

HERANÇA DA RELATIVIDADE GERAL

M. NOVELLO
(CBPF)

1. Nesta homenagem a A. Einstein, apresentarei um panorama geral das pesquisas empreendidas nos últimos anos, que são de alguma forma, consequência da evolução das idéias contidas na Teoria da Relatividade Geral.

Algumas dessas pesquisas não podem ser consideradas como verdadeiro avanço da teoria, porquanto elas estabelecem uma problemática que, embora em alguns casos tenha sido apresentada já há algum tempo, ainda hoje constituem desafio à nossa compreensão. Decidi, no entanto, assim proceder porque me parece ser a explicitação de algumas dificuldades inerentes à teoria RG o melhor caminho para, a um só tempo, apresentá-la como teoria em formação - portanto viva; e também porque esse procedimento parece identificar-se com o próprio espírito investigador e crítico de Einstein.

Claro está que uma tal tarefa conterá certa dose de arbitrariedade (na seleção e apresentação do material) que está intimamente associada à minha visão atual da pesquisa em gravitação.

2. CAUSALIDADE

É sempre possível, pelo menos localmente, introduzir em uma variedade riemanniana (como o contínuo espaço-tempo) um sistema de coordenadas Gaussianas, no qual o elemento fundamental de linha se escreve sob a forma:

$$ds^2 = dt^2 - g_{ij} (x, t) dx^i dx^j$$

onde i, j, x variam no domínio $1, 2, 3$

A ausência de termos cruzados do tipo g_{0i} na métrica, permite realizar a separação da estrutura 4-dimensional espaço-tempo nas estruturas espaço (3 dim.) e tempo. Podemos assim definir de modo preciso, em uma dada vizinhança, a orientação local do tempo.

Tão logo procuremos generalizar esse procedimento e introduzir globalmente no espaço-tempo um sistema de Gauss, somos levados à evidência de que nem toda variedade riemanniana admite aquela construção. A origem dessa dificuldade, nas métricas que consideramos aqui, reside na presença de rotação local do fluido associado à fonte geradora da curvatura do espaço-tempo.

Na ausência de rotação, o sistema gaussiano permite a construção de uma superfície de Cauchy na qual dados iniciais poderiam ser prescritos e a partir do qual processos físicos poderiam ser propagados: uma estrutura causal é dessa forma constituída.

No outro caso, isto é, quando um sistema global de Gauss inxiste não podemos construir aquela superfície de dados iniciais; a propagação causal perde sua sustentação.

Chamaremos de Geometria do tipo Gödel a toda métrica associada a uma variedade riemanniana que não admite superfície global de Cauchy.

Nestas geometrias o campo gravitacional deforma os cones de luz de tal modo a manter em seu interior trajetórias fechadas, como na figura "2".



Fig. 1 - Curva tipo tempo e seu cone de luz local

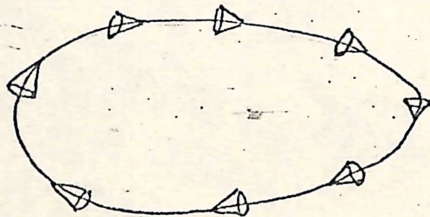


Fig. 2 - Curva fechada A do tipo tempo. A gravitação é responsável pela inclinação do cone de luz que acompanha o movimento da curva.

Como interpretar a trajetória de um observador que percorre a curva A? Aparentemente, ele poderia influenciar seu passado (retornando sobre sua história anterior).

Um exemplo particular de uma tal geometria foi apresentada por K. Gödel em 1949 durante a realização de um Congresso, na qual Einstein estava presente e cuja observação ao término do seminário de Gödel teria sido, laconicamente: "I don't like it".

A maioria da comunidade científica seguiu Einstein neste sentimento.

Com efeito, a solução apresentada por Gödel às equações de Gravitação de Einstein, embora correta matematicamente, contém a propriedade não-causal (curvas tipo-tempo fechadas), dificilmente de ser conciliada com a experiência efetiva de cada um de nós.

Pareceria simples rejeitar a solução de Gödel, utilizando considerações de ordem física, porquanto ela descreve um Universo estático, e já naquela ocasião (1949) sabia-se estar o nosso Universo em expansão.

Assim, poderíamos ser levados então a considerar a geometria de Gödel como um exemplo de solução exdrúxula das equações de Einstein, sem ponto de contato com o mundo real, isto é, sem poder ser efetivamente realizada em nosso mundo.

Como se comportaria a comunidade científica, no entanto, perante uma geometria tipo - Gödel não-estacionária ?

A resposta a essa questão só tornou-se imprescindível quase 30 anos após a descoberta de Gödel, quando só então modelos expansionistas de Universos em rotação foram encontrados.

Mais uma vez, a reação da comunidade foi o de rejeição apriorística destas soluções. NATURA NON RETROGRADITUR, pensaram os cientistas.

Entretanto, a questão requer uma discussão mais profunda, porquanto as descobertas de soluções das equações da gravitação de Einstein possuindo rotação e expansão (isto é, não-estacionárias) conduzem à sugestão da possível existência de um período na história de nosso Universo, representado por aquela solução (com rotação) e cuja herança poderíamos encontrar, ainda hoje, no pequeno movimento rotacional das Galáxias.

Uma partícula material (ou um observador) que percorre uma curva fechada tal como A, vive uma experiência que dificilmente admite uma descrição em termos de nossos parâmetros usuais. A ausência de relação causal ao longo de seu caminho, a impossibilidade de propagar, a partir desta região, informações arbitrarias, conduzem à evidência de que a ordem estrutural da representação das experiências ocorridas naquelas regiões (tais como a vizinhança de A) deve conter características bastante singulares, distintas daquelas a que estamos acostumados a empregar.

Um observador que, nessas condições, pretende reunir em um quadro coerente suas idéias a respeito da evolução temporal, se encontra em sérias dificuldades.

Com o propósito de resolver parceladamente essas dificuldades, escolhe-se examinar com detalhes os casos especiais da Geometria do tipo de Gödel conhecido, deixando a questão maior de análise das propriedades genéricas dessas geometrias para uma investigação futura.

Este exame crítico dessas soluções vem sendo ultimamente empreendido sem que, até o momento, tenha sido possível encontrar uma efetiva análise capaz de conciliar as propriedades do espaço-tempo naquelas regiões não-causais com o quadro usual de nossa descrição física.

DEPENDÊNCIA CÔSMICA DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

De um modo geral, uma teoria científica contém além das relações formais internas entre seus elementos fundamentais, certos parâmetros arbitrários, extrínsecos à teoria, cujo espectro de valores numéricos possíveis estão, o mais das vezes, além da compreensão teórica. Embora diversas investidas possam ser, e efetivamente o são, realizadas com o objetivo de reduzir tais parâmetros a conceitos primários acessíveis a uma racionalização, alguns setores da ciência, e precisamente aqueles fundamentais, contém grandezas que não permitem efetivar aquela redução.

Por exemplo, no Eletromagnetismo, não existe até o momento atual, nenhum modelo satisfatório capaz de deduzir a partir de princípios primeiros, o valor da carga ou da massa do elétron. Na teoria da Gravitação podemos inferir relações entre forças de atração das massas, porém não sabemos como deduzir o valor da constante de Newton a certas quantidades primárias elementares, e obter assim seu valor a partir de operações teóricas.

Os esquemas estruturais utilizados na elaboração de modelos teóricos na Física parecem, no entanto, conduzir à construção de um quadro da Natureza, cujo conteúdo fundamental seria independente do valor numérico dos parâmetros arbitrários nele contido. As teorias de Maxwell do eletromagnetismo e de Newton-Einstein da Gravitação possuem uma substância formal totalmente independente do valor numérico daqueles parâmetros.

Uma tal colocação da questão das leis físicas pareceria inútil, desprovida de significado e, desgraça maior, até mesmo idealista, se não se pudesse relacioná-la com as formas concretas de nosso Universo.

Para tornar tais questões significantes, deveríamos procurar relações que eventualmente vinculariam propriedades globais de nosso Universo com os valores reais das constantes fundamentais da física. Dito de outra forma: haveria alguma relação entre os parâmetros arbitrários contidos nas teorias físicas e, digamos, a estabilidade do Cosmos? Haveria alguma forma de dependência de tais números com o Universo?

Colocada dessa forma, a contingência dos parâmetros arbitrários contidos nas leis físicas adquire significância e um conteúdo não-trivial cuja problemática maior pode ser conduzida a constituir-se numa verdadeira busca das relações de auto-consistência de nosso Universo.

Há aqui, evidentemente, matéria para especulação e um leve sentimento inibidor de que nos afastamos da ciência convencional para penetrar em um terreno que, por direito ou por tradição, pertenceria à filosofia.

Independentemente da situação logística do problema, teríamos nós condições na ciência de propor uma discussão, fundamentada em nossos conhecimentos reais, capaz de produzir algum esclarecimento ou até mesmo elaborar algum modelo desta questão ?

Antes de procurar responder a esta pergunta devemos talvez procurar estabelecer a validade de um tal empreendimento. Sabemos, por exemplo, que com respeito aos sistemas lógicos, Gödel conseguiu mostrar a impossibilidade da demonstração da coerência interna de um sistema formal. Seríamos nós assim encaminhados, por analogia, a reduzir nossa questão e procurar demonstrar a impossibilidade da demonstração da coerência das leis físicas em um universo não trivialmente vazio ? Uma resposta simplista poderia ser: A razão primária que nos permite responder negativamente à essa questão acima reside na distinção entre o caráter formal da lógica e o caráter empírico das estruturas físicas. Assim, enquanto o discurso lógico se movimenta no terreno das formas perfeitas, o discurso físico se sustenta, como característica primordial, em sua existência e não em seu papel estrutural.

A elaboração de um programa de estudo da auto-consistência das leis físicas de nosso universo poderia, assim, constituir um projeto de pesquisa capaz de auxiliar-nos na análise de nossas teorias científicas e, até mesmo, de orientar-nos na seleção de modelos empíricos.

Em 1937, Dirac propõe um modelo de dependência das leis físicas com o universo que constitui precisamente um exemplo do projeto citado acima.

O modelo apresentado, no entanto, é de tal modo simplista que, certamente, só pôde alcançar um status razoável junto à comunidade científica devido ao grande prestígio desfrutado pelo seu criador.

A idéia central se apoia em observações de caráter numerológico realizadas previamente por Eddington. O argumento pode ser colocado da seguinte forma.

Toda medida física possui, além de um número que a caracteriza, a especificação da unidade à qual este número se refere e que dá à medida seu valor dimensional. Uma mesma grandeza física pode estar associada a diferentes números, dependendo do sistema de unidades utilizado. O estudo das diferentes unidades e suas relações e das expressões das grandezas físicas em termos de umas poucas quantidades fundamentais constitui-se na teoria da análise dimensional. A importância desse estudo em engenharia e nos trabalhos de ciência fundamental é grande. Há nessa teoria um aspecto trivial que consiste nas reduções das grandezas à sua fórmula dimensional e às relações que fixam a estrutura dimensional das equações da física; e um aspecto profundo, que pretende extrair da análise das relações dimensionais, a evolução dos parâmetros fundamentais da física. É desta segunda característica que Dirac vai buscar elementos para gerar sua hipótese dos grandes números.

Comecemos por observar que a descoberta por Hubble do afastamento homogêneo das galáxias no universo permite obter uma medida temporal capaz de caracterizar de modo razoavelmente preciso a idade do universo.

Como é do conhecimento geral, Hubble mostrou a existência de uma lei segundo a qual as galáxias se afastariam de cada ponto do Universo com uma velocidade proporcional à distância que a galáxia se encontra desse ponto. Note que devido à homogeneidade do espaço, este ponto é arbitrário e assim as galáxias estariam na verdade se afastando de cada ponto do espaço. A relação entre a velocidade de fuga e a distância é caracterizada por uma constante, conhecida como constante de Hubble H .

O valor atual do inverso desta constante, que pode servir como medida da idade do universo, é dado aproximadamente por

$$H_0^{-1} \approx 5.7 \times 10^{17} \text{ seg.}$$

Poderíamos, evidentemente, escolher outra unidade de tempo para expressá-la. No mundo atômico, por exemplo, existe uma unidade de tempo característica dada por

$$\frac{e^2}{m_e c^3} \approx 10^{-23} \text{ seg.}$$

Ela representa o tempo necessário para um corpo, movendo-se à velocidade da luz, atravessar uma distância equivalente ao raio clássico do elétron. Chamaremos 10^{-23} seg. de uma unidade atômica de tempo.

Dessa forma, dividindo o valor da idade do universo pela unidade atômica de tempo obtêm-se um número adimensional dado por

$$(1) \quad \frac{m_e c^3}{e^2 H_0} \approx 10^{40}$$

A existência de um tal número tão formidavelmente grande reflete simplesmente a velhice de nosso universo.

Consideremos agora, outros números igualmente adimensionais que podemos construir com grandezas fundamentais associados aos parâmetros disponíveis nas teorias físicas. Por exemplo, consideremos a razão da força eletrostática entre um elétron e um próton com relação à força gravitacional entre essas partículas. Teremos, assim:

$$(2) \quad \frac{\text{força eletrostática}}{\text{força gravitacional}} = \frac{e^2}{G m_e m_p} \approx 10^{40}$$

A semelhança entre esse número e o obtido anteriormente e a dificuldade de conceber uma explicação independente para o aparecimento de números tão grandes poderia conduzir à especulação sobre a existência de uma origem comum entre eles.

Antes de desenvolver tal argumento que consiste precisamente na hipótese de Dirac dos grandes números, consideremos ainda um outro grande número que podemos obter através de uma estimativa simplificada do número de partículas existentes em nosso Universo.

Vamos definir o raio do universo como sendo aproximadamente delimitado pelo raio do horizonte observável.

Temos:

$$\text{Raio do horizonte} \equiv r_h \sim \frac{c}{H}$$

A massa total do Universo é dada por

$$M = \left(\frac{4}{3} \pi \frac{c^3}{H^3} \right) \left(\frac{3}{8\pi} \frac{H^2}{G} \right)$$

onde a densidade de matéria existente no Cosmos é aproximada

pela densidade crítica $\rho_c = \frac{3}{8\pi} \frac{H^2}{G}$

Substituindo valores numéricos temos

$$M \sim 10^{56} \text{ g}$$

E, finalmente, com $m_p \sim 10^{24} \text{ g}$ tem-se para o número de partícula no Universo N o valor

$$(3) \quad N \sim 10^{80}$$

Obtemos assim outro número adimensional extremamente grande.

Como interpretar tais números? A primeira sugestão considerada seriamente, foi dada por Dirac (1937). A idéia é extremamente simples e até mesmo poderíamos considerá-la ingênua.

Ela parte da observação de que tais números grandes ganham significância e uma racionalidade se admitirmos estarem eles ligados intimamente à idade do Universo. Assim, todos os grandes números que podem ser obtidos dos parâmetros físicos seriam da ordem ou de $t \sim 10^{40}$ ou de alguma potência (pequena) deste número.

Se aceitarmos esta hipótese então estamos aceitando a dependência temporal de algumas constantes fundamentais da Física.

Com efeito, assumindo como Dirac o fez, que as constantes atômicas (e , h , m_e) não dependem do tempo cósmico, isto é, idade do universo, a relação (2) será satisfeita impondo-se para a constante de Newton a dependência

$$(4) \quad G \sim t^{-1}$$

A constante de interação gravitacional, assim, decresce com o passar do tempo. Segundo essa hipótese, conseguimos uma racionalização sobre a razão pela qual a interação gravitacional é fraca: ela é fraca porque o universo é velho.

A relação (3), dentro deste contexto nos permite escrever

$$(5) \quad N \sim t^2$$

A relação (5) acima constitui uma previsão. Ela impõe que o número de partículas no Universo não permanece constante, mas sim cresce com o passar do tempo.

Neste ponto uma nova teoria da gravitação se faz necessária para permitir tal mecanismo.

Infelizmente, contrariamente à teoria de Einstein da Gravitação, as possíveis alterações que permitiriam a criação de partículas segundo a fórmula prevista pela hipótese de Dirac, podem ser obtidas através de várias teorias distintas.

A dificuldade envolvida na hipótese (5) é, com efeito, bastante grande. Por exemplo, poderíamos perguntar sobre o tipo de partículas que seriam criadas. Seriam baryons ou leptons? Certamente haveria criação de fons. Onde tais partículas seriam criadas? Dirac sugeriu duas alternativas para essa questão. Segundo ele, poderia haver criação aditiva, envolvendo aparecimento homogêneo de partículas e neste caso, haveria mais matéria nova no espaço intergalático; recentemente Dirac sugeriu que poderia haver criação multiplicativa, na qual matéria é criada na região vizinha à da matéria. Neste caso, ela apareceria preferencialmente no interior das galáxias.

Em verdade, o modo de criação multiplicativa veio em socorro da hipótese de Dirac que não resiste a críticas observacionais se o modo de criação de partículas fosse aditivo.

Alguns autores criticaram fortemente este modelo considerando difícil a sustentação da hipótese de criação ininterrupta de nova matéria.

De um modo geral eles consideram mais aceitável a teoria dita do big-bang, na qual a criação ocorre somente uma vez na história do universo.

A idéia sugerida por Dirac em seu artigo de 1937 nada mais é do que um exemplo de um movimento no pensamento científico que pretende colocar em discussão o caráter absoluto das leis físicas terrestres, sua validade cósmica.

A posição da comunidade científica, neste aspecto, é conservadora: ela propõe a aceitação da extrapolação ilimitada das leis físicas terrestres ao Cosmos, até aquele estágio em que tais leis comprovadamente não descrevam mais a realidade observada.

Tal atitude não é singular, ela é na verdade uma constante da comunidade científica refletindo tão somente seu movimento ordenado de idéias, sua necessidade de progresso comunitário organizado.

Poderíamos enumerar alguns pontos favoráveis a esta atitude, bem como algumas situações desfavoráveis. Não é no entanto nossa intenção, aqui, levantar essa questão que está intimamente relacionada com a prática científica, isto é, o fazer ciência enquanto cientista, mas que possui também uma componente de caráter não-científico bastante forte que poderíamos mesmo considerar como fundamental, e que está vinculada ao movimento dialético do pensamento global da sociedade.

Chamamos de Movimento Evolucionista aquele conjunto de idéias que assim como proposta de Dirac, admite a dependência local no espaço e no tempo das leis físicas.

Nesse movimento a lei física passa a fazer parte do drama espaço temporal e não possui, como na atual versão oficial da ciência, uma propriedade intrínseca que a situa para além do espaço e do tempo, como um dado do universo, cujo tempo de validade seria dado pelo tempo de vida do próprio universo.

Segundo os Evolucionistas, a lei física não seria absoluta, imposta uma vez para sempre por alguma sorte de milagre interno ou externo, mas sim dependente da configuração global dos cosmos, bem como de suas manifestações localizadas.

Um segundo exemplo de aplicação desse princípio, além da discutida acima vamos encontrar na sugestão feita por Novello e Rotteli (1972), na qual interação fraca entre leptons é suposta depender do tempo cósmico.

Essa sugestão é, no entanto, distinta do modelo proposto por Dirac. Com efeito, a aplicação da hipótese dos grandes números às interações fracas conduziria à dependência temporal da constante de estrutura fina fraca.

Essa constante é definida por analogia com a interação eletromagnética e seu valor é dado por:

$$\left(\frac{b^2}{hc} \right)^{-1} \sim 10^{13} \sim t^{1/2}$$

onde b é a constante de Fermi no modelo corrente-corrente para a interação fraca obtida, por exemplo, através da desintegração $-\beta^0$.

A hipótese de Dirac, onde h e c são constantes, aplicada à expressão acima, conduziria à relação

$$b \sim t^{-1/6}$$

A proposta de Novello-Rotteli (NR) se afasta deste esquema. Eles partem da consideração de que no laboratório terrestre as interações leptônicas (fracas) parecem violar maximalmente a paridade. Tal fenômeno pode ser descrito por um modelo de interação de contato direto tipo corrente-corrente, cuja Lagrangiana de interação é de forma

$$\mathcal{L}_{int} = b J_{\alpha} J_{\beta} g^{\alpha\beta}$$

A corrente fraca consistiria de uma parte vetorial e uma parte pseudo-vetorial (axial), isto é, $J^{\alpha} = \bar{\Psi} \gamma^{\alpha} (1 + \gamma^5) \Psi$, onde Ψ é o campo do lepton.

O modelo NR propõe uma dependência temporal, para a parte axial da corrente.

Assim, neutrinos e anti-neutrinos produzidos ao longo da história do Cosmos seriam misturas dos estados esquerdo e direito de polarização, em oposição à teoria usual no qual somente um estado de polarização existe. A proporção dessa mistura de helicidade distinta depende do tempo cosmológico de sua criação (via processo fraco).

Dessa forma a violação da paridade seria um fenômeno dependente da época cosmológica. As conseqüências astrofísicas dessa dependência seriam particularmente importantes no fenômeno de emissão de neutrino por estrelas em evolução.

Dentro do contexto da Teoria Unificada o esquema de Novello-Rotteli sugeriria que a existência de interações distintas seria conseqüência da dependência cósmica das interações fundamentais.

ANTI-COPÉRNICO

Vimos acima como a hipótese dos grandes números pode conduzir a uma racionalização das relações empíricas descobertas por Eddington. Esta sugestão de Dirac está, entretanto, longe de poder ser considerada uma teoria científica e sua credibilidade é hoje muito pequena.

Independentemente de críticas à hipótese de Dirac, as relações numéricas apresentadas no capítulo anterior suscitam uma questão que tem provocado muita discussão e que precisa, sem dúvida, ser compreendida.

Uma tentativa de solução distinta da hipótese dos grandes números foi sugerida no começo da década de 60 por Dicke e recentemente defendida por Carter (1973).

O argumento principal de Dicke pode ser entendido como uma crítica à subordinação absoluta ao princípio de Copérnico. Dicke argüiu que a negação da idéia que pretendia considerar a Terra como um lugar privilegiado no universo devido à presença nela do homem, conduziu à visão diametralmente oposta de total irrelevância do papel desempenhado pelo homem na história do universo.

O reflexo na cosmologia moderna desta subordinação levou, em seu caso extremo, ao chamado princípio cosmológico perfeito assim sintetizado por Bondi: "... geography does not matter and history does not matter ...". Ele pretendia, com essa frase de belo efeito, reforçar a idéia segundo a qual não há distinção no espaço nem no tempo das propriedades cósmicas. Isto é, todo observador tem do universo a mesma percepção, quer ele ocupe posições distintas no espaço e/ou no tempo. O universo existiria assim somente em seu estado estacionário.

Esse exemplo extremado acima coloca em relevo a degradação sofrida pelo princípio de Copérnico que passaria a ser invocado como sustentáculo da idéia, com pretensões absolutistas, da relatividade das observações humanas. Embora em suas origens a crítica copernicana tenha possuído a força de uma revolução, alterando dramaticamente toda a visão do mundo à sua época, hoje ela se constituiria num modelo reacionário e inibidor. Dessa forma ele estaria seguindo as etapas normais de toda idéia, de todo projeto global a saber:

- (i) fase revolucionária (proveniente dos setores de vanguarda da época; criticada e perseguida pelo "establishment").
- (ii) fase empreendedora (a sociedade assimilando a idéia, utiliza-a para promover seus interesses de classe).

(iii) fase reacionária (a idéia tendo-se ligado intimamente ao sistema dominante, tende a rejeitar idéias que se lhe opõe, tentando evitar desequilíbrios nas relações de dominação da classe no poder que a utiliza).

Daremos a seguir uma versão anti-copernicana das relações de Eddington.

Segundo Dicke a possibilidade da presença do homem que coloca a questão da origem das relações entre os números adimensionais da física, requer preliminarmente a existência de certas substâncias no universo como por exemplo, o carbono. O aparecimento deste elemento químico depende da existência de galáxias, de estrelas não muito jovens, capazes de prover condições à sintetização do carbono.

Assim a própria existência humana dependeria de condições de estabilidade (equilíbrio termodinâmico, gravitacional, etc.) das estrelas do universo.

O estudo dessas condições conduz à análise do tempo de vida de uma estrela, isto é, do período em que ela é capaz de produzir energia por reações nucleares. Um cálculo aproximado do tempo T de vida nuclear ativa da estrela dará o valor

$$(1) \quad T \approx \left(\frac{m_p}{m_e} \right)^{1/2} \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right) \left(\frac{e^2}{G m_p m_e} \right) \left(\frac{e^2}{G m_e c^3} \right)$$

Daí podemos obter (desprezando termos da ordem 10^3 em função de termos da ordem 10^{40})

$$\left(2 \right) \quad \frac{m_p c^2}{\hbar} T \approx \frac{e^2}{G m_e^2} \approx \frac{\hbar c}{G m_p^2}$$

resultado este que é consistente com as relações de Dirac consideradas atrás.

Segue-se que o valor da idade do universo, H_0^{-1} coincide com o valor aproximado de T.

Dicke argumenta que este resultado não é arbitrário (sic) mas está condicionado à existência de físicos no universo. Dito de outra forma: se o valor de T fosse superior a H_0^{-1} , não teria transcorrido na história do universo tempo suficiente para formação de carbono e, conseqüentemente do homem e portanto, aquelas "coincidências" numéricas, a par de não serem satisfeitas, não poderiam gerar nenhuma sorte de especulação.

Nesta explicação a relação (2) só é verdadeira porque a temperatura máxima de vida estelar coincide com H_0^{-1} . Noutro pe-riodo, digamos no futuro distante, os físicos então poderiam verificar que a relação numérica (1) de Eddington deixaria de ser válida, pois ela reflete uma coincidência local e não uma lei física. Esta consideração poderia ser alçada à categoria de uma previsão, embora sua verificação experimental deveria aguardar um longo período de tempo.

De um ponto de vista mais geral, posto de lado o valor crítico da discussão da generalização do princípio de Copérnico, a visão de mundo sugerida na idéia acima esboçada, pareceria conduzir ao abandono da busca de explicações ulteriores à questão cosmológica. O universo, assim, se justificaria pela sua existência refletida em nossa consciência. A física do século XX deu ao observador uma posição particularmente importante na hierarquia das estruturas formais das teorias científicas, através da análise de sua influência nas medidas experimentais (teoria quântica) e da dependência de seu estado de movimento (teoria da relatividade). A idéia de Dicke-Carter pretende muito mais do que até aqui a física concedeu ao homem que observa. Parafraseando Descartes, Carter resume esta visão na expressão "Cogito ergo mundus talis est". O mundo é o que é porque nós somos o que somos. Isso pareceria aceitável se não pudéssemos continuar a questionar e perguntar: mas o que somos? e o que aparenta ser o universo? Há, afinal, uma estrutura unificada permitindo uma solidariedade de suas partes? Podemos entender em função de conceitos primários, as razões da disparidade do valor das constantes de acoplamento do eletromagnetismo e da gravitação com a matéria? Dessa forma, pareceria que embora a tese anti-copernicana possa constituir um progresso, o modo como Dicke a desenvolve, deixa muito a desejar.

Se a hipótese de Dirac pode ser criticada por sua pretensão tão grande com um esforço teórico tão limitado, podemos dizer que a crítica de Dicke por sua vez, é por demais tímida e não consegue exaurir nem sequer uma pequena parte de sua base filosófica inicial (crítica anti-copernica).

Finalmente resta considerar a origem, no esquema anti-copérnico, da relação entre as constantes de acoplamento eletromagnético e gravitacional. A sugestão de Dicke consiste em aceitar tal relação como consequência do princípio de Mach. Com efeito, na formulação de Sciama deste princípio, podemos escrever

$$\left(3 \right) \quad \frac{GM}{c^3 T} \approx 1$$

onde M é a massa total do universo. Assim, a constante de Newton G seria tão pequena porque a massa do universo é grande (sic).

Dicke argumenta, não sem bastante razão, que tal explicação pode não parecer satisfatória e assim permanecerá até podermos compreender o mecanismo de criação de massa no universo. Essa afirmação, em verdade, nada mais é do que o testemunho da incompreensão das origens da relação (3).

Pequeno resumo que viemos de fazer sobre as sugestões de Dirac (variação das constantes das interações fundamentais com o tempo cósmico) e o princípio antrópico (assim chamado por Carter à atitude anti-copernicana de Dicke), parece nos conduzir à reflexão de que embora tenhamos caminhado um pouco mais além da numerologia de Eddington, estamos ainda longe de poder compreender aquelas coincidências. Podemos talvez sugerir que o que parece faltar a estes esquemas é uma visão unificadora das interações fundamentais e seu papel cósmico (isto é, enquanto me

canismos geradores do cosmos).

Enquanto Dirac pretende ver naquela numerologia um reflexo da dependência direta das leis físicas locais com propriedades globais do universo; Dicke põe em relevo o caráter local daquelas relações.

Uma explicação, ainda por nascer, que viesse sintetizar a visão totalizante com a visão local consistiria sem dúvida um verdadeiro progresso, não somente em seu aspecto meramente técnico-científico mas e talvez principalmente, em seu caráter filosófico.

3. UNIFICAÇÃO

Durante muitos anos Einstein perseguiu, sem sucesso, uma segunda generalização de sua teoria da Relatividade tentando, desta vez, introduzir novas variáveis na estrutura do espaço tempo, capaz de representar o campo eletromagnético.

O sucesso conseguido por Einstein ao geometrizar a gravitação conduziu vários cientistas a sugerir e pesquisar caminhos que, pensava-se, conduziria à geometrização de toda física, alçando à condição de projeto científico um antigo sonho de Clifford.

Estas teorias deveriam ser construídas de tal modo a que o conhecimento das propriedades geométricas do espaço-tempo contivesse ipso facto o conhecimento de toda física.

Um exemplo simples e direto desse modo de pensar vamos encontrar em Rainich (mais tarde, em Wheeler e Misner), em sua tentativa de unificação dos campos eletromagnético e gravitacional. Segundo este autor o campo eletromagnético, ao curvar o espaço-tempo, através de sua energia, imprime-lhe uma tal forma estrutural incapaz de ser reproduzida por qualquer outra configuração material.

Assim, conhecidas as propriedades de curvatura de um dado espaço-tempo é possível, através somente de um exame das relações algébricas e/ou diferenciais de métrica, decidir sobre a origem eletromagnética (ou não) da fonte geradora da curvatura.

Generalizando esse argumento para outras configurações (tais como campo escalar, campo do neutrino, etc) seríamos conduzidos à redução das propriedades físicas dos distintos campos existentes a simples relações métricas. Tal é o programa proposto.

No Congresso da GRG de 1977 (Canadá), entretanto, mostrou-se ser impossível sustentar uma Teoria Unificada sobre esta base. A razão da dificuldade vamos encontrá-la na indistinguibilidade de diferentes configurações materiais via equações de Einstein.

Dito de outra forma: mostrou-se que distintas combinações de campos materiais podem gerar igual estrutura para a geometria do espaço-tempo. Assim, esse modo de unificação perdeu seu apelo e seu interesse ficou bastante reduzido.

Durante os últimos trinta anos, várias propostas de unificação apareceram. Não é nosso objetivo historiar aqui essas tentativas, mas somente apresentar alguns exemplos significativos.

Uma proposta particularmente atraente foi sugerida no começo da década atual e se baseia na aceitação de uma hierarquia ontológica, gerada pela aplicação das equações de Einstein à Cosmologia. Há alguns anos Shrödinger demonstrou que um Universo não estacionário é capaz de criar partículas. O estado do vazio $|0\rangle_t$ dependeria do tempo cósmico t e como consequência o número de partículas N também variaria com t .

A criação dessas partículas a partir do vazio altera o campo gravitacional que por sua vez altera a taxa de criação de novas partículas e assim sucessivamente. Embora o sistema completo de descrição desse mecanismo não esteja totalmente conhecido, alguns cientistas começaram a considerar seriamente a proposta segundo a qual a matéria dependeria ontologicamente da estrutura (do vazio) do espaço-tempo.

A descrição fenomenológica da matéria criada pelo campo gravitacional faz apelo a modelos macroscópicos de fluidos viscosos do tipo de Stokes e alterações geradas pelo Princípio Geral de Viscosidade que relaciona as propriedades dinâmicas (tais como fluxo de calor, pressão anisotrópica) com as quantidades cinemáticas (dilatação, rotação, etc.) do fluido cósmico.

Segundo essa linha de investigação, no próprio processo de aparecimento do Universo, o campo gravitacional cria a matéria, que surgiria, dessa forma, somente em um estágio ulterior. A compreensão desse aparente paradoxo, com espaço-tempo obtendo sua sustentação de si próprio, só é possível graças à teoria não-linear da gravitação que permite a existên-

cia de um estágio do vazio nos diferentes modelos cósmicos.

Esse estágio criaria então condições para a presença posterior da matéria.

Voltemos nossa atenção agora para uma outra linha de investigação capaz de gerar uma possível teoria unificada da matéria, que não faz apelo à introdução de uma hierarquia ontológica dependente da totalidade de nosso Universo.

A origem dessa nova orientação vamos encontrá-la no começo do século, na sugestão de unificação do eletromagnetismo e da gravitação por H.Weyl.

A proposta de Weyl sugere a modificação da conexão métrica utilizada por Einstein para escrever a gravitação, por uma conexão afim na qual o campo eletromagnético apareceria no tensor associado à conexão que a distingue dos símbolos de Christoffel.

Weyl conseguiu mostrar que a presença de um campo vetorial na conexão afim gera, de modo natural, uma simetria maior não contida no espaço de Riemann (strictu sensu) cujas características podem ser colocadas em correspondência direta com a simetria de gauge do eletromagnetismo.

Esta invariância de gauge gera um grupo abeliano associado às transformações que atuam sobre o campo vetorial.

Quarenta anos após os trabalhos primeiros de Weyl a teoria foi generalizada para grupos não-abelianos, e para campos de gauge mais complexos, satisfazendo não mais teorias lineares (como o eletromagnetismo) mas sim equações envolvendo funções não-lineares dos campos associados aos geradores dos grupos.

Conseqüência direta desta generalização, herdou-se a ambição de não somente unificar os campos clássicos mas também os campos que aparecem nas interações (fraca e forte) de curto alcance.

Um progresso digno de ser mencionado foi conseguido no modelo de teoria de gauge responsável pela unificação do eletromagnetismo com a interação fraca.

Entretanto, torna-se difícil entender como uma tal teoria poderia conter a gravitação, que determina a estrutura do espaço-tempo, sem empreender uma profunda revisão dos próprios conceitos de espaço e de tempo.

Uma tal revisão começa a se fazer necessária, como conseqüência de críticas e idéias surgidas em diferentes áreas. Entre estas, poderíamos enumerar:

- (i) A análise do campo gravitacional nas regiões singulares.

- (ii) A estrutura das partículas dita elementares e suas interações.
- (iii) A possibilidade do espaço-tempo ser tratado como uma entidade discreta e não contínua.

Vamos examinar algumas dessas propostas.

4. COLAPSO GRAVITACIONAL E A QUESTÃO COSMOLÓGICA

Na década de 60 a teoria da relatividade geral conseguiu atrair um grande número de cientistas, graças principalmente à explicitação de duas grandes questões, ambas associadas a campos gravitacionais fortes, contrariamente ao que se estudava até então, onde a tónica havia sido investigações das propriedades da gravitação em regiões de baixa intensidade.

Tais questões são:

- (i) Comportamento da matéria colapsada. (Buracos Negros)
- (ii) Questão Cosmológica

O estudo de corpos celestes (estrelas) colapsadas e a busca à sua observação resultaram ser uma tarefa fascinante.

Basicamente, o Buraco Negro (BN) consistiria no estágio final de colapso gravitacional sofrido por uma estrela cuja massa inicial de criação excede certo limite fundamental.

Um BN seria uma região onde o campo gravitacional seria tão intenso capaz de impedir, devido à sua atração, a emissão para o exterior de qualquer corpo material ou radiação. Até mesmo fôtons não poderiam sair de seu interior e daí a origem do termo Buraco Negro. Sua interação com o resto do Universo seria puramente gravitacional. A impossibilidade de observar o interior do BN conduziu a um grande número de idéias extravagantes, baseadas na falsa imagem segundo a qual o desconhecido contém a solução de nossos problemas. Não é nosso propósito apresentar aqui essas sugestões. Diremos somente que a análise do comportamento do campo gravitacional naquelas regiões colapsadas é uma tarefa teórica difícil e cujos resultados estão longe de poderem ter comprovação observacional. Independentemente disso, um grande passo à frente foi dado recentemente por Hawking que conseguiu mostrar a possível existência de processos quânticos capaz de permitir, através de um efeito túnel a emissão pelo Buraco Negro de radiação. Esta possibilidade de tunelamento altera bastante a visão clássica do BN e conduz a uma nova linha de investigação teórica.

A questão cosmológica recebeu igualmente nas últimas décadas, um impulso notável graças a descobertas em Astronomia que vieram retirar a cosmologia de sua condição especulativa para colocá-la sobre uma base observacional.

As discussões que levaram Einstein e outros a sugerir modelos cosmológicos baseados em considerações apriorísticas subjetivas vem sendo eliminada progressivamente. Não direi que foi totalmente eliminada, porquanto a investigação de totalidades, como é o caso do estudo do nosso Universo, conterà sempre um resquício de arbitrariedade. É tarefa do cosmólogo procurar limitar cada vez mais o alcance dessa arbitrariedade em nossa representação do Cosmos.

Sabemos hoje que uma boa imagem do Universo é obtida pelo modelo de Friedmann (criado há já sessenta anos !).

Nele, a matéria se encontra homogênea e isotropicamente distribuída no Universo. Tal modelo concorda com observações astronômicas, entre estas a mais espetacular é certamente a da radiação fotônica de 2.9°K . Entretanto, ao mesmo tempo que o modelo de Friedmann é alçado à categoria de modelo semi-oficial do Cosmos, ele provoca uma série de questões de difícil solução. Entre estas, iremos em seguida enumerar algumas.

O modelo de Friedmann é dinâmico, isto é, suas propriedades básicas dependem do tempo cósmico. Um exame da única função que caracteriza o modelo mostra que em um tempo finito em nosso passado, desenvolve-se uma singularidade, isto é, a densidade de matéria diverge, bem como as propriedades métricas

associadas, tais como a curvatura, atingiriam naquele ponto valor infinito. Daí a origem do termo Big-Bang para caracteri-
zar este modelo, que possuiria assim um instante inicial de
criação no qual toda a matéria estaria compactada.

A questão então se coloca: Como entender o comportamento do
Universo no instante inicial ?

Um outro problema ainda aberto, está relacionado com o apareci-
mento de inomogeneidades (estrelas, galáxias, aglomerado de ga-
láxias) no Universo.

Uma ideia simples consiste em aceitar estas inomogeneidades co
mo perturbações no background de Friedmann. Entretanto, este
mecanismo só poderia ser suficientemente eficiente se o espectro
inicial de perturbações não fosse arbitrário.

Isso, claro está, colocaria um problema maior, a saber, como
explicar a origem da seleção das perturbações.

Estas dificuldades, entre outras, conduziram alguns cientistas
a procurar alternativas para as equações da gravitação. A ori-
gem dessa modificação nas equações de Einstein, estaria associ
ada a efeitos quânticos de flutuação, que se fariam notar com
maior evidência precisamente naquelas regiões onde o campo é
forte, isto é, a curvatura do espaço-tempo é grande.

Dessa forma, as equações de Einstein seriam somente uma aproximação do comportamento do campo gravitacional. Infelizmente, as propostas das novas equações da gravitação são múltiplas e não sabemos ainda qual, dentre estas, melhor representaria a gravitação.