

Conversando com Einstein: as origens da Relatividade Geral e a constante cosmológica - Parte 1



.....
Alexandre Medeiros

Departamento de Física, Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Recife,
PE, Brasil

E-mail: alexmed.df@gmail.com
.....

Recebo uma mensagem do Nelson Studart, já tarde da noite, me pedindo para que eu faça uma daquelas minhas entrevistas construídas, desta vez com o Einstein, sobre a Relatividade Geral e as Ondas Gravitacionais recentemente detectadas em setembro de 2015. Mas, logo agora eu queria dar um passeio até a praia de Galinhos, no Rio Grande do Norte. Assim, eu vou dormir pensando na tal entrevista e sonhando com a Praia de Galinhos.

De repente percebo como o Sol já está brilhando no horizonte, lá na praia, e me sento em um barzinho de onde posso ver, ao longe, o farol vermelho e branco de Galinhos. Meus amigos físicos foram pedir uma água de coco ao garçom, lá no balcão. Neste momento, um senhor de cabelos brancos se aproxima de mim e me pergunta onde se pode conseguir uma daquelas charretes de burro que levam até ao farol. Eu, ainda preocupado com a escrita da tal entrevista respondo reflexivamente, olhando para dentro do bar e sem olhar direito para o seu rosto.

- É lá no porto; junto ao rio! Se quiser pode sentar aqui que daqui a pouco passa uma delas.

- Obrigado! Vou aceitar.

Eu me viro e tomo um susto. O sujeito é a cara do Einstein. O mesmo que eu entrevistei alguns anos atrás em Campina Grande para um artigo na FnE.

- Não pode ser! Que sorte, a minha! É o senhor, mesmo?

- Claro! Não está me vendo?

- É que o senhor sumiu de repente, sem dar uma palavra, naquele dia lá em Campina Grande.

- Pois, sou eu, mesmo! Gostei do forró lá de Campina Grande e resolvi vir conhecer também essa praia quase deserta de Galinhos sobre a qual me falaram lá na Paraíba.

- Nem sei o que lhe dizer; Herr Einstein. O senhor apareceu na hora certa.

Eu preciso escrever uma entrevista com o senhor sobre as ONDAS GRAVITACIONAIS.

- Bem! Essa é uma longa história. Por onde quer que eu comece?

- Pelo início, se for possível.

Neste momento chegam os meus amigos e um deles, o físico francês Charles Robert, toma um susto ao ver o velho Albert sentado ao meu lado e deixa o seu copo cair ao chão. Os outros também ficam mudos de surpresa e espanto ao verem o velhinho ali.

Para quebrar o gelo, eu os apresento ao velho Albert.

- Calma; amigos! Não me perguntem como isso pode ser possível. Apenas curtam a presença aqui do nosso amigo Herr Einstein e relaxem. Deixem-me apresentá-los a ele. Herr Einstein, estes são meus amigos que certamente vão querer me ajudar nessa conversa com o senhor sobre as Ondas Gravitacionais. Este que deixou cair o copo é o físico experimental francês Charles Robert Des Saints, nascido na pequena cidade de Sable Blanc. Ele conhece bem a sua biografia e a sua obra e até já escreveu um livro sobre o senhor.

- Muito prazer, Monsieu Des Saints. Foi o senhor quem escreveu aquele livro sobre minha visão da Educação?

Charles Robert, ainda espantado; responde de modo entrecortado ao velho Albert:

- Não, Herr Einstein! Eu escrevi um livro criticando alguns detratores que o acusavam de plágio. Quem escreveu sobre sua visão de Educação foi justamente o Alexandre.

- Herr Einstein, digo eu tomando novamente a palavra; este aqui é o meu amigo, o físico camaronês, Dr. Cyrano Bahr Etto. Ele é um especialista em cristais; mas há muito tempo vem trabalhando com o ensino da Física. E esta é sua estudante, a senhora Calina que ensina Física em escolas em Cabaceiras, no

Apresentamos neste texto, de uma forma leve e introdutória, a complexa questão das origens históricas da Teoria da Relatividade Geral de um modo pretensamente divertido como uma entrevista fictícia com Albert Einstein. Neste contexto discutimos o conceito da constante cosmológica e preparamos o terreno para que em um artigo seguinte, a ser publicado na próxima edição da revista FnE como uma sequência desta conversa construída; possamos enveredar pela discussão do tema das ondas gravitacionais, desde a sua histórica concepção até a sua recente detecção observacional.

sertão da Paraíba.

Herr Einstein cumprimenta os dois com um sorriso educado.

- Prazer, Monsieur Bahr Etto. Enchanté, madame Calina.

- E estes outros dois são meus amigos, o geofísico holandês Gil Van Borbha. Ele trabalha com Plasmas e é um estudioso da Ionosfera; além de ser um apaixonado por foguetes e pela História da Física. Ele diz que é descendente do Conde Maurício de Nassau, aquele mesmo que passou em Olinda e morou em Recife no século XVII. E este é o físico cubano Carlos Reys que trabalhou com Espectroscopia Raman e que há muito tempo trabalha também com o Ensino da Física.

- Muito prazer, Mr. Van Borbha; muito prazer Dom Carlos.

Vejo que os amigos ainda estão meio sem jeito com aquela surpresa e os convidado a se sentarem para conversarmos com o velho Albert.

- Vejam, amigos, eu havia dito a Herr Einstein que preciso fazer uma entrevista com ele sobre as Ondas Gravitacionais e vocês poderiam me ajudar nessa conversa.

Claro! Dizem todos quase ao mesmo tempo.

- Quem quer começar?

Calina toma logo a palavra e pergunta:

- Como nasceu essa ideia de Ondas Gravitacionais, Herr Einstein? O que é que ela tem a ver com a Relatividade? Ou não tem nada a ver?

O velho Albert sorri amistosamente e se dirige a Calina:

- Como a senhora sabe; madame Calina.

- Pode me chamar de Cacá.

- Pois bem, madame Cacá; você deve saber que eu já havia escrito a minha Teoria da Relatividade Restrita desde 1905. Naquela época, em 1905, eu estava preocupado com questões ligadas à simultaneidade de eventos e ao conflito entre a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo. Aquela coisa de que as Equações do Eletromagnetismo mudavam os seus formatos matemáticos mediante as clássicas Transformações de Coordenadas de Galileu.

- Isso nós sabemos, meu caro senhor Albert; diz o Gil Van Borbha. As equações do Eletromagnetismo não pareciam ser covariantes mediante aquelas transformações e sim mediante as recentes transformações de Lorentz; mas aquelas transformações de Lorentz estavam ligadas à sua recente Teoria do Elétron.

- Isso, Mr. Van Bohrba! Eu apresentei uma nova e revolucionária heurística para chegar às mesmas transformações de coordenadas do Lorentz. Construí uma

Teoria de Princípios e baseado neles eu não apenas obtive as tais transformações do Lorentz; mas, sobretudo mostrei que elas faziam parte de uma nova visão de mundo que revolucionava os nossos conceitos intuitivos de TEMPO e ESPAÇO.

Preocupado com o rumo da nossa conversa, que temo ficar muito longo, começando pela Relatividade Restrita, eu interrompo a mesma; tentando redirecioná-la.

- Eu gostaria muito de conversar sobre isso com o senhor, meu caro Herr Einstein; afinal o nascimento da Teoria da Relatividade Restrita é um tema interessantíssimo; mas, no momento, a minha preocupação é com as Ondas Gravitacionais que são uma coisa bem posterior na obra do Einstein.

O velho Albert parece não apreciar muito a minha súbita interrupção e me corrige com certa ironia:

- Na minha obra, você quer dizer.

Eu dou um sorriso e topo entrar na brincadeira do velhinho.

- OK! Na sua Teoria, Herr Einstein! Então, por favor, conte como isso aconteceu.

- Pois, bem! A Relatividade Restrita, como eu estava falando, apesar de ter sido realmente revolucionária e de haver alterado os nossos conceitos clássicos de tempo e de espaço, ainda tinha uma clara limitação. Ela não considerava a aceleração dos corpos. E para dar conta disso; para ampliar a Relatividade e incorporar nela a aceleração, eu passei aproximadamente dez longos anos, até o final de 1915.

- Nós sabemos disso, Herr Einstein; diz o Charles Robert, também tentando abreviar o relato inicial! No final de 1915 o senhor finalmente apresentou ao mundo a sua Teoria da Relatividade Geral que era, na verdade, uma nova Gravitação ou uma Geometria do Espaço-Tempo.

- Isso! Foi isso mesmo que eu fiz, Monsieur Des Saints.

Eu dou um sorriso e continuo dando corda para que o velhinho chegue logo ao ponto:

- OK, Herr Einstein! Mas, e as Ondas Gravitacionais? Como e quando elas entraram em cena?

Nosso amigo cubano Carlos Reys se apressa e responde antes que o velho Albert possa dizer alguma coisa e mudar o rumo de sua prosa:

- O Einstein publicou a sua Teoria da Relatividade Geral em 1915 e já no ano seguinte de 1916 fez a previsão da existência das Ondas Gravitacionais. Agora essa previsão completa 100 anos.

Albert dá um sorriso de aprovação e diz:

- Isso mesmo, Dom Carlos!

Meu amigo camaronês, Cyrano Bahr Etto entra em cena tentando organizar a narrativa do velho Albert.

- No que diz respeito ao problema do ensino desse assunto, se nós pensarmos em uma abordagem histórica, pelo que eu entendi; acho que seria interessante se separar um histórico de como a ideia das Ondas Gravitacionais surgiu e também algo a ser dito sobre o seu significado e finalmente falar também sobre a possibilidade de uma detecção das mesmas, que é o que se conseguiu recentemente. Seria possível tomar um caminho assim, Herr Einstein?

- Pois, não Monsieur Bahr Etto! Façamos isso! Vamos seguir sua sugestão. Primeiro, eu vou falar de como surgiu a ideia das Ondas Gravitacionais, no contexto de minha Teoria da Relatividade Geral para só depois falarmos em suas consequências teóricas e nas tentativas de testar a referida teoria. Isso nos conduzirá, ao final, a discutir esse experimento recente realizado em setembro de 2015 pela equipe do LIGO e anunciado, com alarde, apenas em fevereiro de 2016.

- Obrigado, Herr Einstein; por favor, prossiga sua narrativa!

- Bem, como disse Dom Carlos; no final de 1915 eu publiquei minha Teoria da Relatividade Geral e com ela expliquei a Gravidade como sendo uma consequência da curvatura do espaço-tempo pela massa e energia. Assim, eu pude reconstruir a antiga ideia de Gravidade e resolver alguns problemas que a Teoria Clássica da Gravitação de Newton não conseguia resolver. Desde então, ela passou em dezenas de testes observacionais e experimentais aos quais foi submetida.

- Mas, e as Ondas Gravitacionais; como é que elas apareceram nesse contexto? Arremata Calina.

- Bem, madame Cacá; é que a Teoria estabelecia que objetos maciços curvam o tecido do espaço-tempo; e estas curvaturas se propagam como uma forma de vibrações gravitacionais como se fossem verdadeiras ondas ou uma nova espécie de radiação.

- Mas, como elas são geradas?

- Simplificadamente, imagine uma analogia com o caso eletromagnético que é mais conhecido. Note que, como eu disse, a atração gravitacional observada entre duas massas é concebida na Relatividade Geral como sendo o resultado da curvatura do espaço-tempo por estas mesmas massas. No caso eletromagnético, as cargas aceleradas emitem uma radiação eletromagnética que se propaga na forma de uma onda eletromagnética;

na Relatividade Geral, por analogia, as oscilações das massas criam ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz no espaço-tempo de Minkowsky. Mas, a coisa, na verdade, não é assim tão simples como possa parecer, pois enquanto no caso eletromagnético há um momento de dipolo; na Relatividade Geral há a necessidade de um momento de quadrupolo mais complexo.

- O que isso significa em termos mais simples, Herr Einstein?

- Significa que enquanto as fontes das ondas eletromagnéticas são vistas classicamente como dipolos oscilantes, como em uma antena; as fontes das ondas gravitacionais são objetos mais complexos, como halteres em rotação, o que na prática pode ser concebido como, por exemplo, um sistema de estrelas binárias ou como dois buracos negros espiralando em torno de um centro de massa comum, um em direção ao outro.

Nosso amigo cubano Carlos Reys, entra mais uma vez na conversa preocupado com a questão pedagógica de se explicar algo assim tão complexo:

- O que me preocupa, Herr Einstein é como levar isso para a sala de aula. Como fazer a “transposição didática” dessa sua bela metáfora de forma que os nossos alunos possam compreender.

- Realmente, não é algo simples, Dom Carlos; principalmente se o estudante não percebe a razão de ser do momento quadrupolar. Mas, de toda forma, a ideia de que na Teoria da Relatividade Geral a gravidade é tratada como sendo um fenômeno resultante da curvatura do espaço-tempo me parece algo mais palpável. E a ideia de que essa mesma curvatura é causada pela presença da massa também me parece mais palatável do que se falar logo no momento quadrupolar associado à massa. Geralmente, quanto mais massa está contida em um dado volume de espaço, maior será a curvatura do espaço-tempo no limite do seu volume. Assim, quando os objetos com grande massa se movimentam aceleradamente no espaço-tempo, as curvaturas introduzidas pelos mesmos mudam de modo a refletirem as localizações alteradas desses mesmos objetos. De certo modo, objetos acelerando geram mudanças nessa curvatura, que se propagam com a velocidade da luz na forma de uma onda. São esses fenômenos de propagação o que denominamos como ondas gravitacionais.

- Eu entendo a questão pedagógica que o Carlos levanta; Herr Einstein – diz o nosso amigo holandês, o Van Borbha – como dividida em dois pontos: um deles é a dificuldade de se compreender o que o

senhor quer dizer quando fala em “curvatura do espaço-tempo”; ou mesmo simplificando a linguagem utilizada em “curvatura do espaço”. Porque o estudante não percebe facilmente o espaço como sendo algo que se possa curvar, como se ele fosse, por exemplo, uma folha de papel. Esse é um primeiro ponto. O espaço, na visão tradicional, penso eu, é visto mais de forma cartesiana, como sendo um mero repositório inalterável de coisas. Algo como um baú onde se joga as coisas lá dentro. E o segundo ponto me parece ser a dificuldade de se compreender a necessidade, mais técnica, da introdução do momento de quadrupolo. Talvez, essa segunda dificuldade pudesse ser suavizada se a narrativa do conteúdo fosse feita em uma perspectiva histórica que mostrasse a necessidade de aparecimento do mesmo. O que o senhor acha disso?

O velho Albert fica alguns instantes em silêncio refletindo e finalmente responde, lentamente, à colocação de Van Borbha:

- Sua observação é muito pertinente, meu caro Mr. Van Borbha. No tocante à questão do quadrupolo é realmente necessário se entrar em alguns detalhes matemáticos mínimos para se perceber a sua necessidade; mas, eu concordo que sua compreensão ficaria suavizada se esta necessidade fosse colocada em uma perspectiva histórica e também metafórica como tentei fazer momentos atrás. Entretanto, foram vocês mesmo que me pediram para apressar o passo para que eu chegasse logo nas Ondas Gravitacionais. Talvez nós possamos retroceder um pouco e contar como eu desenvolvi a Teoria da Relatividade Geral e de onde nasceu essa necessidade. Risos...

Ele diz isso e olha para mim com um fino olhar irônico e eu me sinto envergonhado de ter tentado, inadvertidamente, apressar a sua narrativa histórica. Ele vai ter de contar um pouco mais sobre como essa coisa surgiu e eu vou tentar explicar isso ao Nelson se a entrevista ficar muito longa. De todo modo, o velho Albert continua sua resposta ao Van Borbha:

- No tocante à sua outra observação de não ser algo trivial se compreender o significado da expressão “curvar o espaço”, eu também estou de pleno acordo. Vamos tentar refletir logo sobre uma possível “transposição didática”, para usar essa feliz expressão de origem francesa utilizada por Dom Carlos Reys.

Nosso amigo cubano dá um sorriso de felicidade ao ser mencionado desse modo tão gentil pelo velho Albert, enquanto este prossegue a sua explicação.

- Na Física Newtoniana, você imagina

um corpo, uma estrela, por exemplo, e diz que ela exerce diretamente uma força sobre outro corpo celeste; um planeta em movimento, por exemplo. E a força exercida pela dita estrela faz com que a trajetória deste corpo se curve. Uma forma equivalente de você descrever a situação, porém mais geral e que se aplica até mesmo para a luz, é afirmar que a estrela curva o espaço. E ela curva o mesmo mais acentuadamente quanto maior for a sua massa e mais perto o corpo estiver dela.

Calina parece não se satisfazer com a explicação dada e insiste nesse mesmo ponto.

- Mas, Herr Einstein; curva como se a gente não consegue ver o espaço se curvar? Como a gente sabe que ele está curvo?

Os olhos do velho Albert brilham ao ouvir aquela observação.

- Ótima observação! Parabéns! Como a gente sabe que ele está curvo? Veja! Se o espaço que você considera é uma folha de papel; você poderia imaginar uma formiga se movimentando na mesma em linha reta; certo?

- Certo!

- Se, agora, você curvasse, no sentido clássico que você está acostumada, de ver a folha mudar de forma, de tal modo que a trajetória da formiga, agora, se tornasse uma curva, o que estaria diferente?

- A folha agora estaria visivelmente curva.

- Certo! Ela estaria visivelmente curva; mas tente descrever essa curvatura da folha de papel que você está vendo sem falar nessa visão. O que teria mudado na folha, que é o seu espaço, quando você a dobrou?

-Como, assim?

- Pense no que ocorreu com a trajetória da formiga.

- Ficou curva também. O que era uma reta virou uma curva.

- Isso! – Diz o velho Albert sorrindo, embora, no caso específico da folha de papel seja possível curvar a mesma e a formiga ainda continuar a se mover sobre a aresta da possível dobra que tivéssemos introduzido na mesma e que poderia ainda poder ser uma reta; mas, imagine, agora, que você transformasse sua folha em uma esfera.

- E pode?

- Ótima observação, madame Cacá! Imagine que sua folha é feita de borracha ou de massa plástica. Ela pode esticar; pode dobrar; ela é perfeitamente deformável. Pense, agora, na esfera que era uma folha plana. Agora faça a sua formiga caminhar em linha reta.

- Em cima da esfera, Herr Einstein? Não pode!

- Isso! Muito bem! Não pode mais! Mas, antes da deformação introduzida podia. Então quer dizer que ao “curvar o seu espaço” deste modo você introduziu neste seu espaço uma proibição ou uma restrição de certo tipo de trajetória. Agora, ele não pode mais conter retas. Você introduziu nele uma restrição de caminho; causou uma modificação típica das que se consegue fazer em folhas de borracha e que se chama matematicamente de uma modificação topológica e não apenas puramente geométrica em seu sentido clássico.

- Puxa! Que legal! Saquei!

- Sacou o que, madame Cacá? – Diz o velho Albert sorrindo.

- Saquei que a gente pode descrever a curvatura da folha de borracha sem falar na sua forma visual; mas se referindo à reta que não se pode mais traçar na mesma; que agora está proibida por essa tal de modificação topológica.

- Isso! E se você tem um feixe de luz se propagando no espaço, como é a trajetória dele?

- Em linha reta, claro!

- Você está fazendo um pressuposto sobre o espaço sem sentir. Qual?

- Eu estou imaginando apenas que a luz se move sempre em linha reta e isso não se pode mudar.

- Será que não? Se um raio de luz vindo de uma estrela distante chegar até aos nossos olhos e nós percebermos a configuração da referida estrela em relação a outras estrelas no Céu e em determinado momento a posição de nosso planeta for tal que a luz proveniente da mesma estrela passe perto de outra estrela; será que isso mudaria a posição que vemos aquela primeira estrela?

- Acho que não! A luz vem sempre em linha reta. Se ela mudasse de posição seria como o caso da formiga. Mas, não pode.

- Como é que você sabe que não pode? Já fez uma observação desse tipo?

- Não! Mas, isso é algo intuitivo!

- Pois, esse tipo de observação cuidadosa ele já foi feita e é preciso termos mais cuidado com as nossas intuições; afinal elas englobam parte de nossos preconceitos, de nossa própria formação cultural. Nossas percepções aparentemente mais óbvias não estão livres dessas influências. Meu colega na Universidade de Berlim, o psicólogo alemão Max Wertheimer conversava muito comigo sobre essas coisas estranhas da mente humana e ele até elaborou, inspirado parcialmente nessas nossas conversas, uma Psicologia baseada nessas coisas: a Teoria da Gestalt. Imagine; apenas imagine,

madame Cacá, que durante um Eclipse nós observássemos algo assim; observássemos que a estrela tivesse mudado de posição; como poderíamos explicar isso?

- O raio de luz que vem da segunda estrela teria sido puxado de lado.

- Mas, aplicar a lei da Gravitação Universal Newtoniana a um releu fóton de luz, ao meu querido “lichtquanta”, é algo bastante problemático. Que outra explicação você poderia dar se agora a trajetória mudasse?

- Saquei! Ao falar que a trajetória da luz mudou, nós podemos dizer que foi o espaço onde ela se move que se curvou.

- Isso!

- Mas, Herr Einstein, quem curvou a trajetória da luz? A estrela próxima da qual a luz vinda da outra passou?

- Sim! A estrela é um objeto cósmico com uma massa enorme e isso é determinante para que ela consiga curvar perceptivelmente o espaço ao seu redor ou, dizendo de outro modo, seja capaz de introduzir restrições topológicas perceptíveis no mesmo, o que é fundamentalmente outra forma de se interpretar o próprio conceito de Campo.

- Entendi! Mas, como se pode relacionar de uma forma simples a massa da estrela com a curvatura que desvia a luz?

- Vou usar uma metáfora criada pelo John Archibald Wheeler que foi o orientador de doutorado do Richard Feynman: “A matéria diz ao espaço como se curvar e o espaço diz à matéria como se mover”. Você ainda pode refinar essa frase e trocar a palavra espaço por espaço-tempo; mas para o efeito do que você me perguntou isso já basta. Risos ...

- Puxa, Herr Einstein! Isso é complicado; mas é também muito bonito! Eu acho que já estou percebendo que essa coisa já não me parece mais um completo absurdo. Valeu!

Neste momento, após essa longa conversa do velho Albert com a Calina, o nosso amigo holandês Van Borbha relembra o velho Albert de sua outra colocação anterior.

- Muito interessante essa sua “transposição didática”, Herr Einstein; mas e quanto ao percurso histórico evolutivo que lhe levou a essas concepções e que o senhor mesmo falou que poderia servir para esclarecer a questão matemática do momento quadrupolar no caso das ondas gravitacionais? Como o senhor chegou a elas?

- Ótima pergunta, Van Borbha; emenda o nosso amigo Charles Robert Des Saints.

- Pois bem, meus caros Mr. Van Borbha e Monsieur Des Saints! Vamos retro-

ceder um pouco na história para ver como eu cheguei até essa questão das Ondas Gravitacionais. Não é um relato linear; mas, sim cheio de idas e vindas, de mudanças de direção interpretativa. Percebam logo que da explicação metafórica que eu dei à madame Cacá sobre as mudanças topológicas depreende-se que eu precisei usar não exatamente a Geometria Clássica, mas sim a Geometria Diferencial e o Cálculo Tensorial para lidar com os problemas confrontados.

- Mas, como foi, resumidamente, essa história? – Pergunta; já inquieto, o nosso amigo camaronês Cyrano Bahr Etto.

- Bem, Monsieur Bahr Etto; como vocês todos sabem, a gravidade tem sido um grande mistério desde a Antiguidade.

Ao ouvir Herr Einstein falar na palavra “Antiguidade” eu penso logo: “estou frito!”. Essa conversa do nosso bom velhinho vai ficar muito longa e a entrevista não vai ser publicada. Mas, o que fazer se ele já não gostou de minha primeira tentativa de apressar o passo de sua narrativa? E, agora, com essa de explicar a origem de sua Relatividade Geral para só então continuar sua narrativa sobre as Ondas Gravitacionais é que a vaca vai para o brejo.

Enquanto penso isso, o velho Albert prossegue a sua atraente narrativa histórica.

- A gravidade é algo invisível e que foi relacionada, originalmente e de forma misteriosa, à queda dos corpos.

Calina emenda a observação:

- E como era vista a força gravitacional na Antiguidade?

- Na verdade, madame Cacá – diz o velho Albert – nem como uma “força” ela era exatamente vista na Antiguidade; mas, sim como uma propriedade intrínseca dos corpos. Para Aristóteles, por exemplo, os corpos que caíam em direção à Terra, os ditos “graves”, assim o faziam segundo um movimento tido como sendo “natural” e para o qual não se fazia necessário invocar algo externo como uma “força” ou “vis”, como nos movimentos de lançamentos de projéteis que eram ditos “forçados”. O corpo caía para, segundo Aristóteles, “realizar” aquilo que já possuía em “potência” buscando o seu “estado natural” em seu “lugar natural”. O “peso” era visto, nesse contexto aristotélico, como sendo uma “propriedade inerente” do objeto e não como o resultado de uma ação externa e exercida sobre o mesmo. Trata-se de uma perspectiva histórica e cultural completamente diversa da visão galileiana e newtoniana; de outra “visão de mundo”. A Física aristotélica era uma Física teleológica, ou seja, que estava baseada nas

busca de “causas finais”. Mas, deixemos de lado esse antigo capítulo da história da Física e seus conceitos de há muito já abandonados e vejamos como a coisa passou a ser vista nos tempos mais recentes de Galileu e Newton.

Eu fico aliviado em ouvir o Albert dizer aquilo, apesar de eu certamente estar curtindo aquelas suas digressões histórico-culturais sobre a formação de nossos conceitos mais básicos, pois já estava com medo que ele se demorasse demais nessas questões fundamentais mais antigas e a sua entrevista se tornasse inviável de ser publicada por se tornar muito longa.

- No final do século XVI e início do século XVII – prossegue o Albert – Galileu inaugura uma nova atitude realista e experimental diante da interpretação da Natureza, ainda que baseada nas contribuições de muitos outros pensadores mais antigos, como Platão e Arquimedes. De Platão ele captura a valorização da Matemática na representação da realidade e de Arquimedes ele se apodera do recurso, agora abertamente assumido, ao experimento; seja ele real ou “em pensamento” como os que eu mesmo sempre gostei de desenvolver.

- O que o senhor diria que Galileu trouxe de novo, no tocante à abordagem da gravidade? – arremata Cyrano.

- Eu diria, Monsieur Bahr Etto, que Galileu descobriu que um objeto pesado, assim como um objeto leve; caem na verdade em “queda livre” com a mesma “aceleração” atingindo a mesma velocidade em um “vácuo” idealmente construído e que isso lhe revela que a gravidade não pode ser algo meramente “intrínseco” ao corpo dito “grave”, como supunha Aristóteles; mas, que deve estar também relacionado a algo exterior ao mesmo. E serve muito bem para ele se introduzir no estudo posterior das quedas em meios resistivos mais complexos. Isso lhe permite também “matematizar” esta situação para além de seu “experimento em pensamento” e lhe leva também a realizar experimentos reais com pêndulos e com planos inclinados.

- Sim, observa nosso amigo holandês Van Borbha; mas, essa gravidade invisível de que o senhor fala, agia de forma misteriosa, mesmo para Newton. De forma, digamos um tanto fantasmagórica, sinistra, pois parece se manifestar através do espaço para alcançar os objetos por uma enigmática “ação à distância” sem que nenhum óbvio mecanismo justificasse essa propriedade. É certo para todos que aquilo que sobe tem de descer, mas exatamente “porque” isso nunca pareceu óbvio.

- Exatamente, meu caro Mr. Van Borbha! E essa angustiante questão epistemológica da falta de explicação para essa “ação à distância” serviu de crítica ao Newton por parte do bispo Berkeley. O Bentley foi em auxílio do Newton respondendo que a gravidade era uma propriedade da Natureza; mas o próprio Newton não assumiu esta resposta do Bentley e preferiu dizer cautelosamente que “não sabia a resposta”. Mas, na verdade, para ele o tempo fluía de forma contínua e o espaço era isotrópico e visto mesmo como sendo o “sensório de Deus”. Desde a década de 1930 se descobriu que existem quatro forças fundamentais na Natureza: a gravitacional, a eletromagnética, a nuclear forte e a nuclear fraca e que a força gravitacional é a mais débil das quatro, ainda que seja ela talvez a mais importante das quatro por sua vasta atuação cósmica e que de certo modo deu forma ao Universo. Mas, notem que na época em que eu elaborei a Teoria da Relatividade Geral, na segunda década do século XX, apenas as forças gravitacional e eletromagnética eram conhecidas.

- E como isso se deu Herr Einstein? – Digo eu, tentando disfarçadamente apressar o passo de sua interessante, porém longa narrativa histórica. Ele, entretanto, parece não ligar muito para o meu esforço de apressar sua narrativa e ainda complementa:

- Antes de falar sobre como surgiu a minha Teoria da Relatividade Geral, notem que antes do advento da mesma, a Lei da Gravitação Universal de Newton tinha sido aceita por mais de duzentos anos como uma descrição válida e coerente da força gravitacional entre as massas, embora o próprio Newton não tenha considerado sua teoria como a palavra final sobre a natureza da gravidade. Dentro de um século desde a formulação da Teoria Gravitacional de Newton, observações astronômicas cuidadosas revelaram variações inexplicáveis entre sua teoria e as tais observações. No modelo de Newton, a gravidade era o resultado de uma força de atração entre objetos maciços. Embora, como eu já disse, até mesmo o próprio Newton tenha se mostrado incomodado com a natureza desconhecida e enigmática dessa força gravitacional, a estrutura matemática básica descritiva da atuação da mesma por ele elaborada foi extremamente bem sucedida em descrever o movimento em geral. Dentre as coisas inexplicáveis, entretanto, segundo a Teoria Newtoniana, estavam as anomalias observadas nas órbitas de Mercúrio e de outros planetas e que só teriam uma explicação plausível após o advento de minha própria

Teoria da Relatividade Geral ou da Gravitação.

- Herr Einstein, por favor, desenvolva um pouco mais os seus comentários sobre essas limitações explicativas da Teoria de Newton em comparação com suas evidentes e reconhecidas potencialidades em relação à sua nova Teoria da Relatividade Geral – pede o Carlos Reys.

- Ótima lembrança, Dom Carlos! Não podemos apenas criticar as limitações da Teoria Newtoniana; mas é conveniente mostrar como mesmo suas potencialidades quando devidamente exploradas conduziram a alguns importantes impasses, como eu já me referi antes. Para falar um pouco mais de tais limitações e potencialidades, eu gostaria de lembrar que o conceito de Buraco Negro, nasceu como uma consequência direta de minha Teoria da Relatividade Geral; mas que já havia sido antecipado, ainda que de forma paradoxal, no contexto da Teoria Newtoniana.

- Como assim? – Indaga Cyrano – Não entendi!

- É que no final dos anos 1700, Monsieur Bahr Etto, o professor britânico John Michell e o astrônomo e matemático francês Pierre-Simon Laplace apresentaram a arrojada ideia daquilo que Laplace chamou de “corpos escuros” e que se aproxima muito do moderno conceito de “Buracos Negros”. Usando conceitos de luz e de gravidade retirados da Teoria de Newton, eles argumentaram que a força gravitacional de uma estrela maciça poderia ser suficientemente grande a ponto de impedir que a luz escapasse da mesma. Infelizmente, porém, a Teoria de Newton não poderia descrever o que acontece quando a gravidade cresce de modo tão exagerado. Esse entendimento só viria a partir do desenvolvimento de minha Teoria da Relatividade Geral na segunda década do Século XX e que trata a gravidade, como eu já mencionei anteriormente em nossa conversa, como sendo uma distorção do espaço-tempo e que permite que os físicos possam descrever os buracos negros em detalhes surpreendentes.

- E que outras potencialidades ou previsões de sua Teoria da Relatividade Geral o senhor destacaria? – Pergunta o nosso amigo camaronês.

- A Teoria da Relatividade Geral prevê vários novos efeitos da gravidade, Monsieur Bahr Etto; tais como as já mencionadas Ondas Gravitacionais, as Lentes Gravitacionais e um surpreendente efeito da gravidade sobre o tempo que é conhecido como “dilatação gravitacional do tempo” e que foi bem explorado pelo físico americano Kip Thorne no recente filme

Interstellar. Muitas destas previsões já foram confirmadas pela experiência observacional, enquanto outras são ainda objetos de intensas investigações ainda em curso...

Calina não se contém e observa:

- Mas, o senhor não morreu em 1955? Como é que sabe sobre esse filme recente?

- Madame Cacá, mais absurdo do que ter assistido esse filme recente é eu estar aqui, agora mesmo, conversando com vocês, não acha? Risos ...

Todos dão um riso sem graça misturado com a mesma sensação de estarem simultaneamente curtindo a conversa sem conseguirem compreender direito como ela possa estar ocorrendo; mas preferem dar sequência à mesma sem questionar esse ponto paradoxal.

- E como o senhor definiria as potencialidades explicativas atuais da Relatividade Geral? - Emenda o nosso amigo francês Charles Robert.

- A Relatividade Geral, Monsieur Des Saints; tornou-se uma ferramenta essencial na Astrofísica moderna. Ela fornece a base para a compreensão atual dos Buracos Negros, essas regiões do espaço onde a atração gravitacional é tão forte que aparentemente nem mesmo a luz poderia escapar, embora haja controvérsias quanto aos limites rigorosos dessa questão que foram levantadas pelo Stephen Hawking ao introduzir mais recentemente a sua frutífera ideia da radiação emitida pelos Buracos Negros que agora leva o seu nome e que em última instância os faz "evaporar". Sem adentrar mais profundamente nesse debate mais recente, certo é que a sua forte gravidade é pensada também como sendo a responsável pela intensa radiação emitida por certos tipos de objetos astronômicos enigmáticos como os núcleos galácticos ativos e os quasares. A Relatividade Geral é também parte fundamental do quadro do Modelo Padrão do Big Bang da Moderna Cosmologia. Uma teoria em Física não tem valor científico se não é capaz de fazer previsões específicas que possam ser testadas em laboratórios ou em observatórios astronômicos. Neste aspecto, a Teoria da Relatividade Geral brilha de forma espetacular.

- É interessante notar, Herr Einstein - diz Van Borbha - que, infelizmente, muitos leigos e até mesmo alguns estudantes e professores de Física têm uma ideia equivocada de que a Relatividade Geral é algo meramente abstrato e sem conexão direta com a realidade; quase uma inutilidade matemática; talvez em face de sua evidente complexidade.

- De fato, Mr. Van Borbha! - Diz o velho Albert - Uma lista completa de

importantes fenômenos previstos pela Relatividade Geral e já devidamente verificados seria muito longa; mas vale a pena lembrar-se de uma forma um pouco mais precisa desses principais fenômenos.

- Isso me parece bastante ilustrativo, Herr Einstein! Diz o nosso amigo cubano - O senhor poderia listar esses fenômenos?

- Eis, sucintamente, algumas previsões confirmadas da Teoria da Relatividade Geral, Dom Carlos. Primeiramente, o desvio dos raios de luz ao passar nas cercanias de estrelas; um fenômeno observado por Arthur Eddington em 1919. Depois, a existência dos Buracos Negros; algo corroborado por múltiplas observações astronômicas. A ideia de que o tempo transcorre mais lentamente onde a gravidade é mais intensa; um fenômeno medido por Hafele e Keating em 1971. O conceito de que o Universo se expande; um fenômeno constatado observacionalmente por Edwin Hubble em 1929. A afirmativa de que os objetos astronômicos em rotação arrastam o espaço como se este fosse um mel; um fenômeno observado com o auxílio do satélite Gravity Probe B em 2011. A consequência de que o periélio de Mercúrio se desloca a cada ano por uma distância apreciável; um fenômeno que já havia sido observado por astrônomos no século XIX. A ideia de que um par de estrelas circulando um centro de massa comum emite ondas gravitacionais; um fenômeno observado indiretamente por Hulse e Taylor em 1975 e que lhes valeu o prêmio Nobel de 1993. A ideia de que a frequência da luz é afetada pela gravidade; um fenômeno observado por Pound e Rebka em 1960. O conceito de que a gravidade e a inércia são equivalentes; algo comprovado por Roll, Krotkov e Dicke em 1964. A previsão de que os Buracos Negros que espiralam em torno de um centro de massa comum, um em direção ao outro, emitem ondas gravitacionais; um fenômeno observado em setembro de 2015 pela equipe de físicos do LIGO e comunicado ao mundo neste ano de 2016.

- Excelente resumo das previsões e confirmações da Relatividade Geral, Herr Einstein!

- Obrigado, Dom Carlos. O senhor é muito gentil.

- Mas, e as origens de sua Teoria da Relatividade Geral sobre as quais o senhor disse que ia falar, Herr Einstein? - Cobra o nosso amigo holandês.

- Isso, Mr. Van Borbha! Como eu já disse antes, eu apresentei a Teoria da Relatividade Restrita em 1905 e a razão para o desenvolvimento da Relatividade Geral foi a preferência do movimento inercial no escopo da Relatividade Restrita, en-

quanto que uma teoria que, desde o início não privilegiasse nenhum estado especial de movimento (mesmo aqueles acelerados) me parecia algo bem mais satisfatório que ela. Assim, enquanto eu ainda estava trabalhando no Escritório de Patentes em Berna, em 1907, eu tive o que costumo chamar de "o pensamento mais produtivo" de toda a minha vida. Eu percebi que o Princípio da Relatividade poderia ser estendido para os Campos Gravitacionais ao imaginar um pintor em queda livre. Eu publiquei no ano seguinte um artigo no qual tecia considerações sobre a aceleração, ainda no escopo da Relatividade Restrita. Nesse artigo, eu argumentava que para um observador em queda livre as regras da Relatividade Restrita deveriam também ser aplicáveis. Este meu argumento fundamental é chamado de "Princípio da Equivalência". Nesse mesmo artigo, eu já previ também, ainda que de forma embrionária, o fenômeno da dilatação gravitacional do tempo.

- Mas, isso ainda era feito de modo intuitivo ou já perfeitamente sistematizado do ponto de vista matemático? - Arremata Van Borbha.

- Meu artigo era ainda bastante intuitivo; aliás, eu sempre fui muito intuitivo e sempre raciocinei muito por imagens para elaborar meus famosos "experimentos em pensamento". Risos ... Meu pensamento sempre foi assumidamente imagético por natureza. Mas, a coisa toda ainda estava em seu estado germinal e para ser sincero, eu ainda não possuía as necessárias ferramentas matemáticas para enquadrar devidamente o complexo problema teórico então apenas inicialmente enfocado.

- E como o senhor progrediu em direção à sua Teoria da Relatividade Geral, Herr Einstein? - Pergunta o nosso amigo Cyrano.

- Em 1911, Monsieur Bahr Etto, eu publiquei outro artigo expandindo aquele meu artigo mais intuitivo. Ali eu já pensei sobre o caso hipotético de uma caixa uniformemente acelerada não em um campo gravitacional e observei que os efeitos observados seriam indistinguíveis daqueles observados em uma caixa que estivesse imersa em um campo gravitacional estacionário. Eu usei ainda a Relatividade Restrita para mostrar que a taxa de avanço de relógios colocados na referida caixa dependeriam de suas posições no campo gravitacional, e que a diferença das taxas deveria ser proporcional ao potencial gravitacional em primeira aproximação. Eu também fiz então a previsão de que a luz sofreria uma deflexão causada por corpos massivos. Embora minha aproxi-

mação fosse ainda rudimentar, ela já me permitia mostrar que tal deflexão deveria existir e que não seria nula. As aproximações ainda não funcionavam bem para objetos próximos da velocidade da luz e apenas mais tarde, quando eu consegui concluir minha formulação da Teoria da Relatividade Geral, foi que este erro foi retificado e a previsão correta da deflexão da luz pelo Sol foi feita.

- Mas, como as novas Matemáticas, especialmente a Geometria Riemanianna, entraram em sua Teoria, Herr Einstein? - Indaga o nosso amigo Carlos Reys.

- Se bem me lembro, Dom Carlos, isso me foi bastante facilitado pela ajuda de meu velho amigo e antigo colega na ETH, o Marcel Grossmann que sugeriu as leituras adequadas das ferramentas matemáticas que ainda me faltavam. Mas, do ponto de vista de sua necessidade a coisa surgiu no contexto de meus novos "experimentos em pensamento" sobre a natureza do campo gravitacional de um disco rotativo. Eu imaginei um observador realizando os experimentos em uma plataforma giratória. Eu percebi que este observador iria encontrar um valor diferente para a constante matemática π que aquele previsto pela geometria euclidiana.

- Como, assim, Herr Einstein? - Interrompe o nosso amigo Cyrano. Essa me parece ser uma constante universal.

- A razão para isso, Monsieur Bahr Etto; é que o raio de um círculo seria medido com uma régua não contraída; mas, de acordo com a Relatividade Restrita, a circunferência deveria parecer maior para este observador porque a régua sofreria uma contração em seu comprimento. Como eu acreditava que as leis da Física eram localmente válidas; descritas por campos locais, eu concluí que o espaço-tempo poderia ser curvado localmente. Foi isso que me levou a estudar a Geometria de Riemann e a formular a Relatividade Geral nesta nova linguagem matemática.

- Muito interessante, Herr Einstein! - Observam juntos Charles Robert, Carlos Reys e Van Borbha.

O velho Albert sorri encabulado com a apreciação dos nossos amigos e eu aproveito para lhe oferecer uma água de coco que ele aceita, de imediato, evidenciando já estar com a garganta seca. Ele olha para mim e me pergunta, meio sem jeito:

- Aqui também tem aquela deliciosa panqueca branca que eu comi lá em Campina Grande?

- Que panqueca é essa, Alexandre? - Pergunta Cyrano.

- Não é uma panqueca, Cyrano. É que o Albert não sabe o nome. É a nossa velha e conhecida tapioca. Tem, sim, Herr Eins-

tein! Eu vou buscar uma para o senhor no balcão, já que esse garçom não passa aqui.

Vou até ao balcão; volto com a tapioca e encontro Herr Einstein já no meio da conversa contando como ele progredira em seu trabalho, já então bastante matematizado pelas novas ferramentas teóricas por ele introduzidas e oriundas da Geometria de Riemann, durante o ano de 1915.

- Eu percebi que a covariância geral era algo realmente defensável e consegui compatibilizá-la com o determinismo em que eu sempre acreditei. Só então, já em outubro de 1915, eu consegui rapidamente completar o desenvolvimento das Equações de Campo que vieram a receber o meu nome. No entanto, eu cometi um erro que agora é famoso.

- O que? O senhor cometeu um erro, Herr Einstein: - Diz, surpresa, Calina.

- Isso, madame Cacá! Eu usei as poderosas ferramentas matemáticas do tensor de Ricci e do tensor momento-energia em minhas Equações de Campo e fiz previsões a respeito da precessão do periélio de Mercúrio; mas logo percebi que elas eram incompatíveis com a Conservação local do momento e da energia a não ser que o Universo tivesse uma densidade constante de massa-energia-momento; ou seja, que as pedras, a água e até mesmo o ar e o vácuo tivessem todos eles a mesma densidade, o que era flagrantemente absurdo. Tive de refazer os cálculos e só consegui obter as Equações de Campo corretas no final de 1915; mais precisamente eu as apresentei à Academia Prussiana de Ciências no dia 25 de novembro. Com a publicação das Equações de Campo, o problema passou a ser resolvê-las para vários casos diferentes e interpretar as soluções obtidas. Vale salientar que este é um problema ainda válido e em andamento e que inclui também a verificação experimental de tais conclusões obtidas e ele tem dominado a pesquisa em Relatividade Geral desde aquela época. Os trabalhos recentes relacionados com a observação das Ondas Gravitacionais fazem ainda parte desta longa e complexa agenda.

Calina insiste nesse ponto e pergunta ao velho Albert como eram essas suas tais Equações Relativistas do Campo Gravitacional. Carlos Reys olha apreensivo para o Van Borbha e em seguida para o Charles Robert. Eu sinto que eles percebem que o tempo pode fechar se o velhinho começar a falar agora na espinhosa Matemática da Análise Tensorial de suas equações. O Cyrano também percebe a enrascada em que nossa conversa pode cair e alivia a pergunta da Calina.

- Por favor, Herr Einstein; explique

apenas por alto o significado geral das suas equações para que essa coisa tão complexa fique mais palatável. Não precisa entrar em detalhes mais técnicos.

Albert faz uma careta de quem não gostou muito daquela recomendação; mas diz que fará o o que estiver ao seu alcance para tentar ser o mais claro possível.

- Eu sei bem das dificuldades de compreender a Relatividade. Até escrevi um livro sobre ela para leigos. Na parte referente à Relatividade Restrita eu até criei aquela metáfora que vocês ainda usam muito em sala de aula dos espelhos em um trem em movimento; lembram-se dela?

- Claro, Herr Einstein; nós a usamos frequentemente em nossas aulas de Física Moderna como uma "transposição didática" mais palatável para os nossos estudantes na Universidade do que a discussão mais detalhada do experimento de Michelson-Morley como gostam de fazer muitos livros. Prossiga! - Diz o Carlos Reys.

- Pois, bem! No caso da Relatividade Geral, a coisa é um pouco mais complexa. Em quatro artigos, apresentados em novembro 1915 à Academia Prussiana de Ciências, em Berlim, eu introduzi uma nova formulação dos conceitos que relacionavam o espaço com a gravidade. Ao final desse empreendimento, eu cheguei a uma Equação do Campo Gravitacional que indica que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço.

Ele pega um guardanapo na mesa e tira uma velha caneta tinteiro do bolso da camisa que é certamente mais antiga que a já velha Parker 51 e com ela rabisca a famosa expressão matemática de sua Equação Relativística do Campo Gravitacional, o coração da Teoria da Relatividade Geral:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Vejam! Esta é a minha Equação Relativística do Campo Gravitacional!

Calina olha apavorada para Cyrano, mas ainda assim interrompe a narrativa do velho Albert e diz arrojadamente:

- É apenas uma equação, Herr Einstein? Eu pensei que o senhor tinha falado no plural: "as equações".

- Boa pergunta, madame Calina! - Diz o velhinho sorrindo, mas sem usar o apelido "Cacá" que ele até agora empregara - Trata-se, realmente, de um sistema de equações; mas elas podem ser resumidas didaticamente em uma única equação, como eu vou tentar explicar.

- OK, professor! Obrigada! Desculpe!

- Não há porque se desculpar, ma-

dame Cacá! Sua dúvida é perfeitamente válida e eu vou explicar por que. Vejam! O lado esquerdo da Equação Relativística do Campo Gravitacional descreve a geometria do espaço-tempo (R), enquanto o lado direito da mesma controla a distribuição de energia e momento (T). Ou, como disse o John Wheeler de forma metafórica e muito feliz: “o espaço (do lado esquerdo) diz à matéria como se mover, enquanto a matéria (do lado direito) diz ao espaço como se curvar”. Os índices subscritos representados pelas letras gregas representam as quatro dimensões do espaço e do tempo. Pode não necessariamente parecer, mas essas letras gregas subscritas são como uma oferta inoperante. Os símbolos aqui não representam apenas números quaisquer; eles representam tensores, que podem livremente ser pensados como sendo uma generalização do conceito de vetores; como sendo matrizes 4×4 de números, com as suas próprias regras especiais para a multiplicação e para a divisão. Esta é na verdade uma forma compacta de representar as dez equações que precisam ser resolvidas simultaneamente para que se possa fazer qualquer previsão sobre a realidade física.

- Mas, fisicamente – observa o Cyrano – o que esta sintética equação tenta comunicar sobre a realidade, Herr Einstein?

- Ela nos diz, monsieur Bahr Etto, que qualquer matéria nas vizinhanças de um objeto massivo irá se mover ao longo de curvas geodésicas através do espaço-tempo curvo e que não são necessariamente linhas retas no espaço.

- Mas, qual é o resultado disso, professor? – Pergunta novamente Calina.

- O resultado, madame Cacá é que para um observador assistindo a um objeto material se mover, este lhe parecerá estar sujeito a uma hipotética “força”. A suposta “força” neste caso é a gravidade; mas é importante notar que esta é apenas uma espécie de “tradução vulgar para os termos clássicos”, pois rigorosamente falando, não há força gravitacional na Relatividade Geral e a gravitação é vista como devida à curvatura do espaço. E, para complementar; o símbolo nesta equação que, na verdade, representa um número já bastante familiar é o G maiúsculo, que é a mesma constante gravitacional contida na Equação de Newton para a Gravitação.

- Mas, qual é o objetivo da Relatividade ao fazer isso, Herr Einstein? – Diz mais uma vez Calina.

- O objetivo da Relatividade Geral é resolver esta equação, madame Cacá; ou, na verdade, essas equações; para

o $g_{\mu\nu}$ ou o “tensor métrico” ou simplesmente a “métrica” que é um tensor covariante de segunda ordem, algo que determina todas as propriedades do espaço curvo. Em um tradicional espaço euclidiano, a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180 graus; mas na Geometria Riemanniana esta soma pode ter um valor diferente. Sem curvatura, a soma dá 180 graus; mas com curvatura positiva ela é maior que 180 graus e com curvatura negativa é menor que 180 graus. O “espaço-tempo” é simplesmente um espaço Riemanniano com 4 dimensões e com uma métrica. As soluções dessa equação nos dizem muito sobre a realidade física.

- Como assim? O que isso nos diz, professor? – Pergunta ainda Calina meio aflita.

- Ela nos diz que a presença de matéria provoca uma mudança na maneira de medir a distância e o tempo, dependendo de onde você está em relação a um objeto de grande massa. Isto significa que aquilo que um observador vê como uma distância no espaço parece para outro observador em uma posição distante como sendo uma mistura da distância tanto no espaço quanto no tempo. Um observador sentado perto de um objeto massivo na superfície da Terra; vai observar o tempo passar a uma taxa diferente daquela que um observador que está mais distante, como por exemplo, em um satélite em órbita vê o mesmo fenômeno. E um comprimento medido por um observador próximo a um objeto de grande massa não vai estar de acordo com a mesma distância medida por um observador mais longe deste objeto massivo.

- Desculpe, Herr Einstein – Diz Cyrano – Mas, isso tudo me parece um bocado bizarro. Risos...

- Isso pode até parecer mesmo completamente bizarro, mas é absolutamente e inequivocamente verdade, como foi demonstrado, por exemplo, pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) que vocês usam atualmente de forma corriqueira, até mesmo em seus aparelhos celulares. Os satélites que compõem o sistema de GPS contêm relógios atômicos que transmitem um sinal de tempo, e a taxa em que esses relógios “avançam” tem de ser ajustada para se levar em conta a Relatividade Geral. Sem a correção relativística, os relógios derivariam por cerca de 38 microsegundos por dia; correspondendo a aproximadamente 11 km da incerteza na posição. Como o sistema trabalha para dar a você a sua posição sobre a Terra em uma faixa de poucos metros (na maioria das vezes); sabemos que a correção relativista

funciona e que a Relatividade Geral está correta. E, portanto, se há algo que pode parecer realmente bizarro é a estrutura matemática inerente à própria Natureza; mas essa bizarrice tende a se transformar na mais pura beleza se for devidamente compreendida. No fundo, eu sempre acreditei que a Natureza segue rigorosos e elegantes princípios “estéticos” que podem ser bem contemplados tanto na Relatividade Geral quanto, por exemplo, no Teorema de Noether que relaciona os Princípios de Conservação com as Simetrias da Realidade física.

- Essa beleza é fogo de se contemplar, professor! E o que é aquele V de cabeça para baixo em sua equação? – Pergunta sorrindo a Calina.

- A dialética da contemplação da beleza expressa em suas formas mais simples e sua aparente e intrínseca dificuldade de se revelar é um enigma inerente à Natureza, madame Cacá. Quanto ao “ V de cabeça para baixo” da equação do campo gravitacional, ele é na verdade a letra maiúscula grega Lambda.

- Mas, o que eu quero saber é o que esse tal letra Lambda significa fisicamente na sua equação, Herr Einstein.

- Ela é a misteriosa constante cosmológica, Calina. – Diz o Carlos Reys.

- E o que é essa tal constante cosmológica? Insiste Calina.

Eu ouço aquilo e penso cá com o meus botões: “lascou!” Se o velhinho for responder a essa pergunta nossa conversa não termina mais hoje, pois vamos facilmente cair no problema ainda não resolvido da Energia Escura. Mas, o Albert parece se divertir com as respostas dos nossos amigos à dúvida de Calina e se dispõe a explicar mais detalhadamente a questão, para o meu desespero de que ele não volte mais ao tema central das Ondas Gravitacionais. E para completar o meu receio, o Van Borbha ainda completa de forma direta:

- Isso está relacionado com a Energia Escura, não é mesmo Herr Einstein?

Pronto! – Penso eu – É só o que faltava para o velhinho não voltar mais para o assunto. E neste exato momento, ele começa a explicar a questão levantada sobre o tal “ V de cabeça para baixo”.

- Vejam! Para vocês entenderem o significado desse tal “ V de cabeça para baixo”, como disse a madame Cacá, eu vou precisar de contar um pouco da minha própria história a esse respeito.

O Carlos Reys se anima com essa observação do velhinho e diz logo:

- Vá em frente, Herr Einstein. Temos todo o tempo do mundo. Somos todos ouvidos. Conte a sua história.

Ainda bem que o velho Albert leva

na brincadeira essa estória do Carlos dizer que nós “temos todo o tempo do mundo”. Se ele pegasse para valer nessa afirmativa, a conversa não acabaria mais hoje.

- Pois bem! Quando eu propus a minha Teoria da Relatividade Geral em 1915 e início de 1916, eu ainda não sabia que o Universo estava em expansão. Em minha mente, o tamanho do cosmos era fixo e, portanto, o Universo era estático. Entretanto, as soluções iniciais da minha Equação Relativística do Campo Gravitacional apontavam para um Universo em expansão; o que me parecia algo inaceitável.

- E o que o senhor fez com aquilo que lhe parecia um desencontro? - Pergunta o Cyrano.

- Descontente com esta situação, Monsieur Bahr Etto, eu incluí em minha Equação Relativística do Campo Gravitacional um termo aditivo ao qual denominei de Constante Cosmológica para a Relatividade Geral, sem o qual as equações, aparentemente, não permitiriam a existência de um Universo Estático, já que a gravidade faria com que o Universo; que estava inicialmente em equilíbrio dinâmico, entrasse em colapso. Foi, portanto, para contrabalançar este indesejável efeito colapsante da gravidade que eu adicionei a tal Constante Cosmológica que é simbolizada pelo tal λ ou “V de cabeça para baixo”. Risos...

- Mas, qual é o significado dessa constante, Herr Einstein? - Atalha o Cyrano.

- O significado físico da Constante Cosmológica λ , Monsieur Bahr Etto, é o valor da densidade de energia do vácuo.

- E o que isso mudaria no Universo com ela ou sem ela? - Pergunta Calina.

- Sem ela, madame Cacá, o Universo teria se contraído ou expandido de acordo com a quantidade de massa existente no mesmo. Ela atuaria, portanto, como se fosse uma força repulsiva misteriosa e seria aquilo que manteria tudo junto em seu respectivo lugar.

- Mas, o Universo não é estático. - Observa Cyrano.

- Sim, Monsieur Bahr Etto! Mas, eu já disse que eu não sabia naquela época que o Universo não era estático. Aliás, ninguém sabia! A referida questão era ainda uma matéria opinativa e em discussão que dependia mais de convicções filosóficas e religiosas ou não. Contudo, em 1929 as observações astronômicas do Edwin Hubble indicaram que o Universo parecia estar se expandindo; o que era consistente com uma solução para as minhas Equações Relativísticas originais que havia sido encontrada pelo matemático russo Alexander Friedmann. Hubble havia descoberto

que todas as galáxias, fora do Grupo Local (ao qual pertence a nossa Via Láctea) estavam se afastando umas das outras, o que implicava que o Universo estava em expansão.

- E aí, o que o senhor fez? - Pergunta o Charles Robert.

- Nestas condições, Monsieur Des Saints, eu tive de rever minha ideia da Constante Cosmológica e naquele mesmo ano de 1929, eu a retirei das Equações Relativísticas para o Campo Gravitacional. Eu passei, desde então, a me referir a ela como o maior erro de minha vida. Eu não tinha como perceber, naquela época, que na verdade, adicionar a Constante Cosmológica às referidas equações é algo que não leva necessariamente a um Universo Estático em equilíbrio, pois o equilíbrio universal é instável. Se o Universo se expande um pouco, então a expansão libera energia do vácuo, o que provoca ainda mais expansão. Da mesma forma, um Universo que contrai ligeiramente continuará a se contrair. Mas, a Teoria como um todo ainda estava tomando forma em minha cabeça, sem que eu dispusesse de dados observacionais hoje facilmente disponíveis.

- E todos que trabalhavam com Relatividade Geral também abandonaram essa ideia da constante cosmológica, nessa época? - Pergunta nosso amigo holandês.

- Não, exatamente, Van Borbha! A constante cosmológica permaneceu ainda viva como um assunto de interesse teórico e empírico. Trazendo a discussão para o presente, podemos dizer que, empiricamente, a descoberta de novos dados cosmológicos nas últimas décadas sugere fortemente que o nosso Universo tem uma constante cosmológica positiva. A explicação para este seu pequeno, mas positivo valor é um desafio teórico bastante atual. Se eu ainda estivesse “na ativa” gostaria de trabalhar com esse problema. Risos...

- Ela, então, naquela época, virou uma espécie de curiosidade matemática? - Pergunta nosso amigo cubano.

- Mais ou menos, Dom Carlos! Finalmente, deve-se notar que algumas generalizações iniciais da minha Teoria da Gravitacão, conhecidas como Teorias Clássicas do Campo Unificado, ou introduziram uma constante cosmológica em termos teóricos ou descobriram que ela surgia naturalmente da Matemática empregada. O certo é que desde 1929 até o início dos anos 1990, a maioria dos pesquisadores assumiu que a constante cosmológica era igual a zero.

- Mas, como a história revelaria posteriormente, Herr Einstein, a introdução da constante cosmológica não havia sido um erro assim tão ruim. Na verdade,

ela continha realmente uma preciosa informação sobre algo fundamental no Universo. - Diz nosso amigo holandês.

- Isso, Mr. Van Borbha! A partir dos anos 1990, vários desenvolvimentos observacionais na Astronomia, especialmente a descoberta de que o Universo está não apenas em expansão; mas, sim em Expansão Acelerada; mudaram o cenário a esse respeito.

- Por que essas descobertas mudaram a forma de se encarar a constante cosmológica, Herr Einstein? - Questiona Cyrano.

- Porque esta mudança, Monsieur Bahr Etto, foi uma decorrência das observações de distantes supernovas feitas em 1998, assim como também das evidências independentes obtidas a partir da observação da Radiação Cósmica de Fundo e dos altos valores do deslocamento para o vermelho das galáxias. Este novo panorama de um Universo em expansão acelerada levou os cosmólogos a propor a existência de um novo construto teórico, ou seja a existência de algo misterioso semelhante a uma força repulsiva universal que seria fisicamente responsável por esta referida expansão universal e ao qual se convencionou denominar de Energia Escura. Os estudos seguintes levaram à conclusão de que esta coisa misteriosa e repulsiva denominada de Energia Escura deveria compor em torno de 68% do valor da densidade massa-energia do Universo. Embora o conceito de Energia Escura ainda seja enigmático a um nível fundamental, as principais propriedades necessárias para a Energia Escura são tais que ela funciona como se fosse um tipo de anti-gravidade que se dilui muito mais lentamente que a matéria na medida em que o Universo se expande e também que se aglomera muito mais fracamente que a matéria, ou talvez que nem mesmo se aglomere.

- Mas, Herr Einstein! - Diz Cyrano - O que é que isso tudo tem a ver com sua constante cosmológica?

- Há uma enorme semelhança entre esse recente construto teórico da Energia Escura e a minha velha Constante Cosmológica, Monsieur Bahr Etto, pois se sabe hoje que esta é em certa medida a forma mais simples possível da Energia Escura, desde que ela é constante tanto no espaço quanto no tempo e isto leva ao atual Modelo Padrão da Cosmologia conhecido como Modelo Lambda-CDM ou mais sucintamente Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) que é uma forma do Modelo Cosmológico do Big Bang no qual o Universo contém uma Constante Cosmológica denotada pela letra maiúscula grega Lambda (Λ), associada com a Energia Escura e a Matéria Escura Fria (Cold Dark

Matter ou CDM). É este Modelo Lambda-CDM que atualmente dá suporte e confere significado às muitas observações cosmológicas recentes como as anunciadas recentemente em fevereiro de 2016 sobre a observação das Ondas Gravitacionais.

Todos sorriem aliviados com o tratamento “light” e informativo que o velho Albert tenta nos dar naquele momento sobre um assunto tão importante e complexo da Física; e eu fico aliviado com o fato de que ele citou as Ondas Gravitacionais no contexto bem atual; mas, ele ainda não contou como chegou à conclusão que elas deveriam existir; e isso eu ainda quero

ouvir bem direitinho. É preciso manter esse ritmo da nossa conversa sem deixar o velho perder o rumo da prosa.

Em primeiro lugar, porque mesmo se esforçando para ser didático, o velho Albert ainda insiste em detalhar alguns aspectos matemáticos mínimos que lhe parecem relevantes; mas, que, mesmo assim, não são tão simples para o leitor iniciante compreender. E, em segundo lugar, porque essas suas considerações mais gerais o estão afastando do nosso assunto principal que são as Ondas Gravitacionais.

Certamente, essas coisas estão todas ligadas ao tecido mais amplo da Relativi-

dade Geral, mas eu temo pela demora do velho chegar lá. É preciso dar um jeito de fazê-lo tomar esse rumo. Mas, como fazer isso? E justamente nesse momento, o velho Albert para e diz sorrindo:

- Estou com fome! Aqui não tem comida? Risos ...

- Claro! – Dizemos todos ao mesmo tempo.

- O que o senhor quer comer? – Pergunta o Van Borbha.

- Peixada com molho de camarão! Depois do almoço a agente continua a conversa. Risos ...

Leia mais

- B. Andrews, *20 Things you Did Not Know About Gravity*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- A. Ashtekar (ed), *100 Years of Relativity: Space-Time Structure – Einstein and Beyond* (World Scientific Publishing, Singapore, 2005).
- M. Bartusiak, *Einstein's Unfinished Symphony*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- Carl Brans, *The Roots of Scalar-Tensor Theory: An Approximate History*, disponível em <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0506063>.
- Bruce Dorminey, *General Theory of Relativity: Probing the Cosmos with Gravitational Waves*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- Joshua Frieman, Michel Turner and Dragan Huterer, *Dark Energy and the Accelerating Universe*, disponível em <https://arxiv.org/abs/0803.0982>.
- Hubert Goenner, *On the History of Geometrization of Space-Time: From Minkowski to Finsler Geometry*, disponível em <http://arxiv.org/abs/0811.4529>.
- Alex Harvey, *How Einstein Discovered Dark Energy*. Disponível em <http://arxiv.org/abs/1211.6338>.
- M. Hobson, G. Efstathiou and A. Lasenby, *General Relativity: An Introduction for Physicists* (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
- Leopold Infeld, *Quest – The Evolution of a Physicist* (Gollancz, London, 1941).
- Max Jammer, *Concepts of Simultaneity: From Antiquity to Einstein and Beyond* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2006).
- Max Jammer, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics* (Dover Publications Inc., New York, 1993).
- Max Jammer, *Einstein and Religion* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- Daniel Kennefick, *Controversies in the History of the Radiation Reaction Problem in General Relativity*, disponível em <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9704002.pdf>.
- Daniel Kennefick, *Einstein versus The Physical Review*. Physics Today, September 2005.
- Daniel Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought. Gives an Excellent Overview of the History of Gravitational Waves*, disponível em http://www.fma.if.usp.br/~rivelles/Int_Relatividade_Geral/int_relgel.pdf.
- Imry Lakatos and Alan Musgrave, *Criticism and the Growth of Knowledge* (Cambridge University Press, Cambridge, 1970).
- Imri Lakatos, *Proofs and Refutations* (Cambridge University Press, Cambridge, 1976).
- Alexandre Medeiros e Cleide Medeiros, *Einstein e a Educação* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- Steve Nadis, *Beyond Einstein*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015).
- Hans Ohanian, *Gravitation and Spacetime*. (W.W. Norton & Co., New York, 1976).
- Abraham Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 2005).
- Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse* (Dover Publications, London, 2011).
- Gabriel Popkin, *Defying Gravity*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015).
- Carlos Santos, *O Plágio de Einstein* (WS Editor, Porto Alegre, 2003).
- Raymond Serway and John Jewett, *Physics for Scientists and Engineers* (Cengage Learning, New York, 2013).
- Donal Shapero (ed), *Gravitational Physics: Exploring the Structure of Space and Time* (National Academy Press, Washington, DC, 2003).
- Vesselin Petkov, *Relativity and the Nature of Spacetime* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- Wolfgang Rindler, *Relativity Special, General, and Cosmological* (Oxford University Press, Oxford, 2006).
- Moritz Schlick, *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Dover Pub Inc, New York, 2005).
- Lee Smolin, *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science and What Come Next* (Houghton Mifflin Company, Boston, 2006).
- John Sullivan, *Three Men Discuss Relativity* (Alfred Knopf Ed, New York, 1926).
- Richard Talcott, *Blackholes in your Backyard*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- The Collected Papers of Albert Einstein*. Princeton University Press, disponível em <http://einsteinpapers.press.princeton.edu/>.
- Justin Worland, *A Brief History of the Search for Gravitational Waves*. Time, Feb 11 (2016).
- Alexander Blum, Roberto Lalli and Jürgen Renn, *One Hundred Years of Gravitational Waves*. Max Planck Institute for the History of Science, disponível em <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/content/one-hundred-years-gravitational-waves>.
- Jorge Valdés, *La Grand Illusión III: Las Ondas Gravitacionales* (Fondo de Cultura Economía, Ciudad de Mexico, 1997).