

Modelos de ricochete

Nelson Pinto Neto

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

As recentes observações cosmológicas e astrofísicas indicam que o Universo está em expansão, com uma fase muito quente no passado, o que para muitos indica um início do Universo. Neste artigo, pretendo motivar e descrever modelos cosmológicos onde o Universo não teve um começo nem terá fim, contendo uma longa fase de contração seguida por um ricochete que o lança na fase de expansão observada atualmente. Por isso são chamados de Modelos de Ricochete. No contexto onde há infinitas fases de contração e expansão, com ricochetes entre elas, são também chamados de Modelos Cíclicos. Esse conjunto de modelos será motivado teoricamente, e confrontado com as mais recentes observações cosmológicas. Também será comparado com os modelos onde o Universo teve um começo sucedido por uma fase inflacionária, que será explicada em outros artigos deste número dos Cadernos de Astronomia.

Abstract

Recent cosmological and astrophysical observations indicate that the Universe is expanding, with a very hot phase in the past, which for many indicates the beginning of the Universe. In this article, I intend to motivate and describe cosmological models where the Universe did not have a beginning and will not have an end, containing a long contraction phase followed by a bounce that launches it into the currently observed expansion phase. That is why they are called Bouncing Models. In the context where there are infinite contraction and expansion phases, with bounces between them, they are also called Cyclic Models. This set of models will be theoretically motivated, and confronted with the most recent cosmological observations. It will also be compared with models where the Universe had a beginning followed by an inflationary phase, which will be explained in other articles in this issue of Cadernos de Astronomia.

Palavras-chave: cosmologia, modelos com ricochete, extensões da relatividade geral, observações cosmológicas.

Keywords: cosmology, bouncing models, extensions of general relativity, cosmological observations.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n2.41730](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.41730)

1 Introdução

Pinturas rupestres de 40 mil anos atrás, veja a Figura 1, indicam que já nos primórdios da Humanidade havia um extraordinário encantamento pelo Cosmo: estrelas, planetas, cometas, o Sol, a Lua, inclusive com a percepção da rotação do céu, mais tarde entendida como a rotação da Terra em torno do seu eixo. Como consequência, perguntas sobre a origem de tudo isso foram surgindo desde essa época, e as respostas vieram sob a linguagem dos diversos mitos religiosos criados em diferentes grupos sociais. Com a formulação do Método Científico por Galileo Galilei (1564-1642), há cerca de 400 anos, essas perguntas começaram a ser investigadas sob a ótica de uma nova linguagem, a da Física Moderna, culminando com a formulação da Teoria da Relatividade Geral (TRG) por

Albert Einstein (1879-1955) em 1915, e o nascimento da Cosmologia Relativista em 1917. O Universo passou a ser entendido como um sistema físico regulado pelas leis da TRG, que descreve a dinâmica do espaço-tempo-matéria-gravitação em uma estrutura unificada. Seguindo esse arcabouço teórico, Alexander Friedmann (1888-1925) formulou um modelo de universo dinâmico, que poderia estar em expansão ou contração. Como toda teoria física necessita estar em acordo com experimentos e/ou observações, só a partir de 1927-1929, com a observação da expansão generalizada e em larga escala das galáxias e aglomerados de galáxias por Georges Lemaître (1894-1966) e Edwin Hubble (1889-1953), a nova Cosmologia que surgia passou a ser levada a sério. Entretanto, a expansão do Universo descrita pela

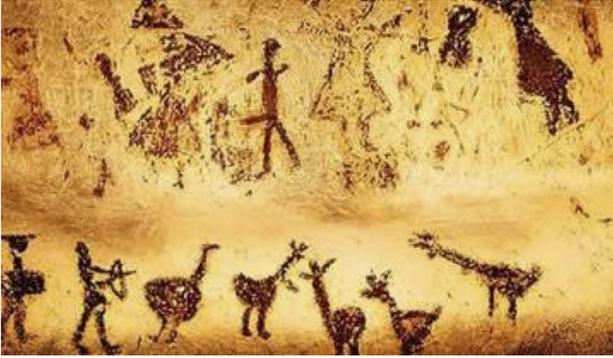


Figura 1: Pintura rupestre de 40 mil anos encontrada na Europa. Comparações com outras figuras e o céu da mesma época indicam que as figuras aladas representam constelações que vão girando no céu com a passagem do tempo.

TRG, se extrapolada para o passado, levava inexoravelmente a um ponto singular inicial de origem do tempo, onde quantidades físicas, como a densidade de energia do Universo, vão a infinito. Neste ponto nenhuma teoria física faz sentido.

Físicos e astrônomos não estão imunes, como qualquer ser humano, ao ambiente cultural à sua volta. Sendo assim, os físicos ocidentais, imersos numa cultura judaico-cristã onde está fortemente inserida a ideia de que o Cosmo teve um momento inicial (Gênesis), aceitaram prontamente a ideia científica de uma origem do tempo. Não é por acaso que a ideia de um “átomo primordial” como início do Universo tenha sido formulada pelo próprio Lemaître, um padre católico. Neste cenário, indo para trás no tempo usando a TRG e antes de chegar à singularidade inicial, o Universo deve ter sido muito mais denso e quente, tão quente que átomos não existiam, só elétrons e prótons dissociados formando um plasma com elevadas temperaturas, acima de dez mil graus Kelvin. Quando o Universo esfriou e os átomos se formaram, a radiação eletromagnética do plasma ficou livre (partículas de luz, fótons, interagem fortemente com partículas carregadas, mas não com átomos neutros). Essa radiação livre, depois chamada de radiação cósmica de fundo (RCF), poderia ser observada hoje, como proposto por George Gamow (1904-1968) em 1948. Os trabalhos de Gamow com seus colegas deram origem ao chamado modelo cosmológico do *big bang*, veja a Figura 2. Entretanto, a singularidade inicial que dá origem ao Universo permanecia sem ser abordada, muito menos compreendida.

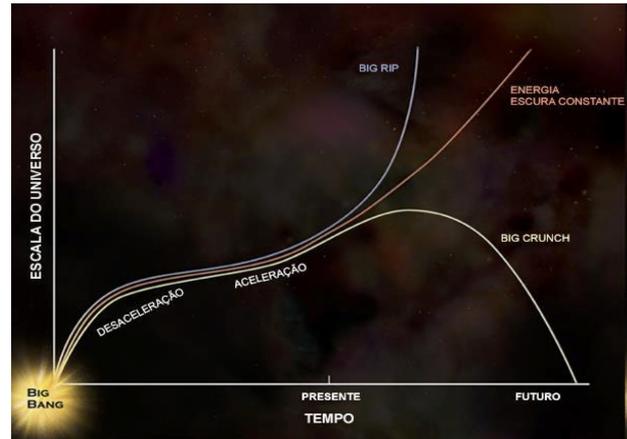


Figura 2: Modelos cosmológicos extrapolados no passado até o *big bang*. O *Big Rip* (Grande Rasgo) é um outro tipo de singularidade que pode surgir se a energia escura tem pressão negativa e módulo superior à sua densidade de energia. O espaço-tempo se dilacera.

Paralelamente a isso, buscando resolver o problema da singularidade inicial, Hermann Bondi (1919-2005), Thomas Gold (1920-2004), Fred Hoyle (1915-2001), e depois Jayant Narlikar (1938-), desenvolveram o modelo cosmológico estacionário, onde haveria permanente criação de matéria, muito pequena para ser detectada, mas que manteria o Universo sempre com a mesma taxa de expansão, e as mesmas densidades e temperaturas. Neste modelo o Universo não tem começo nem fim, mas também não tem a RCF.

Com a observação acidental da RCF em 1964 por Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-), o modelo cosmológico estacionário ficou quase esquecido, e o modelo *big bang* ganhou força, sobretudo com o surgimento dos Teoremas de Singularidade de Roger Penrose (1931-) e Stephen Hawking (1942-2018), onde ficou demonstrado que sob condições bem gerais e fisicamente razoáveis sobre a distribuição de matéria, energia, e campo gravitacional, as singularidades continuariam a existir, tanto em cosmologia quanto no interior de buracos negros. Ou seja, para entender a singularidade inicial só com teorias que sejam extensões da TRG e da física que descreve a matéria, ou então pela presença de efeitos quânticos em regiões da altíssima temperatura, ainda não considerados.

A partir da década de 70, essas extensões passaram a ser consideradas, e novos modelos cosmológicos com expansão e fase muito quente eram

precedidos de um ricochete e uma fase de contração [1–3]. Modelos cíclicos desse tipo já tinham sido considerados na década de 30 [4], porém as fases de contração que seguiriam a presente fase de expansão conteriam as galáxias e aglomerados de galáxias que hoje existem, terminando por produzir uma imensa quantidade de buracos negros e outros objetos compactos que jamais poderiam dar início à uma nova fase de expansão semelhante à que hoje vivemos. Assim, esses modelos foram descartados. Por outro lado, os modelos das referências [1–3] ainda eram muito simples, não se adequando às observações cosmológicas mais precisas que vinham surgindo.

Nesse artigo, vou abordar os modelos de ricochete contemporâneos mais complexos que satisfazem as atuais observações cosmológicas, e os diversos contextos teóricos em que são produzidos. Grande parte deles traz consigo muitas das ideias trazidas pelos pioneiros relatados acima, porém bem mais elaboradas, por vezes fundindo ideias de modelos diferentes. Na Seção 2 descreverei com mais detalhe esses modelos de ricochete, na Seção 3 farei uma comparação com as observações, e com os modelos de *big bang* com inflação. Concluo na Seção 4 com as perspectivas desses modelos para o futuro.

2 Modelos de ricochete

Como vimos na Introdução, eliminar a singularidade inicial cosmológica colocando no seu lugar um ricochete regular entre fases de contração e expansão do Universo só seria possível com extensões da TRG clássica e/ou do Modelo Padrão da Física de Partículas. O ricochete é necessariamente um ponto onde a velocidade de contração do Universo é zero e sua aceleração positiva, para que haja uma fase de expansão posterior. Na TRG, isto só é possível se o conteúdo material tiver uma pressão demasiadamente negativa ($p < -\rho$, onde p é a pressão e ρ a densidade de energia), ou energia negativa, o que implicaria numa instabilidade quântica dos campos de matéria conhecidos. As modificações da TRG que foram sugeridas incluem novos acoplamentos entre os campos materiais e a gravitação, e da gravitação consigo mesmo, que só se manifestariam em escalas de energia muito altas. Uma outra

possibilidade seria considerar que a altas energias efeitos quânticos da Gravitação se tornariam relevantes. O problema é que até hoje não temos uma Teoria da Gravitação Quântica consensual, portanto várias abordagens têm sido utilizadas: as diferentes teorias de corda, a Gravitação Quântica de Laços, e a quantização Wheeler-DeWitt, que não pode ser aplicada a escalas muito próximas da escala de Planck (escalas de distância da ordem de 10^{-33} cm). Nesse caso, o ricochete tem que acontecer em escalas superiores a essa.

Vários modelos de ricochete surgiram dessas abordagens quânticas. Em muitos deles, efeitos quânticos implicam num termo efetivo nas equações cosmológicas da TRG que fazem um papel similar a um termo de matéria com energia negativa que só se manifesta a altas energias, o que provoca o ricochete. Vamos agora descrever cada um deles.

2.1 Modelos com um único ricochete sem fase inflacionária

Tais modelos emergem essencialmente da abordagem de Wheeler-DeWitt, onde a fase de contração é dominada por campos de matéria usuais, com energia e pressão positivas, havendo a possibilidade de campos com pressões um pouco negativas ($-\rho/3 < p < \rho$).

Como será visto em outro artigo dessa Seção Temática dos Cadernos de Astronomia, a inflação é necessária em modelos onde o Universo tem um começo devido a três problemas básicos: horizonte, planeza, e da formação de estruturas. O primeiro problema refere-se ao fato de na época do desacoplamento da RCF, diversas regiões com mesma temperatura não poderiam se termalizar por estarem afastadas umas das outras por distâncias muito maiores que a luz poderia viajar desde o início do Universo. Sobre a planeza, as observações indicam que o espaço tri-dimensional do Universo é praticamente plano, mas as lentes com as quais observamos esse espaço têm desde o início crescido muita mais rapidamente que o próprio espaço. Seria como se pegássemos um foguete muito poderoso e saíssemos da Terra, mas por mais que viajássemos veríamos ela sempre plana, ou seja, seria uma Terra com raio imenso. O problema da origem das estruturas surge pelas mesmas razões: as escalas espaciais das estrutu-

ras que hoje observamos, como galáxias e aglomerados de galáxias, eram, no passado, muito maiores que o universo observável da época, e portanto não poderiam ser explicadas por nenhuma física local.

Nos modelos de ricochete descritos acima, nenhum dessas problemas se coloca. Como não há começo do Universo, todas as regiões do Cosmo tiveram tempo infinito para interagir e termalizar. Numa fase de contração dominada por um campo material com pressão e densidade de energia satisfazendo $-\rho/3 < p < \rho$, as lentes com as quais observamos o Universo diminuem muito mais rapidamente que o próprio Universo, numa dinâmica reversa à da expansão. É como se olhássemos uma esfera com um campo de visão cada vez menor: ela nos parecerá plana, e nos parece plana hoje porque o Universo expandiu muito menos do que tudo que contraiu. Finalmente, para a formação de estruturas, a solução é semelhante, pois a dinâmica é reversa à da expansão: voltando para trás no passado na fase de contração, as escalas espaciais das estruturas que hoje observamos se tonaram, nesse passado remoto, muito menores que o universo observável da época, e não percebiam a taxa de expansão do Universo nem qualquer curvatura do espaço-tempo, veja Figura 3. Note que nesse passado remoto o Universo era muitas ordens de grandeza maior do que ele é hoje, e tendo a mesma quantidade de matéria sendo, portanto, quase vazio. Neste cenário, a origem dessas estruturas pode ser tratada com a física do espaço-tempo plano, bem conhecida dos físicos, surgindo de flutuações quânticas de um estado de vácuo quântico adequado a esse período do Universo onde ele era quase vazio.

Por outro lado, a ausência de inflação impõe que não pode ser qualquer campo material a dominar a fase de contração: para que haja acordo entre esse modelo e as observações da RCF é necessário que o campo material que domina a contração em largas escala tenha pressão quase nula. Note que a matéria escura que hoje compõe o Universo observado tem exatamente essa propriedade podendo ser, portanto, o campo fundamental que domina essa fase.

O início da fase de expansão deve ser dominada por radiação, como no modelo padrão da Cosmologia, e não por matéria escura. Entretanto, se adicionarmos radiação ao modelo acima pouco al-

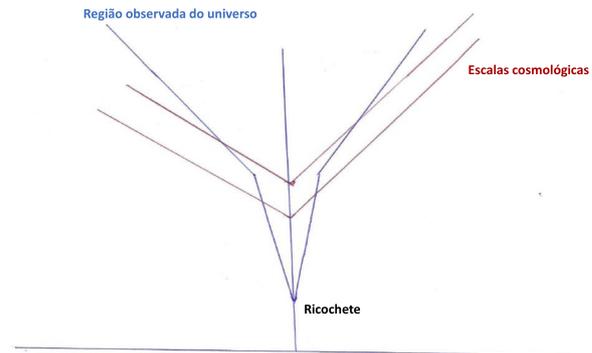


Figura 3: Evolução comparativa entre as escala de causalidade do Universo, em azul, e as escalas cosmológicas de galáxias, aglomerados de galáxias, e super aglomerados, em roxo. Note que sem o ricochete as escalas cosmológicas iniciariam maiores que a escala de causalidade, mas com o ricochete, indo para trás no tempo, elas voltam a se tornar muito menores que essa escala no passado remoto.

terará a dinâmica do Universo em largas escalas, já que ela só se torna dominante mais perto do ricochete. Esse modelo mais complexo também tem sido investigado, com resultados consistentes com as observações.

Na Figura 4 é apresentado um dos primeiros modelos de ricochete quântico obtidos [5], onde o campo material dominante no ricochete é radiação.

2.2 Modelos cíclicos sem inflação

Os chamados modelos cíclicos com infinitos ricochetes, motivados por teorias de corda, têm que resolver o problema levantado na referência [4]. A fase de expansão tem que conter um período de fase muita acelerada para dissipar todas as estruturas que existem no Universo, e reiniciar a fase de contração quase vazio. Na referência [6], é proposta a existência de um campo material com características bastante especiais que realiza essas fases.

Os ciclos se realizam da seguinte forma: o Universo expande como no modelo cosmológico padrão, forma galáxias e estrelas, atinge a fase acelerada que aos poucos dissipará todas essas estruturas. Depois disso, ele contrai novamente quase vazio, bastante homogêneo, onde as sementes das novas estruturas são criadas por flutuações do vácuo quântico, até realizar um ricochete que o lança de novo numa fase expansão semelhante a que vivenciamos hoje, e assim o ciclo se repete.

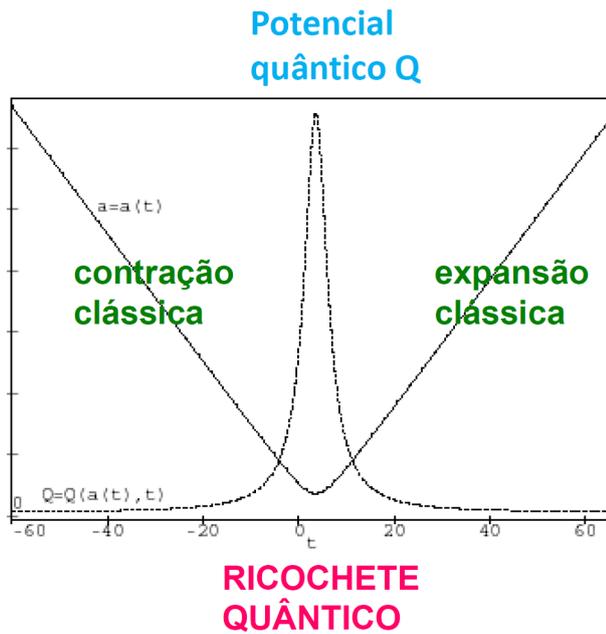


Figura 4: Exemplo de um ricochete quântico. O universo contrai classicamente em direção à singularidade, mas efeitos quânticos quantificados pelo potencial quântico se tornam importantes, interrompem esse colapso, e lança o universo na fase de expansão que hoje observamos.

Os colapsos ocorrem muito lentamente, de forma a evitar a geração de anisotropias na contração.

Em cada ciclo o momento de recolapso e ricochete acontecem em escalas cada vez maiores, veja Figura 5, mas as velocidades relativas de expansão e contração são sempre as mesmas. As escalas de recolapso e ricochete crescem exponencialmente, portanto este modelo cíclico combina o modelo de estado estacionário discutido na Introdução com o modelo cíclico da referência [4], com suas qualidades e sem os seus defeitos. Entretanto, a maneira como se dá o ricochete nesses modelos ainda é bastante incerta e com questões a serem respondidas, como também o campo que realiza essas fases é bastante artificial.

2.3 Bounce com inflação

A maioria dos modelos desse tipo são propostos no formalismo de quantização da Cosmologia chamado Cosmologia Quântica de Laços (CQL). Este formalismo usa técnicas da teoria mais geral de quantização da Gravitação chamada Gravitação Quântica de Laços (GQL), mas não foi provado que a CQL pode ser obtida da GQL. Mesmo assim, a CQL tem a pretensão de ser válida mesmo



Figura 5: Visão artística dos modelos cíclicos. Note que as escalas máximas e mínimas vão aumentando.

em escalas bem próximas da escala de Planck.

Nessa abordagem, existe também um ricochete entre uma fase de contração e outra de expansão causado por efeitos quânticos, que como na quantização Wheeler-DeWitt implicam numa correção quântica às equações da TRG que fazem o papel de um termo de energia negativa, sem sê-lo. Entretanto, nesses modelos, uma fase inflacionária posterior é mantida, portanto os campos de matéria que dominam na contração não precisam ser restringidos para produzir observáveis em acordo com as atuais observações cosmológicas, a inflação já faz esse papel. Na verdade são modelos inflacionários onde o problema da singularidade inicial é resolvido.

Uma pergunta que pode ser colocada é a seguinte: se modelos com ricochete não precisam de inflação, já que neles não aparece nenhum dos problemas que a inflação vem resolver, qual a necessidade de se colocar essa fase a mais, complicando o modelo? A resposta é simples: uma fase de contração do Universo facilita a obtenção de condições iniciais para um período inflacionário na fase de expansão. Assim, se realmente existe na natureza esse campo capaz de gerar inflação no Universo, o inflaton, então a fase de contração anterior ao ricochete facilita a possibilidade do inflaton adquirir as condições apropriadas para produzir inflação depois do ricochete.

3 Comparação com as observações e com o Modelo Inflacionário

Os modelos com ricochete têm três características básicas em comum com os inflacionários que possibilitam sua adequação às observações: a ori-

gem das estruturas do Universo devida a flutuações quânticas de um vácuo quântico (o que implica numa distribuição de formato Gaussiano de amplitudes de flutuações, já que o vácuo quântico tem essa forma Gaussiana), a maior contribuição das flutuações da densidade total do Universo para a formação de estruturas do que as obtidas das flutuações relativas entre suas diversas componentes, e a possibilidade de se obter uma potência de flutuações que depende muito pouco das escalas de tamanho consideradas, pelo menos para aquelas escalas que contribuem para as pequenas diferenças de temperatura da RCF em grandes ângulos.

Por outro lado, as observações da RCF também indicam que a potência das flutuações geradoras de ondas gravitacionais primordiais produzidas nestes cenários deve ser pequena em relação à potência das flutuações que geram as perturbações de densidade de matéria. Esta observação eliminou vários modelos bastante conhecidos de inflação, como também eliminou diversos modelos clássicos de ricochete. Entretanto, modelos quânticos de ricochete podem resolver esse problema, já que efeitos quânticos podem amplificar as perturbações de densidade em relação às ondas gravitacionais primordiais. Aliás, se isso realmente aconteceu no nosso Universo, seria uma consequência mensurável de um efeito típico de Cosmologia Quântica [7], algo de extrema importância para a própria Física Quântica, já que seria a confirmação de que o Universo pode e deve ser investigado através da Teoria Quântica, algo que é contestado por alguns físicos.

Uma questão importante para os modelos com ricochete é o papel da energia escura (aquela que hoje domina a dinâmica do Universo, acelerando a sua expansão) nesses modelos. Essa não é uma questão para os modelos inflacionários, já que eles ocorrem em escalas de energia muito grandes, e a escala de energia da energia escura é muito pequena sendo, portanto, irrelevante. Entretanto, nos modelos de ricochete, na fase de contração em tempos remotos, o Universo é muito rarefeito, as escalas de energia são muito baixas, e a energia escura pode se tornar importante nessa fase. Se esse é o caso, a presença da energia escura afeta a evolução da escala de causalidade do universo nessas épocas, tornando-a praticamente constante. Sendo assim, as escalas espaciais das

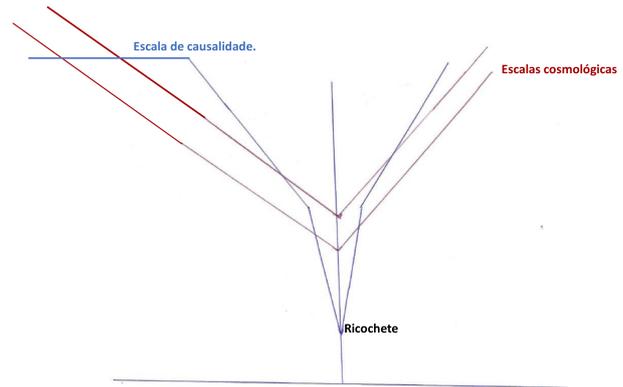


Figura 6: Efeito qualitativo da energia escura no passado remoto de modelos de ricochete. Quando ela domina a evolução do Universo, a escala de causalidade, em azul, fica quase constante, e as escalas cosmológicas, em roxo, ficam de novo maiores que ela, trazendo um problema para a implementação física de condições iniciais para as perturbações cosmológicas nessas escalas.

estruturas que hoje observamos se tornaram no passado, de novo, muito maiores que a escala do universo observável e, portanto, não poderiam ser explicadas por nenhuma física local, veja Figura 6. Esse problema é muito importante, mas é pouco considerado pelos cosmólogos que investigam modelos com ricochete, e nas poucas vezes em que ele é tratado, a resposta é equivocada. Em alguns dos nossos trabalhos, esse problema foi atacado de duas formas diferentes. Na primeira, também tratado na referência [7], exibimos um campo de matéria bastante simples que só se comporta como energia escura na fase de expansão, resolvendo o problema. Na segunda abordagem, mostramos como definir um estado de vácuo quântico apropriado para a situação descrita acima. São soluções viáveis, cujas consequências devem ser investigadas com mais profundidade.

Como comprovar os modelos de ricochete através das observações? Essa é uma questão difícil, já que existe uma quantidade imensa de modelos inflacionários diferentes, e uma grande variedade de observações diferentes que podem ser acomodadas em algum desses modelos. Isso permite até o questionamento sobre a relevância científica do paradigma inflacionário, já que ele pode ser acomodado a qualquer observação. Neste caso, devemos usar o argumento da simplicidade, a famosa navalha de Ockham, e rejeitar modelos muito complicados, com muitas hipóteses adicionais sem motivação bem fundamentada.

Nesta linha, vou então selecionar a classe de modelos inflacionários mais simples, contendo só um campo além do campo gravitacional, o ínflaton, que desce lentamente o seu potencial (vejam artigo sobre inflação neste mesmo número dos Cadernos de Astronomia). Este tipo de modelo, chamado de modelos de rolamento lento, prevê, entre outras coisas, que a distribuição das possíveis flutuações de densidade é Gaussiana, uma relação muito precisa entre a potência das flutuações de ondas gravitacionais de larga escala e das flutuações de densidade, e ausência de perturbações de natureza vetorial.

Modelos com ricochete podem apresentar pequenas diferenças em relação à distribuição Gaussiana mencionada acima, chamadas não gaussianidades, em diferentes escalas. De fato, uma classe de modelos de ricochete oriunda da CQL prevê não gaussianidades em grandes escalas (maiores que a escala do Universo observado hoje), que poderia inclusive resolver certas anomalias da RCF (propriedades da RCF que teriam pouca probabilidade de surgirem segundo uma distribuição Gaussiana). Estas não gaussianidades deveriam já estar registradas nas mais recentes observações da RCF. Isto foi procurado nos dados destas observações, mas nada foi encontrado, descartando esta classe de modelos. Este é um belo exemplo de confrontação real entre modelos de ricochete e as observações que, neste caso, descartaram essa classe de modelos. Caso o resultado fosse positivo, estes modelos de ricochete ganhariam uma grande visibilidade e importância, já que teriam previsto um efeito observável que os modelos mais simples de inflação não poderiam prever.

Os modelos de ricochete não estão sujeitos ao vínculo preciso obtido dos modelos simples de inflação entre a potência das flutuações de ondas gravitacionais de larga escala e das flutuações de densidade. De fato, existem modelos simples de ricochete onde este vínculo não é satisfeito. Entretanto, para efetivar essa confrontação, é preciso medir essas ondas gravitacionais primordiais de larga escala. Já se sabe que sua amplitude é pequena, mas há ainda uma janela de duas ordens de grandeza em futuras observações que permitem sua observação e, nesse caso, a confrontação direta entre modelos de ricochete e inflação. Para além dessa janela ainda aberta, não será mais

possível observar ondas gravitacionais primordiais de larga escala, e esta confrontação ficará inviável. A única esperança seria a observação de ondas gravitacionais primordiais em pequena escala, mas essas são bastante difíceis de medir devido à sua mistura com ondas gravitacionais de outras origens.

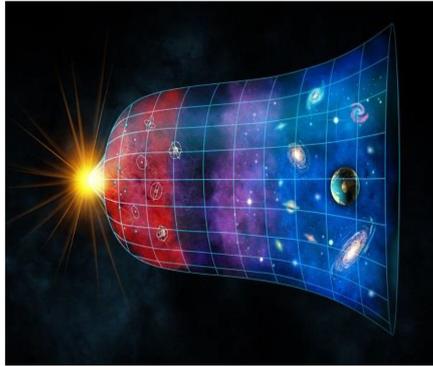
As flutuações de natureza vetorial podem ser produzidas com baixa potência (mas não nula, como nos modelos de rolamento lento) em modelos com ricochete, com efeitos nas observações da RCF, nas lentes gravitacionais, e na produção de campos magnéticos primordiais que seriam as sementes dos campos magnéticos hoje observados em escalas de galáxia e de aglomerados de galáxias. Essa é uma linha de investigação ainda pouco explorada.

Recentemente, com a detecção das ondas gravitacionais pelos observatórios Ligo nos EUA e Virgo na Itália desde 2016, constatou-se a existência de buracos negros muito massivos no Universo que não podem ser explicados facilmente pelo MPC com inflação. Entretanto, em modelos de ricochete com uma longa fase de contração lenta, tais buracos negros muito massivos podem ter evoluído de buracos negros primordiais formados perto do ricochete, que depois cresceram muito sugando a matéria ao seu redor. Essa hipótese tem sido bastante investigada recentemente, e pode se tornar um aspecto positivo dos modelos de ricochete.

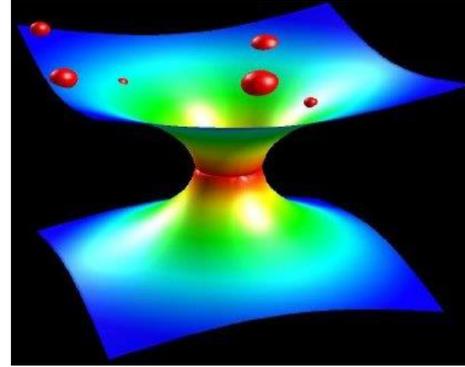
Finalizando, tanto para os modelos de ricochete como para os inflacionários, é preciso explicar como surge a matéria que nos forma (prótons, elétrons, fótons, etc). Na inflação isto se dá através do mecanismo de reaquecimento, onde o ínflaton se acopla com estes outros campos e cede sua energia a eles. Nos modelos de ricochete, isto provavelmente acontece no próprio ricochete, com a criação quântica destas partículas pelo campo gravitacional intenso ali presente, como tem sido demonstrado em várias publicações recentes.

4 Conclusão e perspectivas futuras

Por construção, modelos com ricochete resolvem um problema fundamental do Modelo Padrão Cosmológico (MPC), que é a existência de uma singularidade inicial, onde várias quantida-



O Universo teve um começo e inflou.
 → **qualidades:**
 i) Não é difícil construir um modelo físico para a inflação.
 ii) Inflação previu propriedades da RCF antes de serem observadas.
 → **lacunas:**
 i) O que é o inflaton?
 ii) O problema da singularidade não foi resolvido!



O Universo sempre existiu e teve um ricochete.
 → **qualidades:**
 i) Singularidade eliminada.
 ii) Os problemas cosmológicos dos modelos com início desaparecem.
 → **lacunas:**
 i) É complicado construir modelos com ricochete, efeitos quânticos talvez necessários.
 ii) Pode satisfazer as observações da RCF, mas são ajustes, não previsões.

Figura 7: Qualidades e lacunas dos modelos de ricochete e inflação.

des físicas ficam infinitas, e nenhuma Física é possível ali.

Esta não é a única solução possível para o problema da singularidade inicial. Há outras propostas onde o espaço-tempo clássico emerge de uma estrutura quântica complexa. Este tipo de modelo necessita de uma fase inflacionária subsequente para dar conta dos problemas citados na Seção 2. Entretanto, modelos com ricochete não necessitam de inflação, mas podem conter uma fase inflacionária, como descrito na Seção 3.

Uma comparação entre virtudes e incompletudes dos modelos com ricochete e inflacionários está sintetizada na Figura 7. Talvez a principal virtude dos modelos inflacionários tenha sido a previsão realizada por Viatcheslav Mukhanov (1956-) e Gennady Chibisov (1946-2008), com mais de duas décadas de antecedência, de que a potência de flutuações cosmológicas primordiais advindas da inflação deveria ser quase independente de suas escalas de tamanho, com uma pequena preferência por grandes escalas. Isto foi comprovado com muita precisão por diversas observações cosmológicas, e é propriedade quase geral de todos modelos inflacionários. Os modelos de ricochete podem acomodar esse fato, mas isto não é uma previsão, é um ajuste a poste-

riori. Como já dissemos, esse ajuste implica na imposição de que o campo material que domina a contração em largas escalas deva ter pressão quase nula (matéria escura?), mas o campo material que domina o universo em pequenas escalas, pode ser qualquer um. Já a grande virtude dos modelos de ricochete é resolver o problema da singularidade inicial.

Como perspectivas futuras, é muito importante a investigação da existência de não gaussianidades em modelos com ricochete, como também uma pesquisa mais aprofundada sobre os efeitos físicos da energia escura nesses modelos, e suas confrontações com as observações. Uma outra característica interessante de modelos de ricochete é a relevância que matéria e energia escuras podem ter para esses modelos. De fato, o período na fase de contração onde as condições iniciais desses modelos são colocadas deve ser fortemente afetado por essas duas componentes do setor escuro do Universo. Portanto, qualquer resultado importante sobre modelos de ricochete pode trazer mais informações sobre a natureza dessas duas componentes, e vice-versa.

Existe uma grande comunidade de cosmólogos e astrofísicos investigando modelos inflacionários, e alguns até o consideram como parte do MPC, e

uma pequena comunidade investigando modelos com ricochete, pelas razões expostas acima. Entretanto, modelos com ricochete são completos, não têm singularidade, além de poderem se adequar às mais recentes observações cosmológicas. Assim, podem ser entendidos tanto como complementos ao paradigma inflacionário, ou como alternativas a este. Há ainda muito a ser investigado para aprofundá-los, e estabelecer suas consequências mais detalhadas, por isso considero um tema da cosmologia que deve ser incentivado. Existem perspectivas observacionais para confirmar ou refutar esses modelos. Após um século da observação da expansão do Universo acho fascinante a ideia de que talvez tenhamos a possibilidade de descobrir que ele também teve uma fase contração.

Sobre o autor

Nelson Pinto Neto (nelsonpn@cbpf.br) trabalha na Coordenação de Cosmologia, Astrofísica e Interações Fundamentais do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, é Pesquisador 1B do CNPq, e é especialista em cosmologia primordial, modelos quânticos de ricochete, perturbações cosmológicas de origem quântica e suas consequências observacionais.

Referências

- [1] G. L. Murphy, *Big-bang model without singularities*, *Phys. Rev. D* **8**, 4231 (1973).
- [2] M. Novello e J. M. Salim, *Nonlinear photons in the universe*, *Phys. Rev. D* **20**, 377 (1979).
- [3] V. N. Melnikov e S. V. Orlov, *Nonsingular cosmology as a quantum vacuum effect*, *Phys. Lett. A* **70**, 263 (1979).
- [4] R. C. Tolman, *On the theoretical Requirements for a Periodic Behaviour of the Universe*, *Phys. Rev.* **38**, 1758 (1931).
- [5] J. A. de Barros, N. P. Neto e M. A. S. Leal, *The causal interpretation of dust and radiation fluid non-singular quantum cosmologies*, *Phys. Lett. A* **241**, 229 (1998). [ArXiv:gr-qc/9710084](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9710084).
- [6] A. Ijjas e P. J. Steinhardt, *Bouncing Cosmology made simple*, *Class. Quantum Grav.* **35**, 135004 (2018). [ArXiv:1803.01961](https://arxiv.org/abs/1803.01961).
- [7] A. P. Bacalhau, N. Pinto-Neto e S. D. P. Viteni, *Consistent scalar and tensor perturbation power spectra in single fluid matter bounce with dark energy era*, *Phys. Rev. D* **97**, 083517 (2018). [ArXiv:1706.08830](https://arxiv.org/abs/1706.08830).