativas recentes: raio de **46,1 bilhões de anos-luz** [2]
- Uma galáxia a 32,1 bilhões de anos-luz hoje do Sol teve sua luz viajando até nós por 13,2 bilhões de anos.

Universo observável



In a static universe, the distance in light-years to the horizon equals age of universe in years.

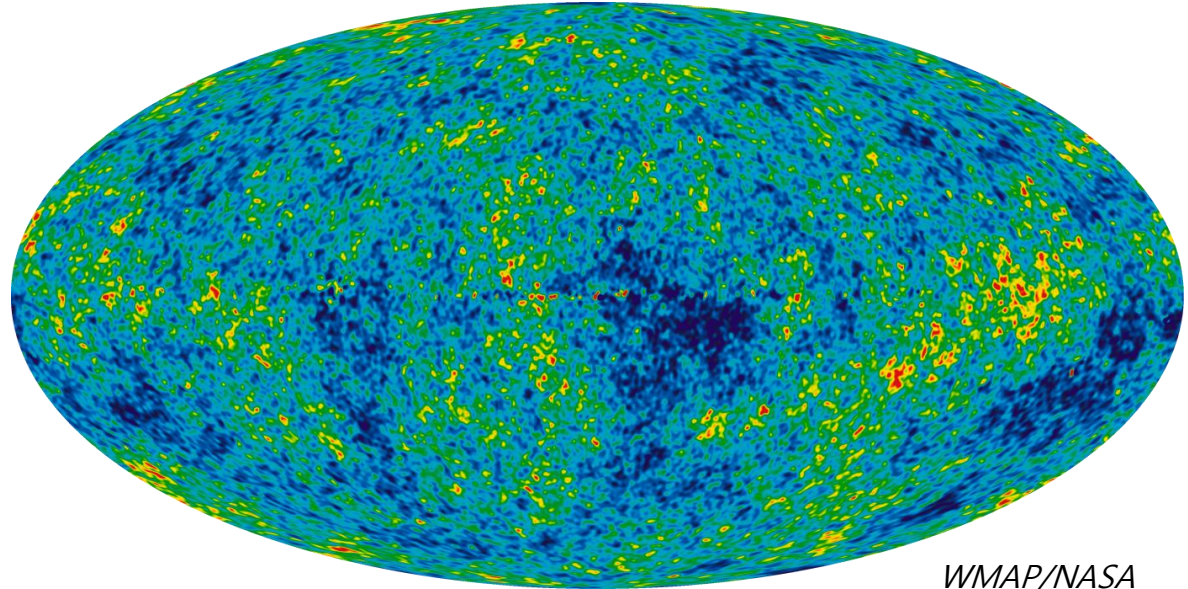
Galaxies exist beyond the horizon, but their light has not had time to reach us.

Universo observável

- A barreira intransponível do Universo observável não marca a singularidade inicial, a origem do tempo.
- A nossa barreira vem fisicamente antes disso, pois utilizamos a **luz como informação**.
- **A recombinação marca o início da Astronomia, por enquanto.**
- Antes deste período, os fótons não viajavam livremente, de modo que não podemos os detectar.
- Os fótons desacoplados constituem o fundo cósmico de micro-ondas (**radiação cósmica de fundo**).

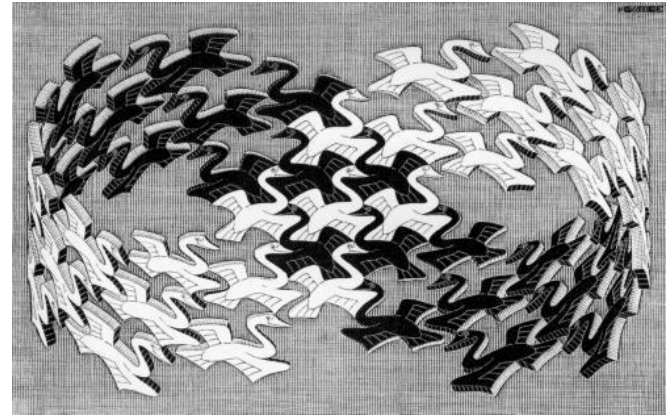
Radiação cósmica de fundo

- É a melhor fonte de informação sobre o universo jovem.



O infinito na física

- Será que nosso universo é infinito? Ou se curva sobre si mesmo?
- Infinito é o que está além do contável;
- Podemos inferir que o universo é maior do que o horizonte cósmico, mas nunca teremos certeza sobre como é “lá fora”.
- O infinito não tem um lugar bem estabelecido na Física.





Campo de Higgs

- Campo escalar.
- Podemos imaginar o campo de Higgs como um meio no qual as partículas se locomovem, e que pode interagir com elas.
- A **temperaturas extremamente altas** o campo de Higgs não é sentido pelas partículas.
- A **baixas temperaturas** o campo “engrossa”, tornando mais difícil a tarefa de atravessá-lo. Essa dificuldade seria interpretada como a **massa das partículas**.

Bóson de Higgs

- Lei de conservação: massa não pode ser criada do nada.
- O campo é acompanhado do **Bóson de Higgs**, a partícula responsável por **dar energia** às outras partículas, energia essa que se manifesta como **massa efetiva**.
- *Documentário "Particle Fever"*

Peter Ware Higgs



Previu a existência do Bóson em 1964
Nobel de Física de 2013



Física Quântica



Créditos: molasaber.org



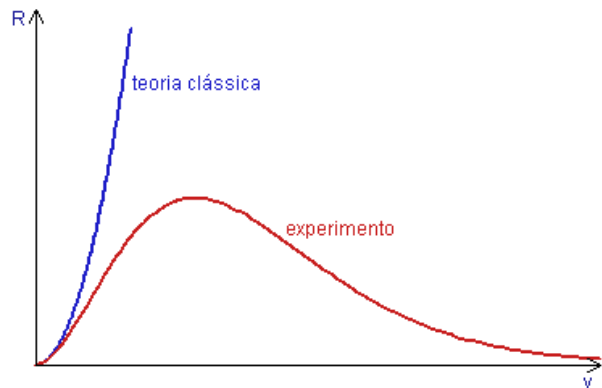
Física Quântica

- **Determinismo:** A ideia de que as leis físicas são tais que, dado o estado inicial de um determinado sistema, determina-se de *modo único* seu futuro.
- *Exemplo:* Carro em movimento uniforme. Determina-se sua posição em qualquer instante no futuro a partir da equação:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{V}t$$

Física Quântica

- **Radiação de corpo negro**
- **Corpo negro:** absorve radiação de todos os comprimentos de onda, e a irradia de modo específico. A teoria clássica só explicava aceitavelmente para pequenos valores de frequência.



- **Catástrofe do ultravioleta**

Crédito: Michel Betz, UFRGS

Física Quântica

- **Max Planck** (1900): radiações eletromagnéticas são emitidas em determinadas quantidades (quanta).
- **Werner Heisenberg** (1926): princípio da incerteza: propriedade fundamental da natureza. *Não se pode conhecer com absoluta precisão a posição e o momento de uma partícula* (ou, sua velocidade).
- O sonho determinístico está morto.

Max Planck
(1858-1947)



Werner
Heisenberg
(1901-1976)

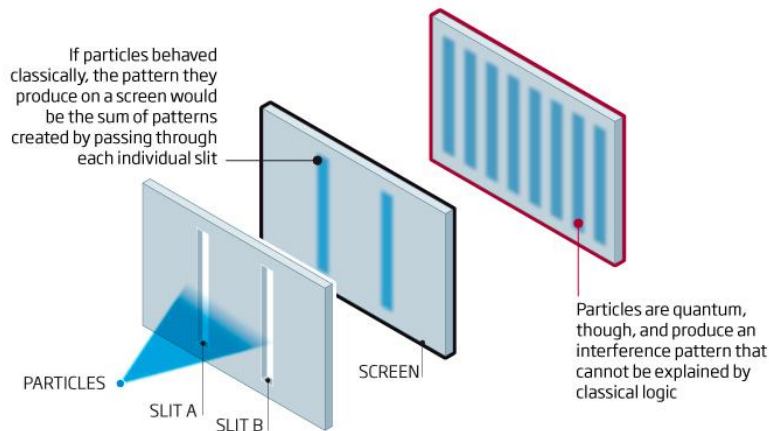
Física Quântica

- Fóton: dualidade onda-partícula.
- **Louis de Broglie** (1924): partículas também se comportam como onda.
- Experimento da fenda dupla para elétrons (1927).

The famous double slit experiment

©NewScientist

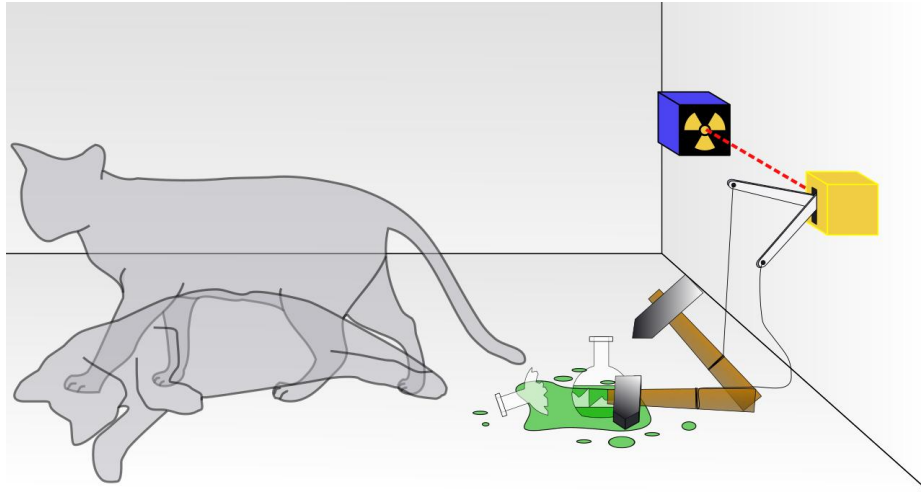
This experiment illustrates the difference between quantum and classical mathematics



Créditos: New Scientist

Gato de Schrödinger

- **Superposição quântica:** o estado de um sistema físico existe em superposição antes de ser medido.
- Experiência mental proposta por **Erwin Schrödinger** em 1935. O gato morrer ou não depende do estado de uma partícula, que não é definido antes da medição. Por isso, o *gato estaria vivo ou morto ao mesmo tempo*.



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

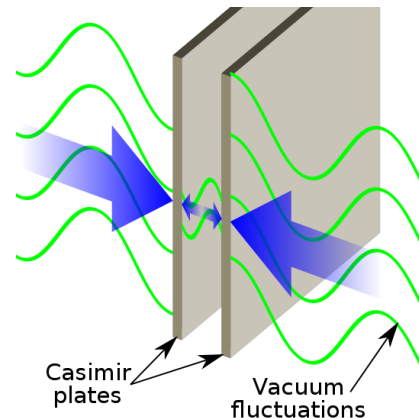


Vácuo quântico

- A ideia de vácuo como o *vazio absoluto* foi derrubada.
- Se retiramos toda a matéria e a radiação de uma região do espaço, sobram as chamadas *partículas virtuais*, que não podem ser removidas. [3]
- Constantemente são criadas partículas aos pares que se aniquilam mutuamente. Constituem as chamadas *flutuações quânticas*.
- **Mecânica Quântica:** Partículas virtuais existem em um tempo menor do que o mínimo necessário para se observar uma partícula. [3]

Vácuo quântico

- Mesmo não podendo observar as partículas virtuais diretamente, elas provocam efeitos que podemos detectar. (*Efeito Casimir* com fótons virtuais, por exemplo).
- As partículas virtuais conferem ao vácuo uma **energia não nula**, chamada energia de ponto zero.



Efeito Casimir, previsto pelo físico *Hendrik Casimir* em 1948.

Multiverso



Bond of Union – M. C. Escher (1956)



Antes, definições

- **Universo:** tudo o que podemos ter acesso; tudo que está dentro do horizonte cósmico.
- **universo:** tudo o que existe fisicamente, a união de espaço e tempo e tudo que há dentro. Inclui o Universo.
- A geometria plana do universo sugere que ele continue além do nosso horizonte cósmico (será que infinitamente?).

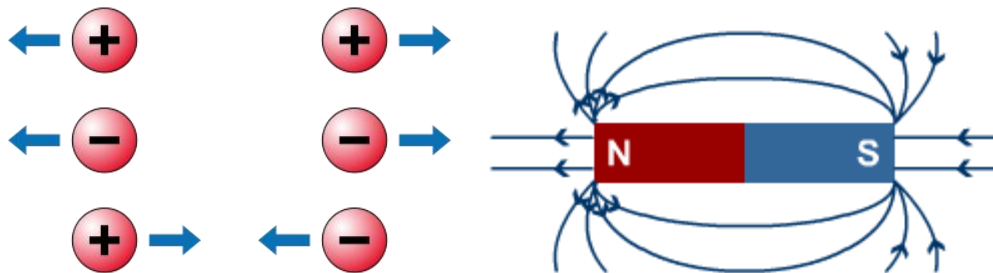
Antes, definições

- **Multiverso:** coleção (possivelmente infinita) de “universos-ilha” (não no mesmo sentido de Kant).
- O universo seria um conjunto **isolado** no multiverso.
- universos de extensão infinita poderiam existir no multiverso infinito; existem **infinitos maiores que outros**.
- universos podem ser curvos e finitos também.



Inflação cósmica

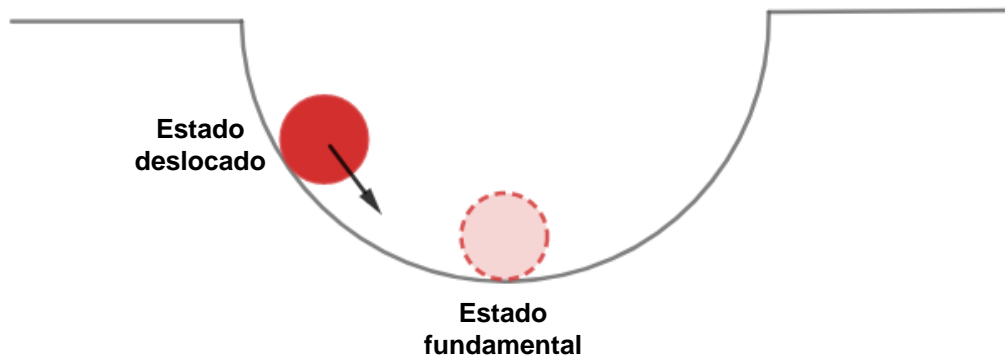
- Modelo inflacionário proposto por *Alan Guth* em 1981: O universo teria passado por um **crescimento exponencial** em seus estágios iniciais.
- **Teoria que surgiu para resolver alguns problemas:**
 1. Planaridade do universo;
 2. Homogeneidade da radiação cósmica de fundo;
 3. Inexistência de monopolos magnéticos.



Crédito: S-cool

Inflação Cósmica: o que ocasionou?

- **Hipótese: Campo escalar (do tipo Higgs)**
- Campo que preencheria todo o Cosmos e estaria **deslocado de seu estado fundamental** (de menor energia).
- Expansão acelerada até que o campo relaxasse em seu estado fundamental.



Multiverso: inflação caótica

- **Pode existir?** Ao menos em teoria, sim.
- Energia extra do campo **não distribuída uniformemente**: regiões distintas expandindo individualmente de forma desenfreada.
- **Cada universo em potencial conectado ao universo-mãe por um “buraco de minhoca”**
- Inflação caótica: *Andrei Linde*, anos 80.
- Foi influenciado pelo trabalho de *Alan Guth*.

Crédito: Florida State University





Multiverso: inflação caótica

- **Por que o campo não seria homogêneo?**
- Física Quântica: Nenhuma partícula pode ter energia zero.
- Quanto maior a energia extra do campo, maior sua **agitação quântica**.
- Suponha no universo primordial um campo com energia extra uniforme pelo espaço todo. Uma agitação quântica elevaria a energia extra do campo, numa região que se expandiria muito mais rápido e, logo, se tornaria outro **universo independente**.

Multiverso: inflação caótica

- **Agitação quântica é inevitável**
- Para *Linde*, um universo com um campo escalar de energia extra **necessariamente** criaria uma multidão de universos (multiverso).

Andrei Linde, professor da
Universidade de Stanford





Inflação e expansão acelerada do universo

- **Importante:**

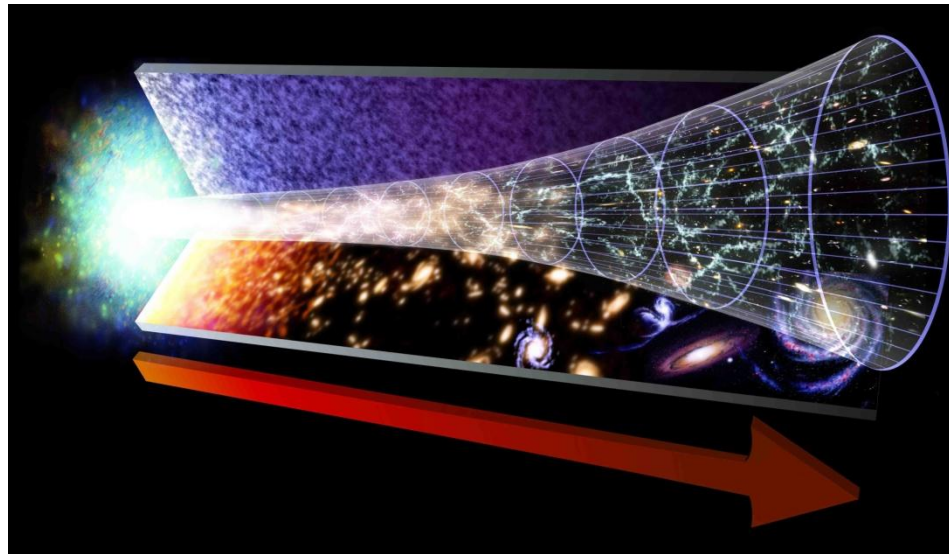
Expansão acelerada atual
(supostamente causada por energia escura)

≠

Expansão durante o período de inflação

Multiverso

- Na ideia da inflação caótica, o Big Bang seria apenas uma ocorrência dentre muitas do multiverso.

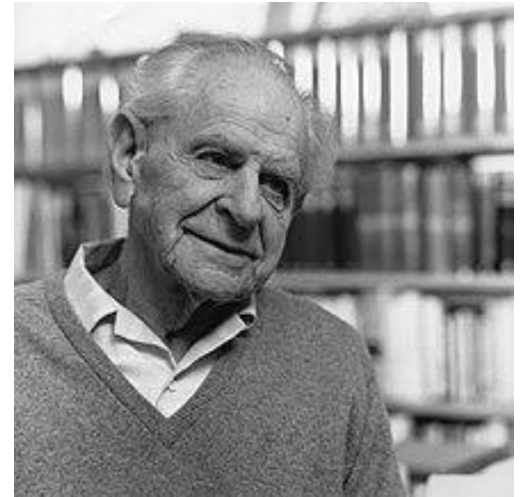


Multiverso: testável?

- Toda hipótese científica **deve ser testável**, podendo ser **corroborada ou refutada**.
- Com o máximo de simplicidade possível, uma teoria deve descrever os fenômenos da natureza e fazer previsões que possam ser testadas.

Algumas de suas obras importantes:

- *A Lógica da pesquisa científica*
- *Conjecturas e refutações*



Karl Popper (1902-1994)

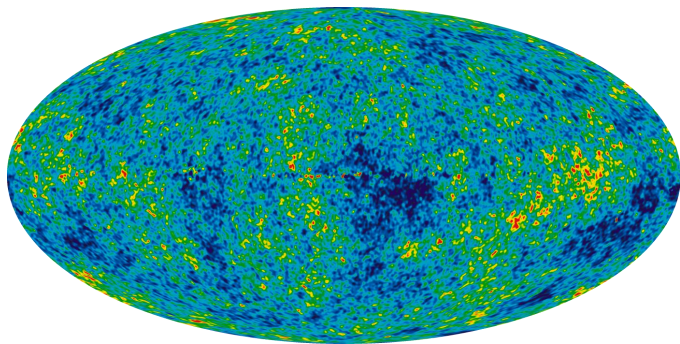
Inflação cósmica

- **Salto quântico** no início do universo: pequenas regiões de flutuações de energia, ampliadas a **dimensões astronômicas** pela inflação.
- Energia \leftrightarrow Massa
- Regiões mais densas atraem mais matéria, formando uma teia que permeia o universo. Ao longo dessa teia ocorreria a **formação de galáxias e aglomerados de galáxias**.
- Luz também é afetada pela gravidade (relatividade geral) \rightarrow previsão de pequenas **flutuações de temperatura na radiação cósmica de fundo**.

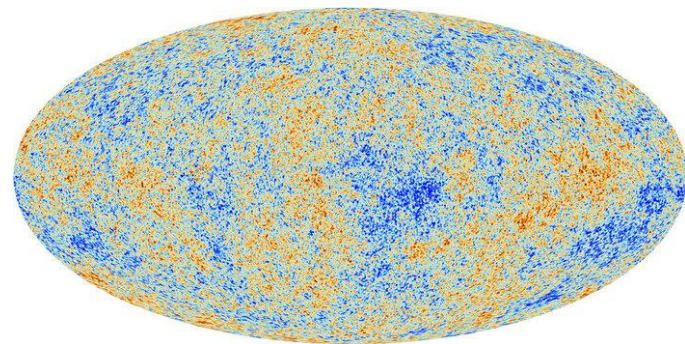
Radiação cósmica de fundo

- Essas flutuações foram muito bem detalhadas com as medidas de alta precisão da Sonda Wilkinson de Anisotropia de Micro-ondas (WMAP), e também pelo satélite Planck.

Universo apenas 400.000 anos depois do Big Bang



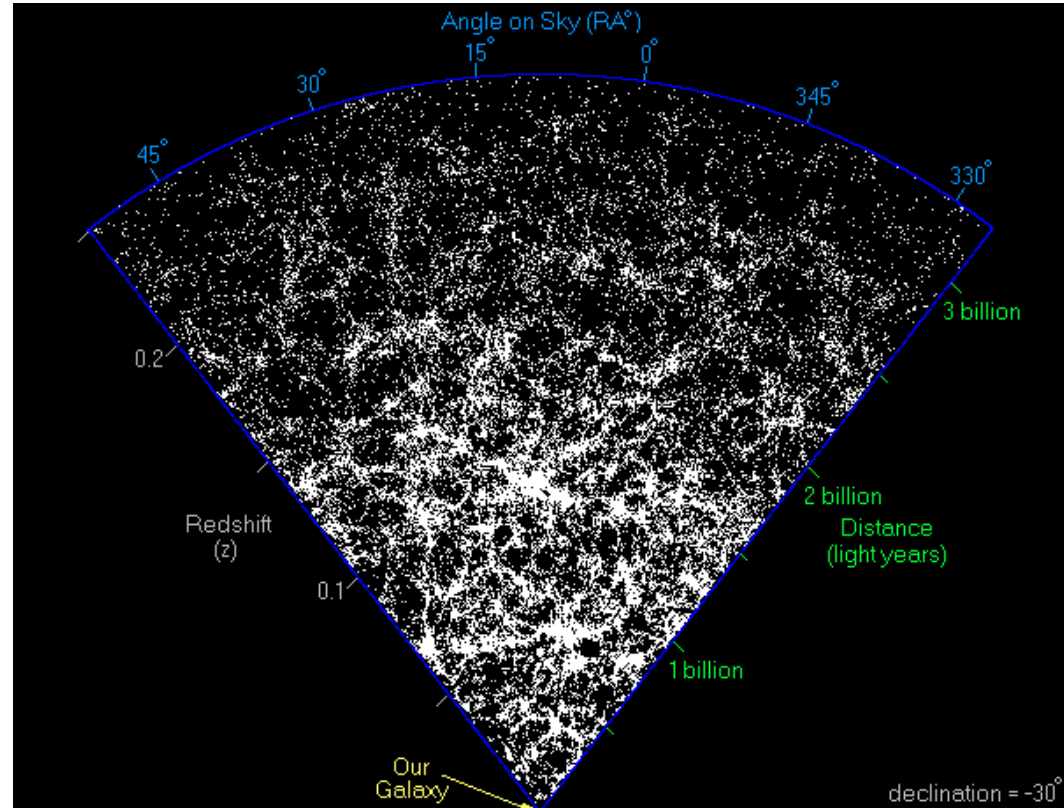
Créditos: WMAP/NASA



Créditos: ESA and the Planck Collaboration

Teia Cósmica

- Coletando distâncias de diversas galáxias (através da *Lei de Hubble*, medindo **Redshifts**) pode-se montar um mapa de como elas se distribuem no Universo.
- Essa é apenas uma fatia.





Inflação cósmica

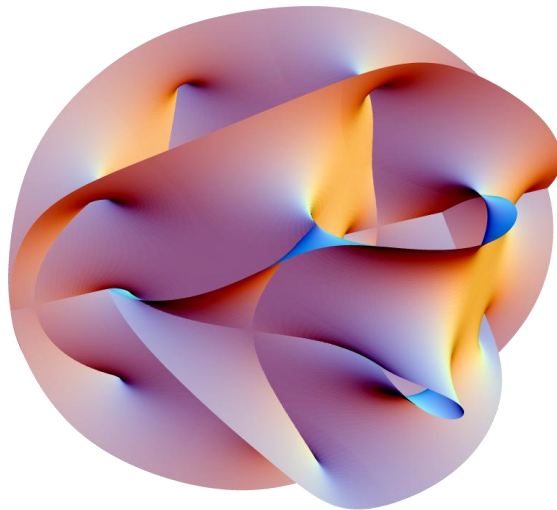
- **A inflação foi criada** para resolver os problemas de: planaridade, homogeneidade da radiação cósmica de fundo e inexistência de monopolos magnéticos. **Não é uma surpresa que ela funcione nisso.**
- Ao mesmo tempo, **fez previsões** sobre as flutuações na radiação cósmica de fundo que foram observadas posteriormente.
- Importante: a inflação teria ocorrido antes da recombinação (10^{-36} segundos após o Big Bang), ou seja, quando o universo ainda era opaco.
- Uma maneira de obter evidência direta da inflação seria detectar **ondas gravitacionais** do evento.

Em resumo

- A inflação cósmica tem apoio experimental/observacional.
- Ainda assim, não há confirmação sobre **o que a ocasionou**. O campo com energia extra é uma hipótese.
- Teorias “filhas” da inflação cósmica, que supõem excitações não homogêneas do campo escalar, levando à existência de Multiverso, não têm respaldo observacional até agora.
- **Não espere poder viajar para outros universos no futuro.**



Teoria de Supercordas





Supersimetria

- **Supersimetria**
- Existem dois tipos de partículas:
- **As que compõem a matéria:** elétrons, quarks e outras.
- **As que transmitem força entre elas:** fótons, “grávitons”, glúons (mantêm quarks unidos), e mais três da força nuclear fraca, responsável pelo decaimento radioativo.
- A supersimetria torna possível **transformar partículas de um tipo no outro**. Uma de suas motivações originais era justificar que o espaço vazio teria energia zero.
- Não temos evidência de que ela exista.

Cordas

- **Teoria de cordas**
- “blocos fundamentais”: objetos unidimensionais, como uma corda. Cada partícula seria uma corda vibrando de uma maneira específica, e o espaço teria mais do que 3 dimensões.
- Exemplo ilustrativo: ondas estacionárias



Na verdade, a teoria descreve cordas unidimensionais fechadas.



*Crédito: Kepler de Souza
Oliveira Filho*

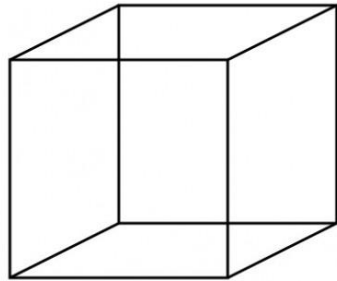


Supercordas

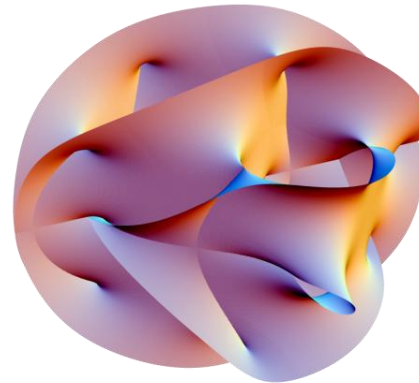
- Cordas + Supersimetria = Supercordas
- As supercordas só podem existir em **9 dimensões espaciais.**
- Existem cinco tipos de teorias de supercordas, mas todas são manifestações de uma única teoria, que acontece em 10 dimensões, a “**Teoria-M**”.

Supercordas

- **Dimensões extras**
- As dimensões extras da teoria precisam ser modeladas como algum tipo de espaço de 6 dimensões. O espaço de **Calabi-Yau** é um exemplo.



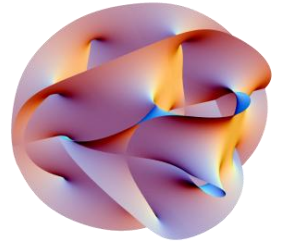
Assim como esta é uma representação de um objeto 3-D em um espaço 2-D.



Esta é uma representação de um espaço 6-D (Calabi-Yau) em um espaço 2-D.

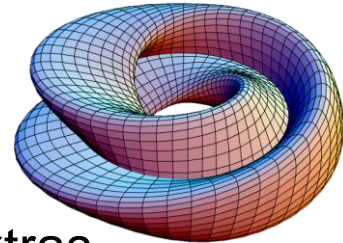
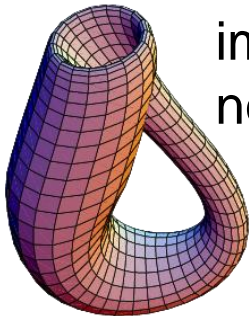
Supercordas

- Mas então onde estão essas dimensões extras que não vemos?
- São várias as tentativas de explicar isso. Algumas trazem justificativas do porquê apenas três dimensões cresceram depois do Big Bang; outras dizem que as outras dimensões são enormes e vivemos numa espécie de “brana” dentro delas.
- As teorias de supercordas também preveem a existência de um multiverso.



Supercordas

- Relatividade Geral: diferentes parâmetros físicos → geometrias distintas para o universo.
- A mesma ideia é aplicada para as dimensões extras da teoria de supercordas.
- Pense em todas as formas nas quais as 6 dimensões extras poderiam se contorcer!
- Cada forma específica das 6 dimensões extras levaria a universos com propriedades distintas, implicando em uma realidade física diferente nas nossas 3 dimensões espaciais.



Imagens meramente ilustrativas



Panorama das cordas

- É o **espaço abstrato** que contém todas as **geometrias possíveis** que as dimensões extras podem ter.
- Isso apareceu como um **problema** para a teoria, pois esperava-se que fosse **A teoria única**, que descrevesse apenas o nosso universo.



Panorama das cordas

- Assim como uma equação de 2º grau admite duas soluções:

$$X^2 - 1 = 0 \rightarrow X = 1 \text{ ou } X = -1$$

- A teoria de supercordas esbarrou em um conjunto de soluções.
- Não apenas o nosso universo satisfaz a equação fundamental da teoria, mas um **número gigantesco de outros tipos de universos** satisfazem também (estima-se algo em torno de 10^{500}).
- O nosso seria uma solução especial? Se sim, por quê?

Panorama das cordas

- **Cada solução:** um vale no panorama das cordas; um modelo de universo com *características diferentes*



- Por exemplo: a carga e massa do elétron, a velocidade da luz...
- 2000: *Rafael Bousso e Joseph Polchinski* tiveram a ideia de **combinar o panorama das cordas com a ideia da inflação eterna.**

Panorama das cordas

- As regiões que separam um vale do outro expandiriam aceleradamente. Cada vale corresponderia, então, a um **universo isolado**.



- O nosso seria apenas um entre (infinitos?) outros.
- Essa ideia evita a necessidade de encontrar uma razão para que somente o nosso universo exista, entre todas as outras possibilidades do panorama.



Outros universos

- Estamos numa situação em que o **incognoscível** (o que é *impossível* de conhecer) ganhou espaço na física teórica.
- Como testar se existem outros universos?
- ***Estamos e estaremos sempre restritos ao universo em que vivemos, seja ele único ou não.***
- E, além disso, restritos ao horizonte cósmico, uma **barreira intransponível dentro do nosso próprio universo.**



Princípio antrópico

- Na magnífica pluralidade de universos diferentes, como poderíamos explicar a nossa existência?
- “Segundo o princípio antrópico, (...), nossa existência não é algo que pode ser previsto por uma teoria, mas apenas “pós-dito””. [4]
- *Brandon Carter*: Não seria uma surpresa vivermos em um universo com seres vivos. Afinal, apenas nele específicos parâmetros físicos garantiriam que o universo fosse velho o suficiente e tenha permitido o ciclo de várias estrelas, que produziriam os elementos pesados necessários à vida.



Princípio antrópico

- A priori o princípio antrópico seria o único argumento capaz de auxiliar na seleção do nosso universo dentro do panorama de cordas e multiverso.
- Dada a existência de um universo diferente para cada solução do panorama, restauraríamos nossa mediocridade copernicana. [4]
- **O princípio antrópico não nos ensina nada de novo;** apenas nos diz os valores plausíveis de alguma grandeza física usando o que já sabemos, que é a existência de vida num universo com determinados valores.
- Caso encontrem um motivo para que nosso universo seja uma *solução preferida* dentro do panorama, o princípio antrópico seria completamente descartado.



Voltando na história

- Teoria do éter eletromagnético
- Flogisto
- Calórico
- Planeta Vulcan
- Não é porque uma ideia explica a natureza de um modo que parece possível, que é verdade.
Precisamos de evidências.
- A imaginação aliada à racionalidade é uma ferramenta essencial à ciência. Mas é preciso **testes experimentais.**



Multiverso: detectável?

- Teorias de multiverso são de certo modo contrárias ao tipo de *estrutura operacional* que a ciência tem desenvolvido em todos esses séculos.
- Se existem outros universos, são **inacessíveis, inobserváveis**. Não é uma questão de avanço tecnológico.
- Uma saída é a ideia de que poderíamos de alguma forma inferir **indiretamente** a existência de outro universo.

Multiverso: detectável?

- E se nosso universo tivesse colidido com outro?
- Colisões entre universos poderiam provocar vibrações em suas superfícies, e o mapa da **radiação cósmica de fundo** poderia revelar uma assinatura anular de um evento assim. Até agora não foi encontrado nada.





A teoria fundamental

- Uma ideia popular entre os físicos é que uma futura ***união entre a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral*** geraria **A teoria fundamental**, que descreveria inequivocamente a geometria do universo.
- *Mecânica Quântica é tão importante quanto Relatividade Geral, ainda que incompatível com ela.*



Multiverso: detectável?

- Suponha que encontrássemos um padrão anular que indicasse a colisão no passado e que, então, existe outro universo.
- Não poderíamos saber nada sobre as propriedades deste universo! Apenas poderíamos inferir sua existência e, claro, sem certeza absoluta.
- A detecção de um universo vizinho não seria prova da existência um multiverso. O infinito não é comprovável/testável!

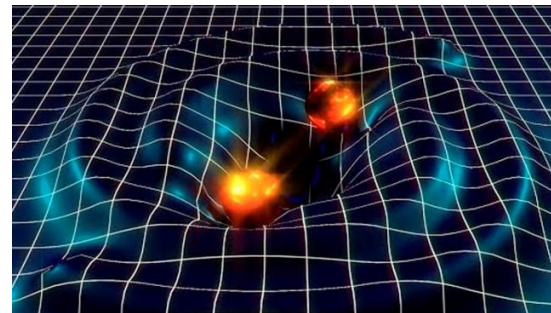


A teoria fundamental

- Por que Mecânica Quântica e Relatividade Geral são incompatíveis?
 - *Mecânica Quântica*: sucesso em explicar a física do que acontece em **escalas muito pequenas**.
 - *Relatividade Geral*: sucesso em **escalas astronômicas** do universo.
- **Ambas fracassam no cenário de sucesso uma da outra.**

A teoria fundamental

- No fundo, a natureza deveria ser uma só. Por isso, buscamos por uma teoria fundamental.
- Além disso, para descrever o Big Bang é necessário considerar tanto efeitos quânticos quanto relativísticos: **Teoria da gravitação quântica**
- Existem várias tentativas, mas até agora nada tão bem sucedido.





“Cada peça ou parte da Natureza é sempre uma aproximação da verdade completa, ou do que podemos conhecer da verdade completa. De fato, tudo o que sabemos é uma espécie de aproximação, porque sabemos que não conhecemos ainda todas as leis. Portanto, as coisas são aprendidas apenas para serem desaprendidas ou, mais provavelmente, corrigidas.”

Feynman Lectures on Physics – Richard Feynman



“Existe uma teoria que diz que, se um dia alguém descobrir exatamente para que serve o universo e por que ele está aqui, ele desaparecerá instantaneamente e será substituído por algo ainda mais estranho e inexplicável.

× × ×

Existe uma segunda teoria que diz que isso já aconteceu.”

O mochileiro das galáxias: O restaurante no fim do universo – Douglas Adams

Referências

- 1 *How Old is the Universe?* National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: https://map.gsfc.nasa.gov/universe/uni_age.html. Acesso em 5 de Outubro de 2017.
- 2 *How Big Was The Universe At The Moment Of Its Creation?* Ethan Siegel. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2017/03/24/how-big-was-the-universe-at-the-moment-of-its-creation/#3dbe0d454cea>. Acesso em 5 de Outubro de 2017.
- 3 *O vácuo quântico cheio de surpresas.* George Emanuel A. Matsas e Daniel A. Turolla Vanzella. Disponível em: <http://www.ift.unesp.br/users/matsas/sab.pdf>. Acesso em 5 de Outubro de 2017.
- 4 GLEISER, M. A ilha do conhecimento: Os limites da ciência e a busca por sentido. Editora Record, 3ª edição, 2015.