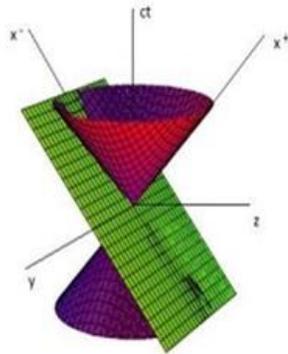




O que é o Tempo na Mecânica Quântica?

Jorge Henrique Sales– UESC
Itapetinga - Abril de 2018



Programa de Pós-Graduação em Física da UESC
Ilhéus - BA, Brasil



Immanuel Kant (1724-1804)

500 páginas para dizer que o espaço e o tempo são “*à priori*”.

à priori: não depende de nenhuma forma de experiência por ser gerado no interior da própria razão.

“É porque o espaço, assim como o tempo, é um quadro que faz parte da própria estrutura de meu espírito. O espaço e o tempo são quadros *a priori*, necessários e universais de minha percepção ... O espaço e o tempo não são, para mim, aquisições da experiência. São quadros *a priori* de meu espírito, nos quais a experiência vem se depositar. Eis por que as construções espaciais do geômetra, por mais sintéticas que sejam, são *a priori, necessárias e universais*.”

A História

- De 1675 (medida da velocidade da luz) ao século XX (cordas);
- Os três conflitos:
 - 1) O paradoxo entre as teorias de *Maxwell* e *Newton*.
→ Solução = Relatividade Especial (1905).
Conceito geométrico do espaço-tempo (1907).
 - 2) Embate entre a teoria gravitacional de *Newton* (transmissão instantânea da ação de forças) e a relatividade especial (a velocidade da luz é finita e demora um certo tempo para ser transmitida).
→ Solução = Teoria da Relatividade Geral (1917).
 - 3) Conflito entre a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral.
→ Solução = Teoria de (super) Cordas (década de 70).

A História

Reformular o conceito de espaço-tempo.

- 1) promover o tempo como elemento essencial (x, y, z, t).**
- 2) estender as dimensões espaciais para unificar as forças da natureza *Kaluza-Klein* (1920) e teoria de cordas (1970).**

Século XVII, *Newton (1642-1727)*: Teoria da Gravitação Universal. A força da gravidade permeia a vida terrestre e a celeste. Antes de *Newton* não se sabia que a maçã que cai da árvore e as órbitas dos planetas em torno do Sol obedecem ao **mesmo princípio físico**.

✓ **1860**: *James Maxwell* unifica a força elétrica e magnética. A previsão extraordinária de que luz é uma onda eletromagnética.

✓ A onda sonora requer um meio para se propagar. Natural pensar que a luz também precisasse um meio para viajar pelo espaço: éter luminífero (*aether luminiferus* = “ar portador de luz”). Elemento estranho e misterioso que preenchia o espaço vazio, remetendo às idéias clássicas da “quinta essência” de Aristóteles.

✓ Século XIX, *Cauchy, Stokes, Lord Kelvin, Planck*, postularam éteres com propriedades diferentes para os fenômenos da natureza (luz, calor, eletricidade e magnetismo).

✓ **1878:** *Maxwell* publicou um artigo propondo a existência de um **único** éter e propôs uma experiência para uma determinação astronômica do efeito do éter através da medida da velocidade da luz usando com as luas de Júpiter em diferentes posições relativas à Terra.

✓ *Maxwell* acabou motivando o físico americano *Albert Michelson* à busca terrestre da influência do éter na velocidade da luz.

✓ Em **1881** *Michelson* (interferômetro) publicou um artigo dizendo que a hipótese sobre a existência de um éter estacionário era **incorreta**.

✓ **1886:** *Lorentz* não acreditou no resultado de *Michelson* e criticou a precisão achando a experiência inconclusiva.

✓ **1887:** *Lord Kelvin* estimulou *Michelson* a repetir a experiência. Junto com *Morley* repetiram e o resultado foi o mesmo (repetiram exaustivamente até 1929).

Resultado: a velocidade da luz é independente da velocidade do observador.

- ✓ **1889:** O físico irlandês *George FitzGerald* publicou na Science um trabalho dizendo que o resultado da experiência de *Michelson-Morley* pode ser explicado somente se: “... o comprimento do corpo material muda, dependendo se o corpo se move na direção do éter ou cruzando-o, por um valor que depende do quadrado da razão v/c ”.
- ✓ **1892:** Para salvar a teoria do éter *Lorentz* escreve contrações similares, motivado por o que ele achava “resultado inconclusivo da experiência de *Michelson-Morley*. Fica sabendo da publicação de *FitzGerald* apenas em 1894.
- ✓ **1898:** O físico irlandês *Joseph Larmor* em “Éter e Matéria” escreve as conhecidas “transformações de *Lorentz*”. Mostra que a contração de *FitzGerald-Lorentz* é mera consequência destas transformações.

- ✓ **1899:** *Lorentz* finalmente escreve as “transformações de Lorentz”. Ele sabia, por ex., que a massa de um elétron aumenta à medida que a velocidade do elétron se aproxima da velocidade da luz.
- ✓ **1900:**
 - A era quântica debuta com *Max Planck*. Ele decreta que a luz se propaga em pacotes discretos (quantum de energia).
 - *Jules Henri Poincaré* na abertura no Congresso de Paris: O éter existe realmente?
- ✓ **1904:** *Poincaré* enuncia o “princípio da relatividade”, o tempo medido depende do observador – a velocidade da luz deve ser um limite físico.†

† Seção de Mat. Apl. do Cong. Int. de Artes e Ciências, St. Louis, 24/09/1904.

✓ **1905:**

- **Poincaré (5 de junho)** “*Sur la dynamic de l’electron*”: Foi ele quem nomeou *as transformações de Lorentz* e mostrou que estas transformações, junto com as rotações formam um grupo de Lie e preservam a “forma quadrática” $dx^2 - dt^2$, coordenadas do espaço-tempo concebidas em um espaço de 4 dimensões.
 - **Einstein (30 de junho)** “*Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*”: O trabalho de Einstein tem uma abordagem diferente. A idéia não é explicar os resultados experimentais. **A ênfase é a beleza e a simplicidade.** Na introdução diz: “...Provaremos que a introdução de um éter para luz é supérflua uma vez que, de acordo com o ponto de vista que desenvolvemos aqui não introduziremos nem um espaço em repouso absoluto favorecido de propriedades especiais nem um vetor velocidade será associado a um ponto do espaço vazio no qual processos eletromagnéticos acontecem”.
- ✓ **1907:** *Hermann Minkowski* propõe que a teoria especial da relatividade pode ser descrita de forma muito elegante usando um espaço tempo quadri-dimensional que combina a dimensão do tempo com as 3 dimensões espaciais. Esse espaço ficou conhecido como Espaço de *Minkowski* (espaço vetorial real) denotado por $R^{1,3}$ com uma métrica.

✓ **1908:** *H. Minkowski* noção geométrica de Espaço-Tempo[†]:

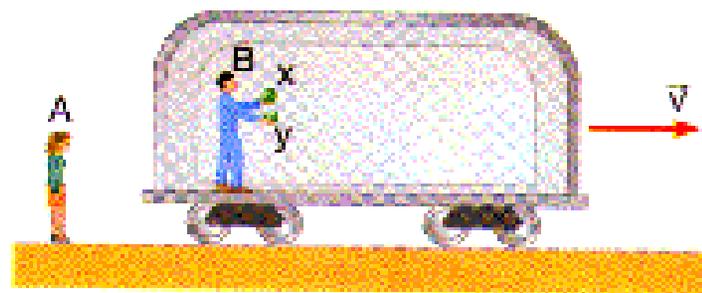
“A forma de pensar sobre o espaço e tempo que eu desejo colocar para vocês teve sua origem no solo da física experimental e daí vem a sua força. Ela é radical. Daqui em diante espaço e tempo como entidades separadas estão fadados à sombra, e apenas a união entre eles preservarão uma realidade independente”

[†] Space and Time - Colonia, 21/09/1908.

Falta de simetria nos fenômenos eletromagnéticos.

Suponha que:

- **A** esteja fixo no solo e **B** segura duas esferas carregadas **x** e **y**.
- **xy** é perpendicular à velocidade do vagão.



Para **B**, as esferas estão em repouso e pela Lei de *Coulomb* sentem uma força eletrostática.

Para **A**, as esferas movem-se em trajetórias paralelas com velocidade **v**.

Então para **A**, além das forças dadas pela Lei de *Coulomb*, há um par de forças magnéticas entre as esferas.

Então a força resultante em cada esfera depende do observador!

Conflito: Na Mecânica Newtoniana quando temos 2 referenciais inerciais (um movendo-se com velocidade constante em relação ao outro) as leis da Mecânica são as mesmas nos dois referenciais.

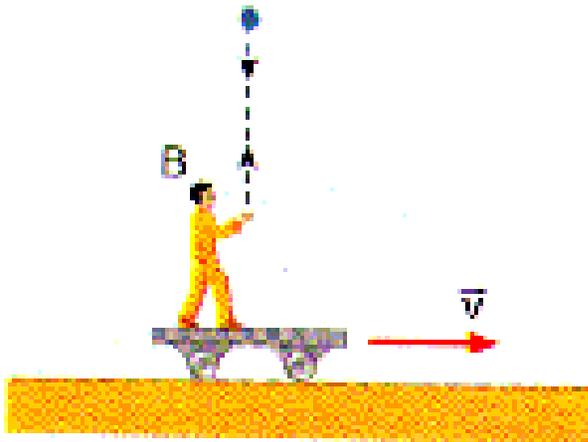


Figura 3

B está sobre um vagão que se move com velocidade constante v em relação ao solo.

Suponhamos que ele jogue uma bola para cima. A bola subirá e cairá novamente na sua mão, do mesmo modo que subiria e cairia se o vagão estivesse em repouso em relação ao solo.

Em nenhuma das situações 3 e 4 pode-se dizer se o vagão está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. Portanto, ao contrário da Mecânica, as leis do Eletromagnetismo pareciam depender do referencial.

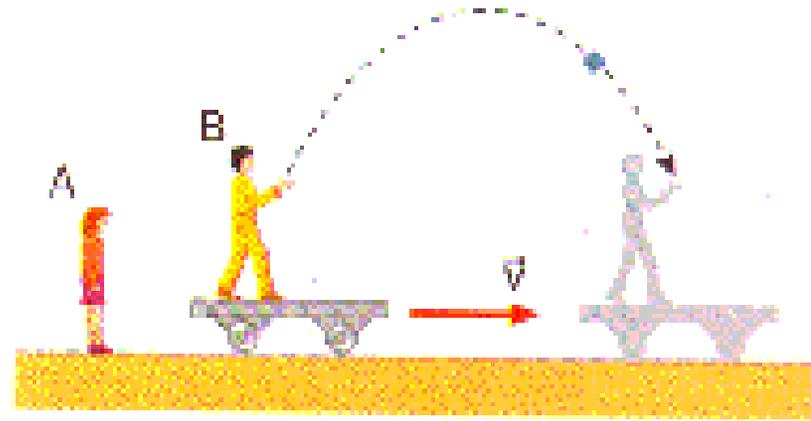


Figura 4

Para um observador **A**, fixo em relação ao solo, a trajetória da bola será uma parábola, e sua velocidade terá valores diferentes para os dois observadores. No entanto, para os dois observadores a aceleração da bola será a mesma (aceleração da gravidade) e a força resultante sobre a bola será a mesma (o peso).

Solução

Einstein escreveu “*Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*”, publicado em 1905 numa revista científica alemã chamada Anais da Física.

O trabalho baseia-se em dois postulados:

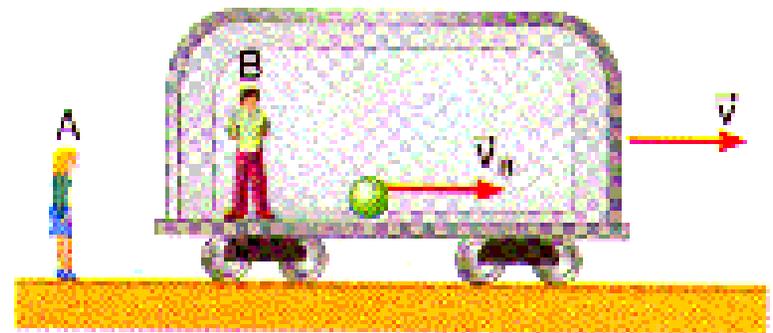
1. Princípio de Relatividade: As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

Portanto, tanto as leis da Mecânica como as leis do Eletromagnetismo devem ter a mesma forma em qualquer referencial inercial.

2. Referente à velocidade da luz: A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em qualquer referencial inercial, independentemente da velocidade da fonte de luz.

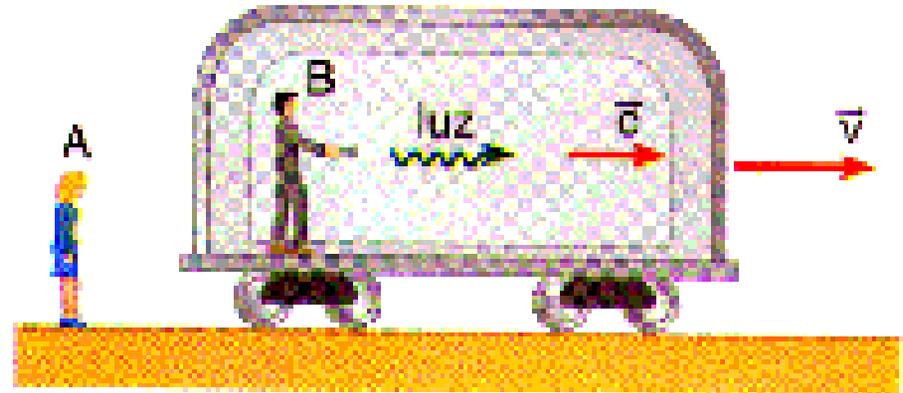
O segundo postulado foi o mais difícil de ser aceito, pois contraria nossa experiência diária. Vejamos como a situação é descrita na Mecânica Newtoniana.

A está fixo em relação ao solo. Um vagão move-se com velocidade v em relação ao solo. Dentro do vagão há uma bola que se move com velocidade v_B em relação ao vagão. Para **B** que está fixo em relação ao vagão, a velocidade da bola é v_B . No entanto, para **A** a velocidade da bola é $v_B + v$.



No caso da luz, as coisas são diferentes!

A fixo em relação ao solo, observa um vagão cuja velocidade em relação ao solo é v .

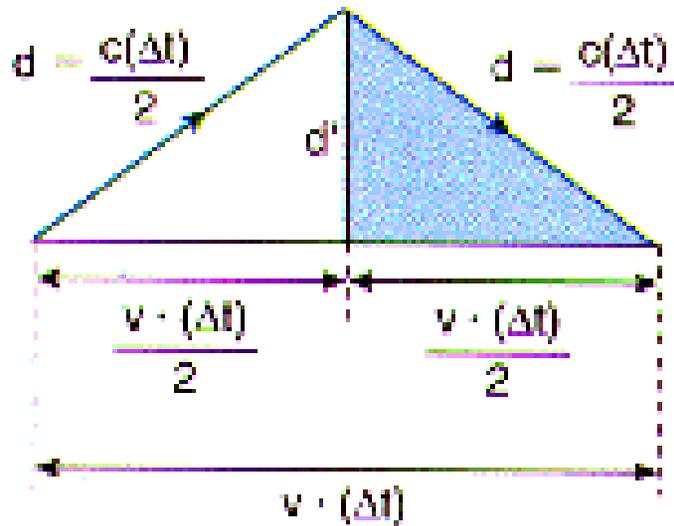
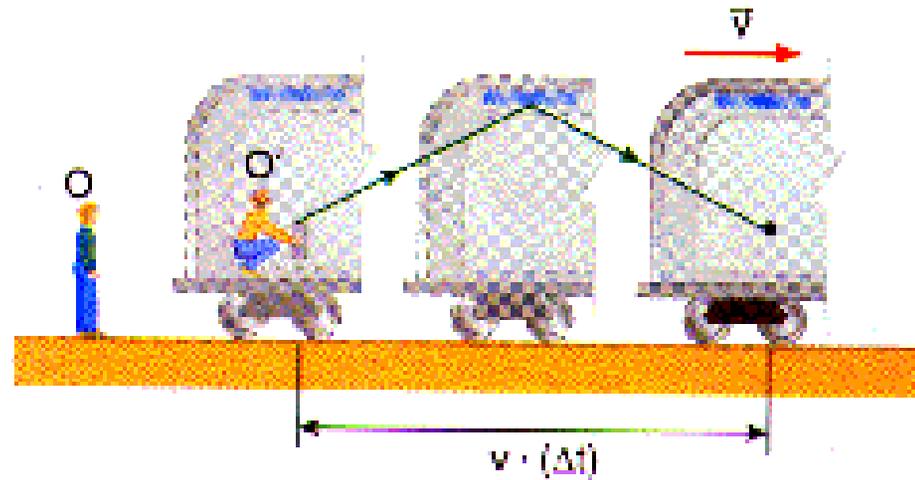
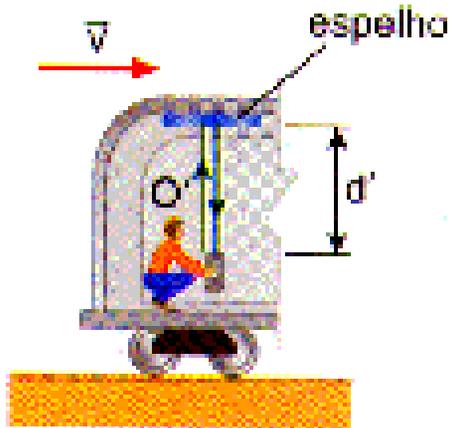


B dentro do vagão acende uma lanterna de modo que, para o observador **B** a velocidade da luz é c . Segundo postulado de Einstein, para **A** a velocidade da luz emitida pela lanterna também é c , e não $c + v$. Tanto para **A** como para **B** a velocidade da luz é c !

O segundo postuldo tornou desnecessária a idéia da existência de um éter luminoso. Na época, a maioria dos físicos acreditava que a luz precisava de um meio para se propagar, do mesmo modo que o som precisa do ar ou de outro meio material.

Fótons não precisam de meio para se propagarem!

A Relatividade do Tempo



O' dentro do vagão emite um sinal de luz $2d' = c \cdot (\Delta t')$ (I)

O fora do trem mede um tempo Δt para o percurso da luz. Para ele o deslocamento do trem foi igual a $v \cdot (\Delta t)$ enquanto o deslocamento da luz foi: $2d = c \cdot (\Delta t)$ (II)

De **(I)** e **(II)**, temos:

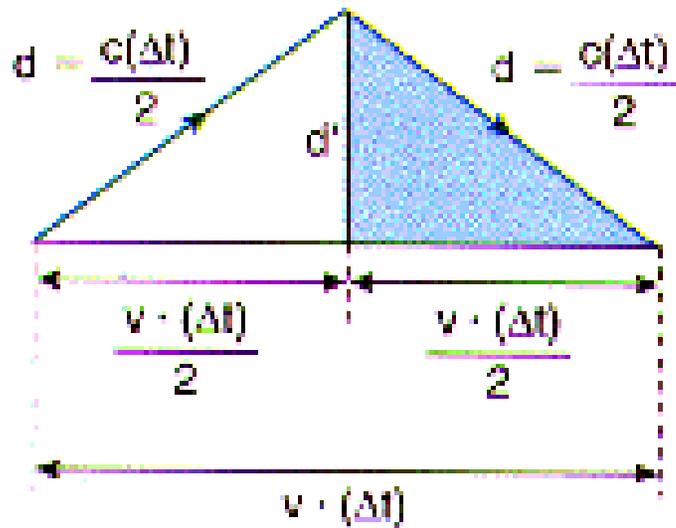
$$2d' = c.(\Delta t') \rightarrow \Delta t' = 2d'/c$$

$$2d = c.(\Delta t) \rightarrow \Delta t = 2d/c$$

Como $d' < d$, temos: $\Delta t' < \Delta t$

Concluimos que um relógio que se move em relação a nós, “anda” mais devagar do que nosso próprio relógio. Isso vale para todos os processos físicos, reações químicas e processos biológicos.

Vamos relacionar Δt com $\Delta t'$. Aplicando o teorema de Pitágoras:



$$d^2 = (d')^2 + \left[\frac{v \cdot (\Delta t)}{2} \right]^2$$

$$\text{ou : } \left[\frac{c \cdot (\Delta t)}{2} \right]^2 = \left[\frac{c \cdot (\Delta t')}{2} \right]^2 + \left[\frac{v \cdot (\Delta t)}{2} \right]^2$$

$$c^2 (\Delta t)^2 = c^2 (\Delta t')^2 + v^2 (\Delta t)^2$$

$$c^2 (\Delta t)^2 - v^2 (\Delta t)^2 = c^2 (\Delta t')^2$$

$$(c^2 - v^2)(\Delta t)^2 = c^2 (\Delta t')^2$$

$$(\Delta t)^2 = \frac{c^2 (\Delta t')^2}{c^2 - v^2}$$

$$(\Delta t)^2 = \frac{c^2 (\Delta t')^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}$$

$$(\Delta t)^2 = \frac{(\Delta t')^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Para Newton o tempo é absoluto, não importa o movimento relativo entre os corpos.

Evidências da dilatação temporal → desintegração do múon

Múons em repouso se desintegram com uma vida média de $2,2 \times 10^{-6}$ s, são criados na alta atmosfera (raios cósmicos) e têm velocidade próxima à da luz: $v = 2,994 \times 10^8$ m/s.

Portanto, entre o momento em que são criados e o momento em que se desintegram, deveriam percorrer em média, uma distância de:

$$d = v \cdot (\Delta t) \quad d = (2,994 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (2,2 \times 10^{-6} \text{ s}) \quad \rightarrow \quad d = 650 \text{ m}$$

Como podemos observar múons na superfície da Terra?

Para um referencial fixo na Terra, temos: $\Delta t = \Delta t' [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$

Como: $v/c = 0,998$ e $(v/c)^2 = 0,996 \rightarrow [1 - (v/c)^2]^{1/2} = 0,063$

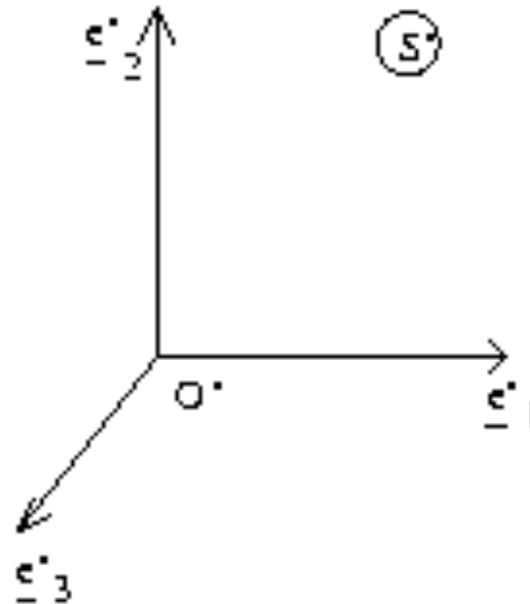
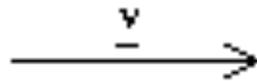
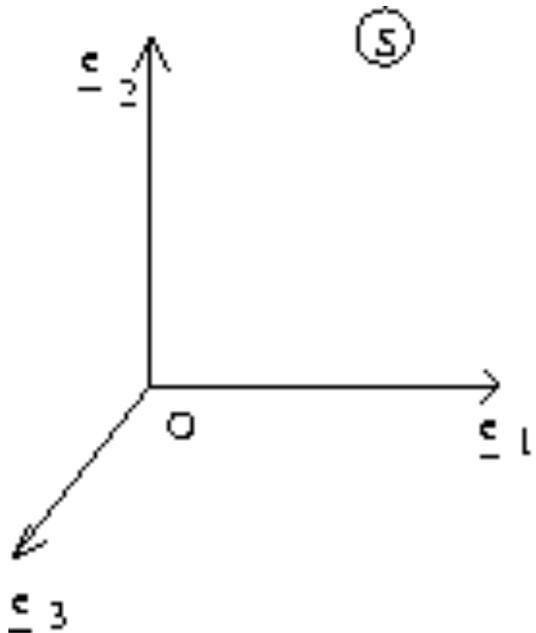
Portanto: $\Delta t = \Delta t' [1 - (v/c)^2]^{1/2} = 2,2 \times 10^{-6} / 0,063 = 35 \times 10^{-6} \text{ s}$

Na Terra, a distância percorrida pelo múon antes de desintegrar-se é:

$$D = v \cdot (\Delta t) = (2,994 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (35 \times 10^{-6} \text{ s}) \rightarrow D = 10.000 \text{ m}$$

Transformações de Lorentz

Conjunto de equações que relaciona as medições entre um referencial em movimento ($C = O'$) e um referencial em repouso (B). A velocidade relativa entre eles é v , paralela ao eixo x . Quando a velocidade for zero ou muito, pequena (comparada à velocidade da luz), nós recuperamos as transformações de *Galileu*, válido para a física newtoniana.



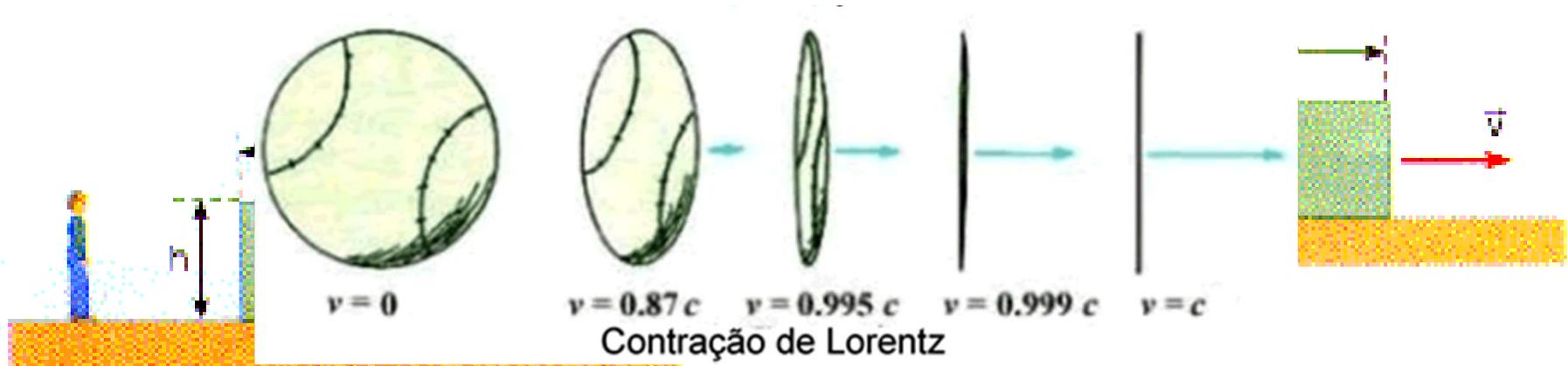
$$x_{O'} = \frac{x_O - vt_O}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y_{O'} = y_O, \quad z_{O'} = z_O$$

$$t_{O'} = \frac{t_O - \frac{v x_O}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

A relatividade das outras grandezas

- ✓ Do **tempo**: dilatação temporal;
- ✓ Do **espaço**: contração de *Lorentz*, um objeto que se move fica mais curto na direção do movimento.



- ✓ Da **energia**: em setembro de 1905 *Einstein* publicou “*A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?*”. Mostrou que a massa inercial de um corpo varia toda vez que esse corpo ganha ou perde energia, qualquer que seja o tipo de energia.

$$\Delta E = (\Delta m) \cdot c^2$$

- ✓ Da **massa**: quanto mais rápido um objeto se mover mais energia ele terá e pela fórmula de *Einstein* maior será a sua massa. A massa aumenta à medida que aumenta a velocidade. Na velocidade da luz um corpo adquire uma massa infinita.

O Conflito

A incompatibilidade entre a Gravidade Newtoniana e a
Relatividade Especial



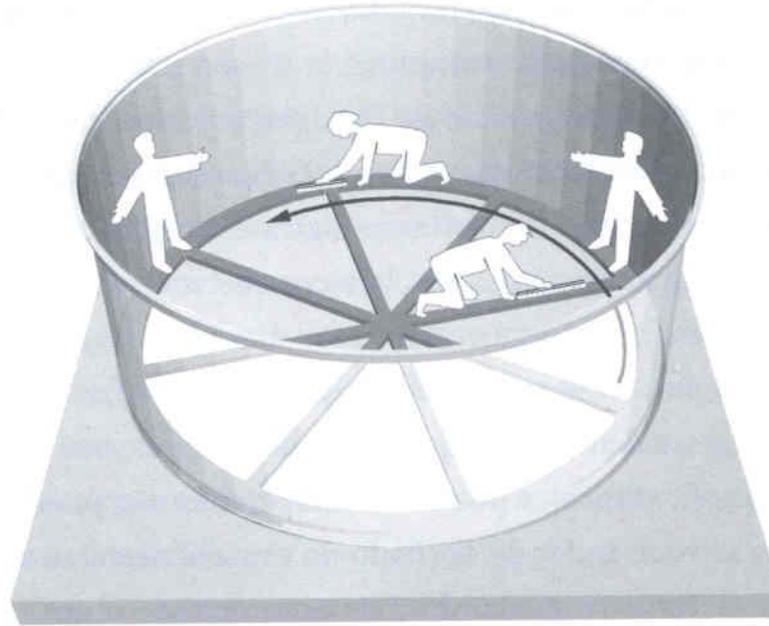
Nenhuma informação pode ser transmitida com velocidade maior do que a da luz. **Nada é mais rápido do que um fóton!**

A teoria da gravitação de *Newton* diz, por exemplo, que se o Sol explodisse de repente a Terra que está a 150 milhões de quilômetros sentiria instantaneamente uma mudança na sua órbita.

**Mas, a luz demora 8 minutos para chegar do Sol até a Terra!
Como pode?**

Na solução do problema *Einstein* percebeu que a **gravidade e o movimento acelerado** estão intimamente entrelaçados e o **elo** que existe entre eles é a **curvatura do espaço**.

O Conflito



C mede a circunferência: Ele coloca a régua no chão para medir. Como a régua está na direção do movimento, ela se encurta (contração de Lorentz: comprimento menor na direção do movimento) e terá que ser usada mais vezes e portanto **C** mede um tamanho menor do que o nosso.

R mede o raio: Ele coloca a régua e obtém o mesmo que nós, pois a cada instante a régua não está apontada na direção do movimento e seu comprimento não sofre contração.

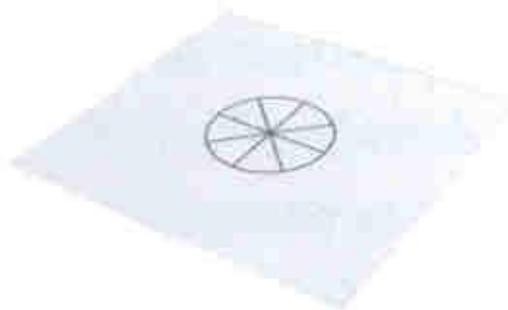
Quando calculamos a razão entre a circunferência e o raio, temos:

$$C/R > 2\pi$$

Como pode um círculo violar o antigo postulado grego ?

$$C = 2\pi \cdot R$$

Explicação de *Einstein*: O resultado dos gregos vale para círculos desenhados em uma superfície plana. Para círculos desenhados em superfícies não planas as circunferências não são iguais.



(a)



(b)



(c)

Necessidade de generalizar a geometria para espaços curvos!

OBS: A rigor esse exemplo tem *sutilezas* e vamos argumentar como o próprio *Einstein*. Você pode estar pensando porque o chão do carrossel não se contrai como a régua. Lembre-se que o carrossel esteve sempre em movimento, nunca o analisamos em repouso. Como observadores estacionários a única diferença entre as medidas feitas por nós e por **C** tem origem na contração de Lorentz que a régua de **C** sofreu. Mas, e se o carrossel parar? Aparentemente teríamos que levar em conta que a circunferência se altera mas como pode ser compatível com o raio imutável? Esse problema é sutil e tem a ver com o fato de que não há objetos inteiramente rígidos no mundo real[†].

[†] Ver: *Einstein and the Rigidly Rotating Disk*, Stachel.

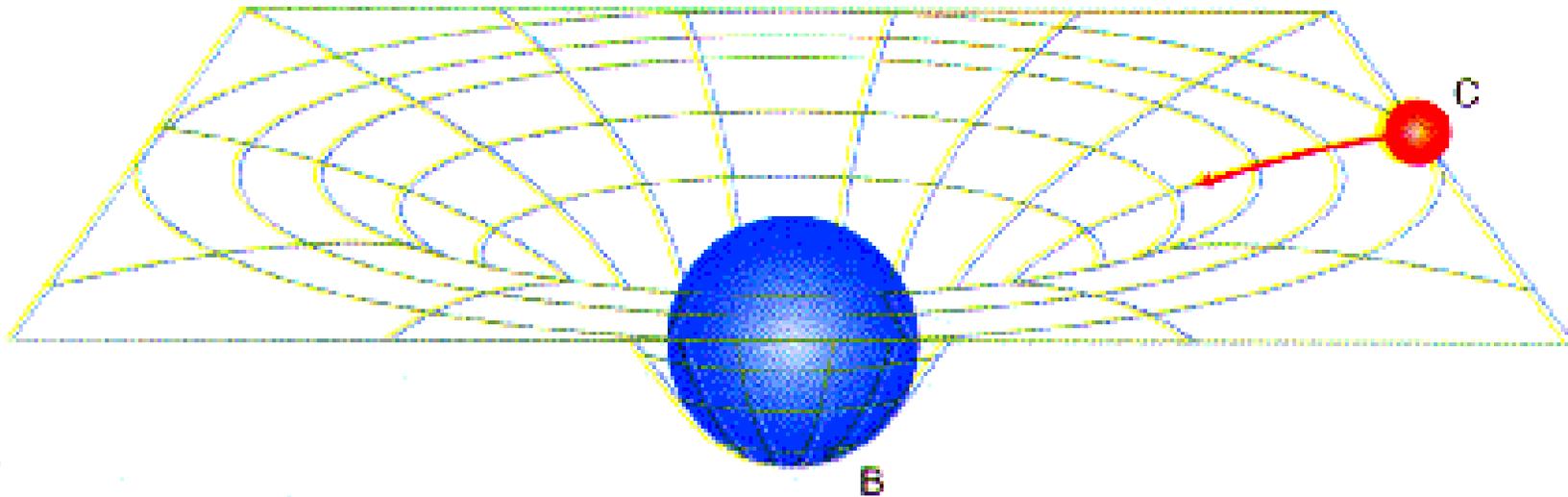
Solução do conflito → A Relatividade Geral

Em 1905, na Relatividade Especial considera as leis da Física em **referenciais inerciais**.

Em 1915, *Einstein* publica a Teoria da Relatividade Geral em que analisa as leis da Física em **referenciais acelerados** e desenvolve uma nova teoria da gravitação.

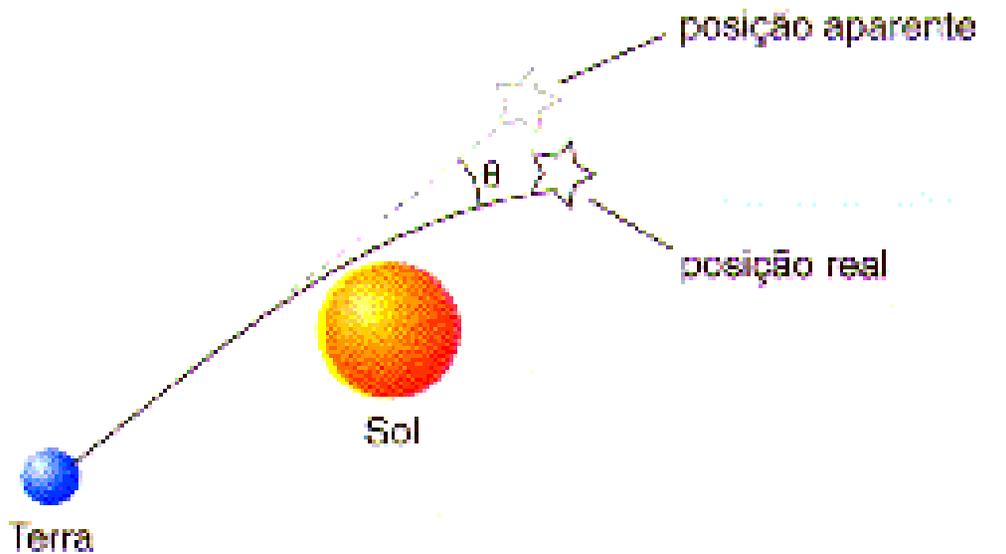
Einstein abandona a noção Newtoniana de força e introduz a noção de espaço curvo.

Os corpos produzem em torno de si uma curvatura do espaço, sendo que, quanto maior a massa do corpo, maior será a curvatura.

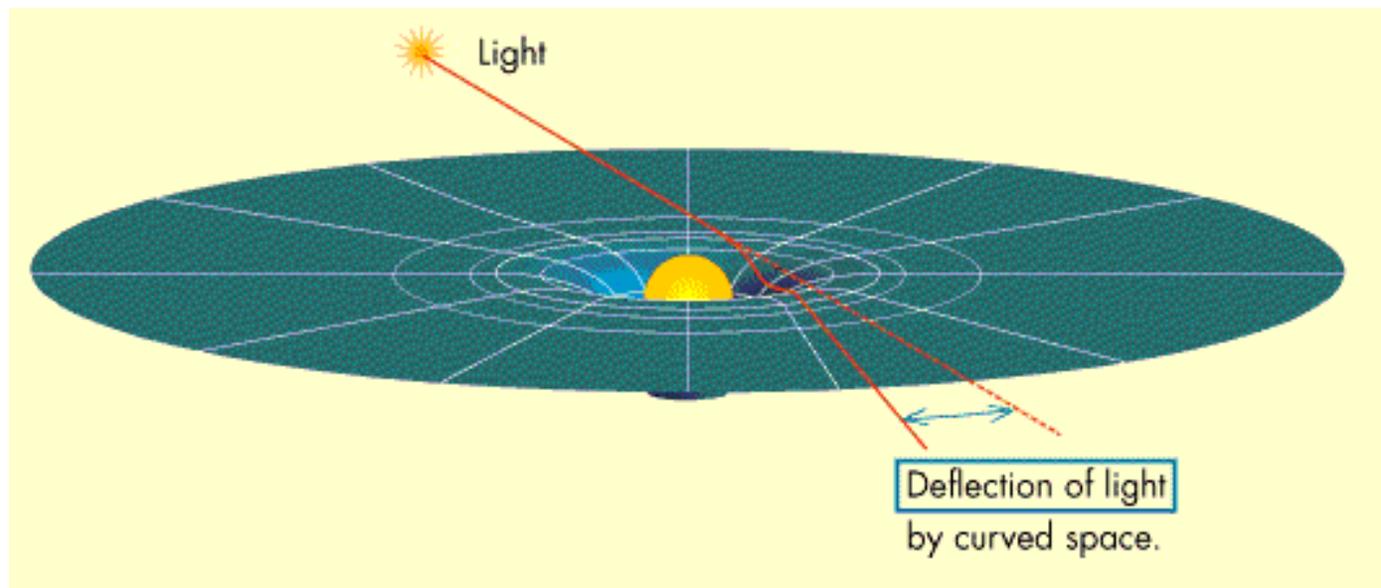
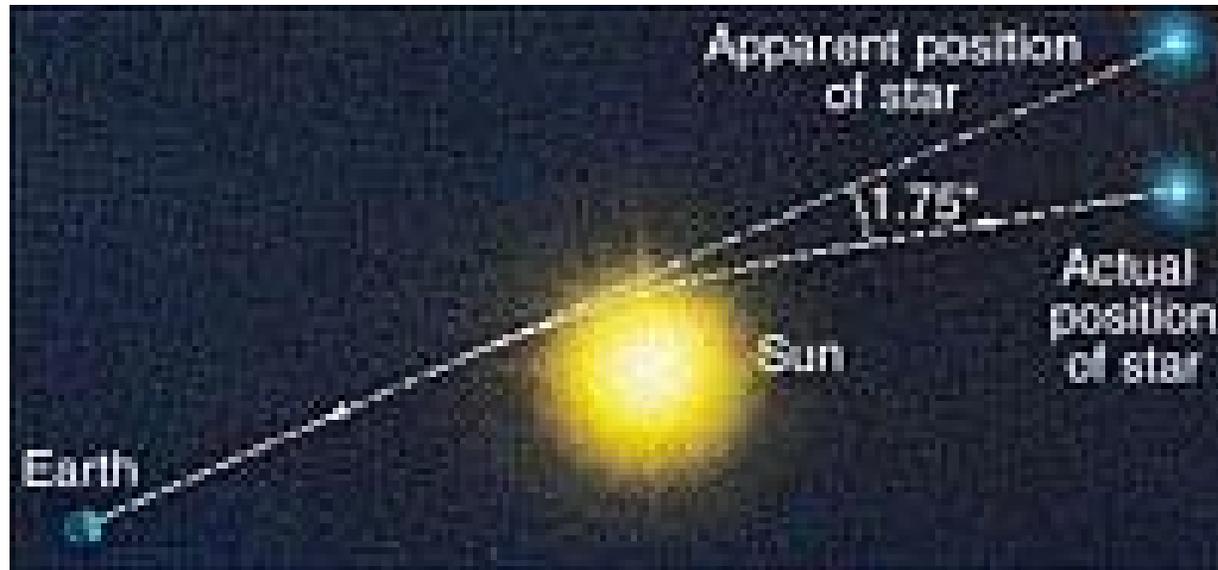


A Teoria de *Einstein* previa que a luz também seria atraída pelos corpos, mas esse efeito seria pequeno e, assim, só poderia ser observado quando a luz passasse perto de corpos de grande massa, como por exemplo, o Sol.

Novembro de **1915**, *Einstein* calculou o ângulo do desvio da posição de uma estrela cuja luz passaria rente ao Sol e obteve $\sim 0,000049$ equivalente à lateral de uma moeda vista à 3 km.



Eclipse solar previsto para 29 de maio de 1919. A pedido de *Sir F. Dyson*, diretor do observatório de Greenwich *Sir Eddington* organizou uma equipe de astrônomos ingleses para ir a Sobral, no Ceará, e outra para a ilha de Príncipe (África Ocidental). A equipe de Sobral foi mais feliz, pois na ilha de Príncipe, o céu estava encoberto.



O Terceiro Conflito

3) Conflito entre a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral.

→ Solução = Teoria de (super) Cordas (década de 70).

Precisamos voltar à história!

A velha mecânica quântica que teve seu início com *Niels Bohr* e seu modelo atômico em **1913** moderniza-se na linguagem de *Werner Heisenberg*, *Erwin Schrödinger* (com sua equação de onda em **1926**) e se consolida nos anos **30**.

Mecânica Quântica: Dualidade onda-partícula → Probabilidade

A mecânica quântica revela que em escalas atômicas e sub-atômicas o universo tem propriedades ainda mais espantosas. Desde a formulação do princípio de incerteza por *Heisenberg* em **1927** o mundo nunca mais foi o mesmo.

O princípio de incerteza de *Heisenberg* afirma que as flutuações rápidas de energia e momento permeiam todo o universo em escalas microscópicas do espaço tempo.

Anos 30 e 40, *Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga e Richard Feynman* → entendem esse caos microscópico. Percebem que a equação de *Schrödinger* era incompleta pois não considerava a relatividade especial.

Na tentativa de compatibilizar a **relatividade especial** e a física quântica para abordar a força eletromagnética interagindo com a matéria formulou-se a **eletrodinâmica quântica EDQ ou QED**. Essa teoria é uma **teoria quântica de campos relativística**.

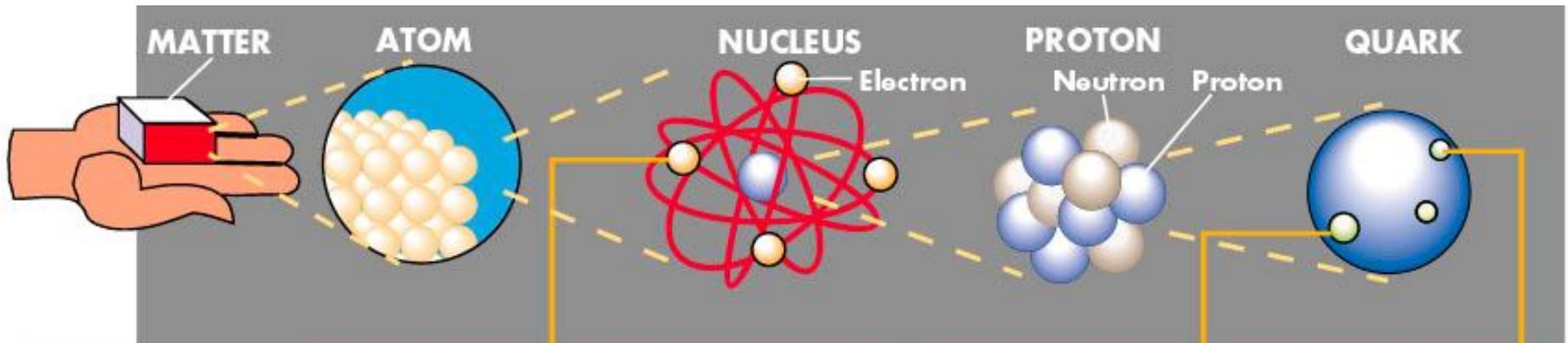
Teoria Quântica: incorpora probabilidades e incertezas.

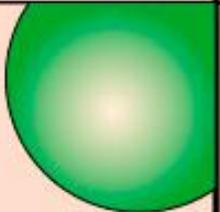
Teoria de Campo: associa os princípios quânticos com a noção clássica de força.

Relativística: incorpora a relatividade especial.

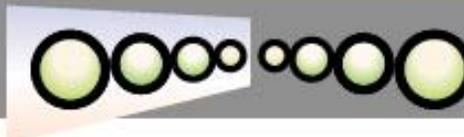
A teoria quântica de campos permite processos com **criação de partículas**.

QED: Ou em português **EDQ (EletroDinâmica Quântica)** é a teoria mais precisa sobre os fenômenos naturais jamais formulada → o fóton é a menor quantidade de luz.



<p>ALL ORDINARY MATTER BELONGS TO THIS GROUP.</p> 	LEPTONS		QUARKS	
	<p>Electron</p> <p>Electric charge -1 Responsible for electricity and chemical reactions</p>	<p>Electron neutrino</p> <p>Electric charge 0. Rarely interacts with other matter</p>	<p>Up (u)</p> <p>Electric charge $+2/3$ Protons have 2 Up quarks, Neutrons 1</p>	<p>Down (d)</p> <p>Electric charge $-1/3$ Protons have 1 Down quark, Neutrons 2</p>
<p>FOR THE MOST PART, THESE PARTICLES EXISTED IN THE EARLY MOMENTS AFTER THE BIG BANG.</p> 	<p>Muon</p> <p>A heavier relative of the Electron</p> 	<p>Muon neutrino</p> <p>Created with muons when some particles decay</p> 	<p>Charm (c)</p> <p>A heavier relative of the Up</p> 	<p>Strange (s)</p> <p>A heavier relative of the Down</p> 
	<p>Tau</p> <p>Heavier still</p> 	<p>Tau neutrino</p> 	<p>Top (t)</p> <p>Heavier still</p> 	<p>Bottom (b)</p> <p>Heavier still</p> 

ANTIMATTER Each particle also has an antimatter counterpart ... sort of a mirror image.



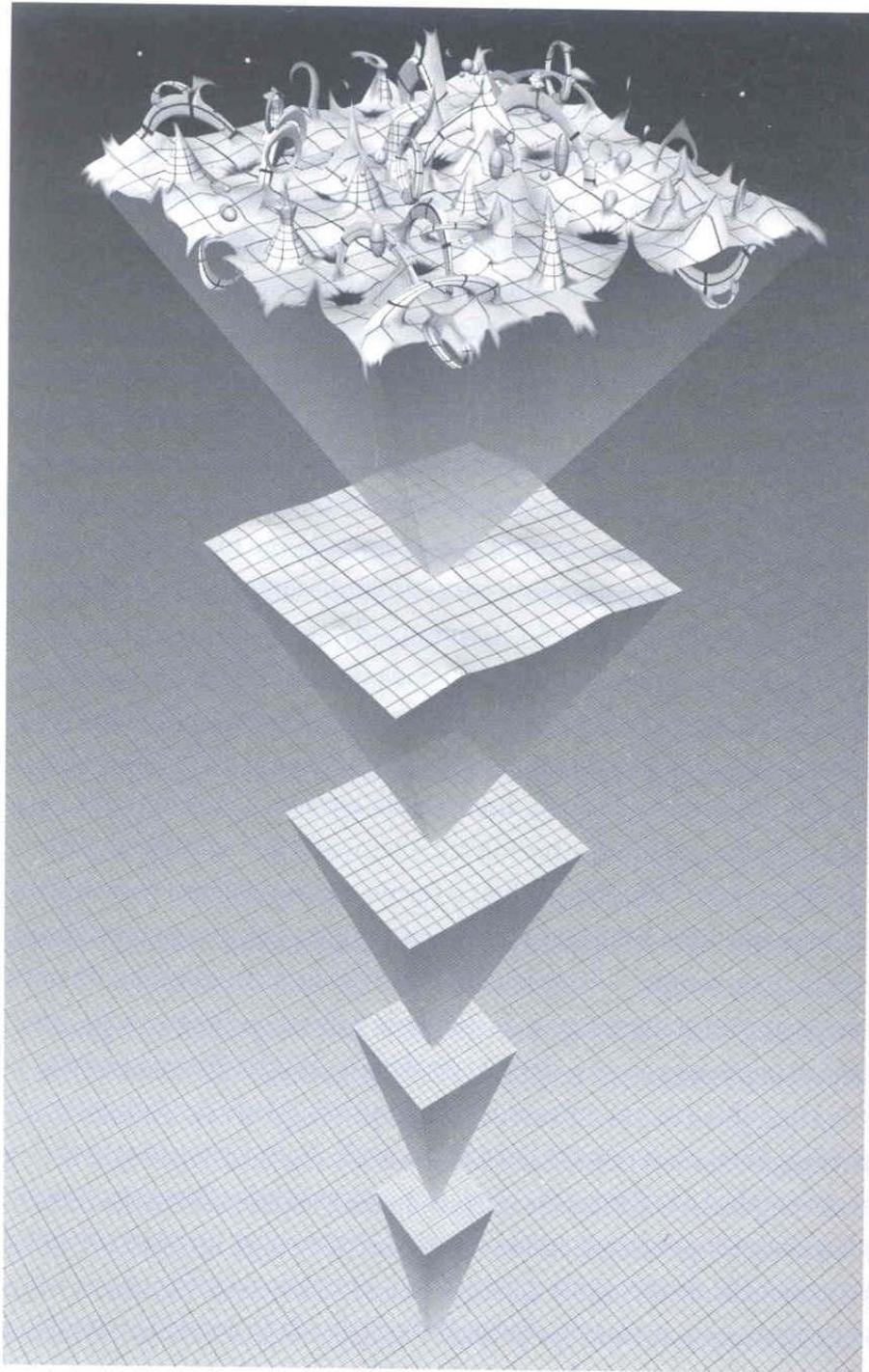
O que faltava então?

Compatibilizar a Mecânica Quântica com a Teoria da Relatividade Geral.

Examinar a estrutura microscópica do espaço-tempo pois tudo está sujeito às flutuações quânticas, até mesmo o campo gravitacional.

Na prática o conflito aparece de maneira bem concreta. Cálculos que levem em conta a relatividade geral e a mecânica quântica produzem resultados **infinitos!**

Dizemos que a teoria não é **renormalizável, este é o principal defeito da gravitação quântica.**

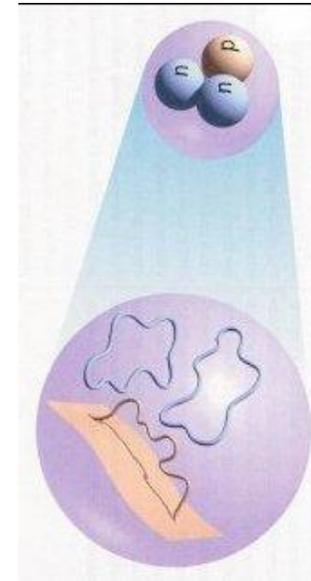
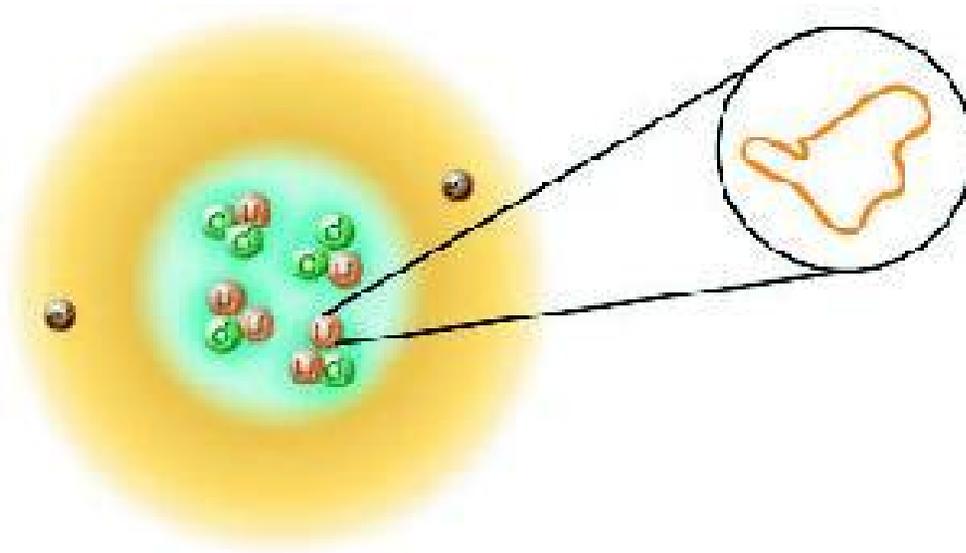


Classicamente o espaço vazio tem um campo gravitacional igual a zero mas segundo a mecânica quântica o campo é zero na **média**, mas seu valor real oscila quânticamente.

Em escalas do mundo cotidiano temos uma geometria suave de forma que o tecido do universo volte a ter precisão.

Solução: Teoria de cordas

Os tijolos elementares formadores do universo não seriam mais partículas puntiformes mas sim filamentos unidimensionais como elásticos infinitamente finos e pequenos que vibram produzindo as partículas que conhecemos. O tamanho das cordas é da ordem do comprimento de *Planck* (10^{-33} cm).



Período Pré-Cordas

A idéia das dimensões extras tem origem na busca por uma **teoria unificada** das forças observadas na natureza.

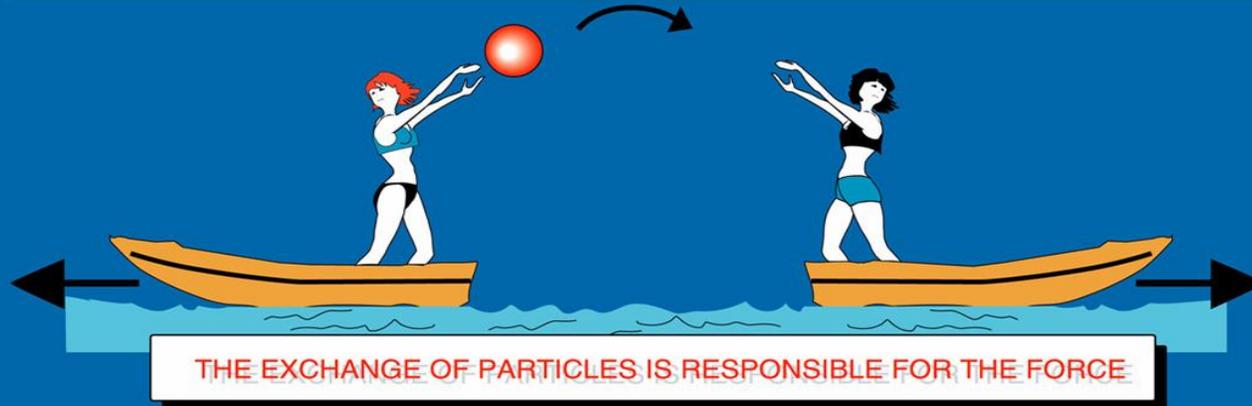
1919: *Theodor Kaluza* unificou o Eletromagnetismo e a Relatividade Geral. Idéia básica: postular uma dimensão espacial extra (a 5ª dimensão), com a condição que todos os campos fossem independentes desta dimensão extra. A teoria tinha campos de gravidade pura em 5 dimensões na qual, por causa da independência da 5ª coordenada os campos podiam ser expressos com campos quadri-dimensionais. A idéia segue a linha de Minkowski que usou a 4ª dimensão para entender o "espaço-tempo contínuo".

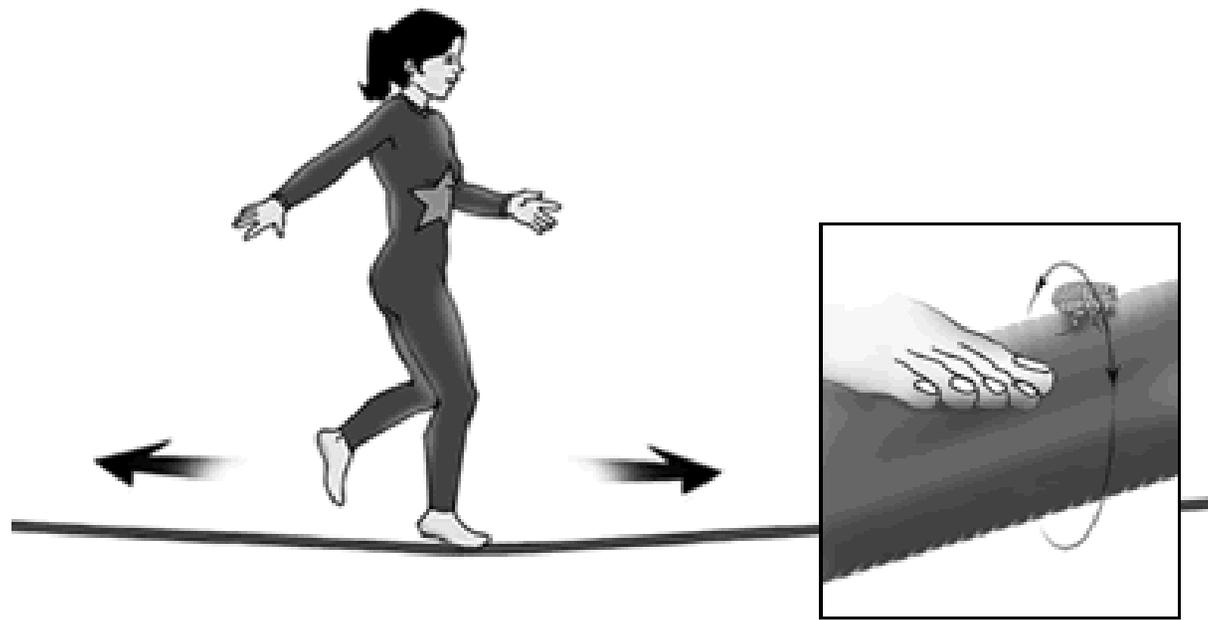
1921: *Kaluza* publicou sua teoria com o encorajamento de *Einstein* e ela se tornou a estrutura básica para a Teoria Geral da Relatividade.

1926: *Oskar Klein* em vez de considerar a independência dos campos com relação à 5ª coordenada, assumiu que a nova dimensão fosse compacta. Isso significa que a 5ª dimensão deveria ter a topologia de um círculo (raio da ordem do comprimento de Planck); A topologia do espaço tempo: $R^4 \times S^1$. Nossa percepção usual de espaço tempo não nos permitiria observar essa dimensão extra.

The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES





Cordas

A teoria de *Kaluza-Klein* é uma das sementes da teoria de cordas moderna. Teoria de cordas propõe uma mudança profunda no modo de sondar teoricamente as propriedades ultramicroscópicas da natureza.

O caminho foi longo: começou em **1968** com o trabalho de *Gabriele Veneziano*. O preço que se pagava, no entanto era uma teoria definida em **26 ou 10 dimensões**. Na verdade na época era mais uma proposta alternativa para descrever a força forte (muitas falhas).

Passou pelas mãos de *Yoichiro Nambu* entre outros.

Na década de 70 o sucesso experimental da QCD (teoria puntiforme das partículas – Modelo Padrão) quase enterrou a teoria de cordas.

Em **1974** *Schwartz* e *Joël Scherk* descobriram que umas das vibrações das cordas correspondia a uma partícula com as mesmas propriedades do **gráviton**.

Em **1984** *Michael Green* e *John Schwartz* produziram os primeiros resultados convincentes de que a teoria de supercordas podiam ser a solução ao terceiro conflito.

**O modelo padrão
QCD** { **Não incorpora a força gravitacional**
Não dá explicações sobre os detalhes da sua construção.
O “material” que faz o elétron (carregado) é diferente do
“material” do neutrino (neutro)

Teoria de cordas { **Radicalmente diferente!**
O “material” de todas as manifestações da matéria é o
mesmo. As partículas diferentes são apenas cordas
vibrando em padrões diferentes.
Dimensões extras!!!!

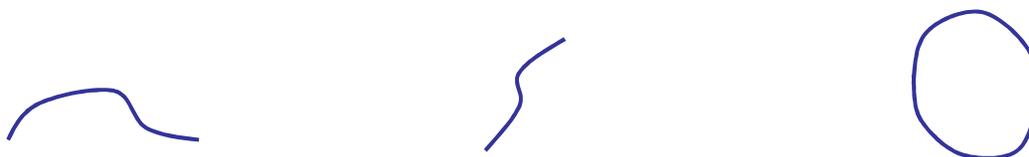
As dimensões extras podem ser compactificadas!

Como obter o mundo 4-dimensional em que vivemos ?

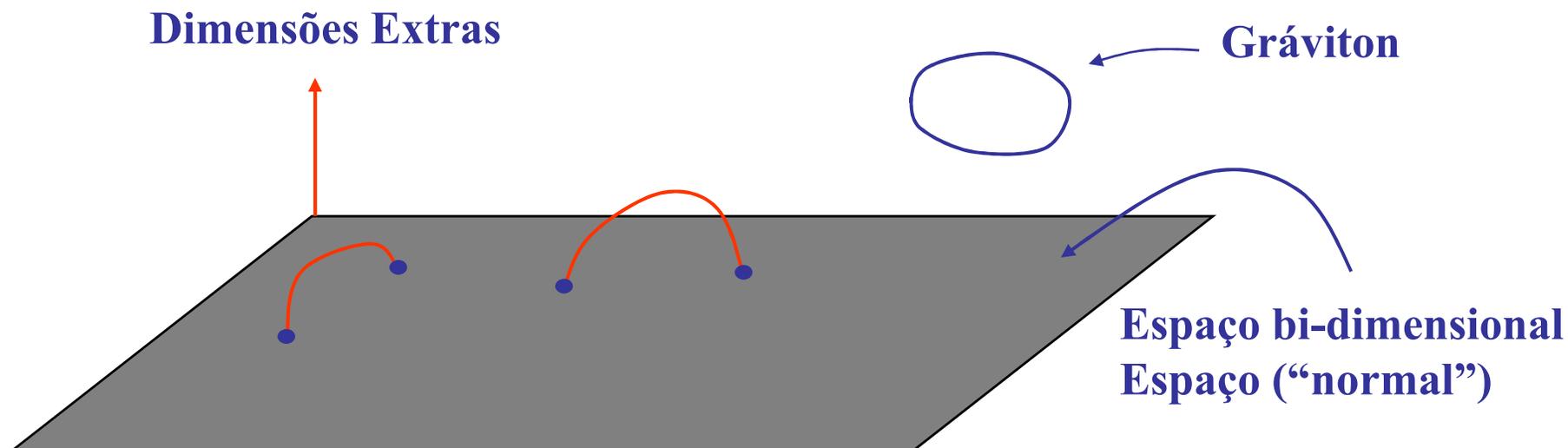
Há duas propostas:

1. Enrole as dimensões extras em um espaço pequeno mas ainda assim interessante por si mesmo: Compactificação tipo *Kaluza Klein*.
2. Faça as dimensões extras realmente grandes mas com a condição de que a luz se propague em um subespaço quadridimensional: **braneworlds**.

Partículas como Super Cordas



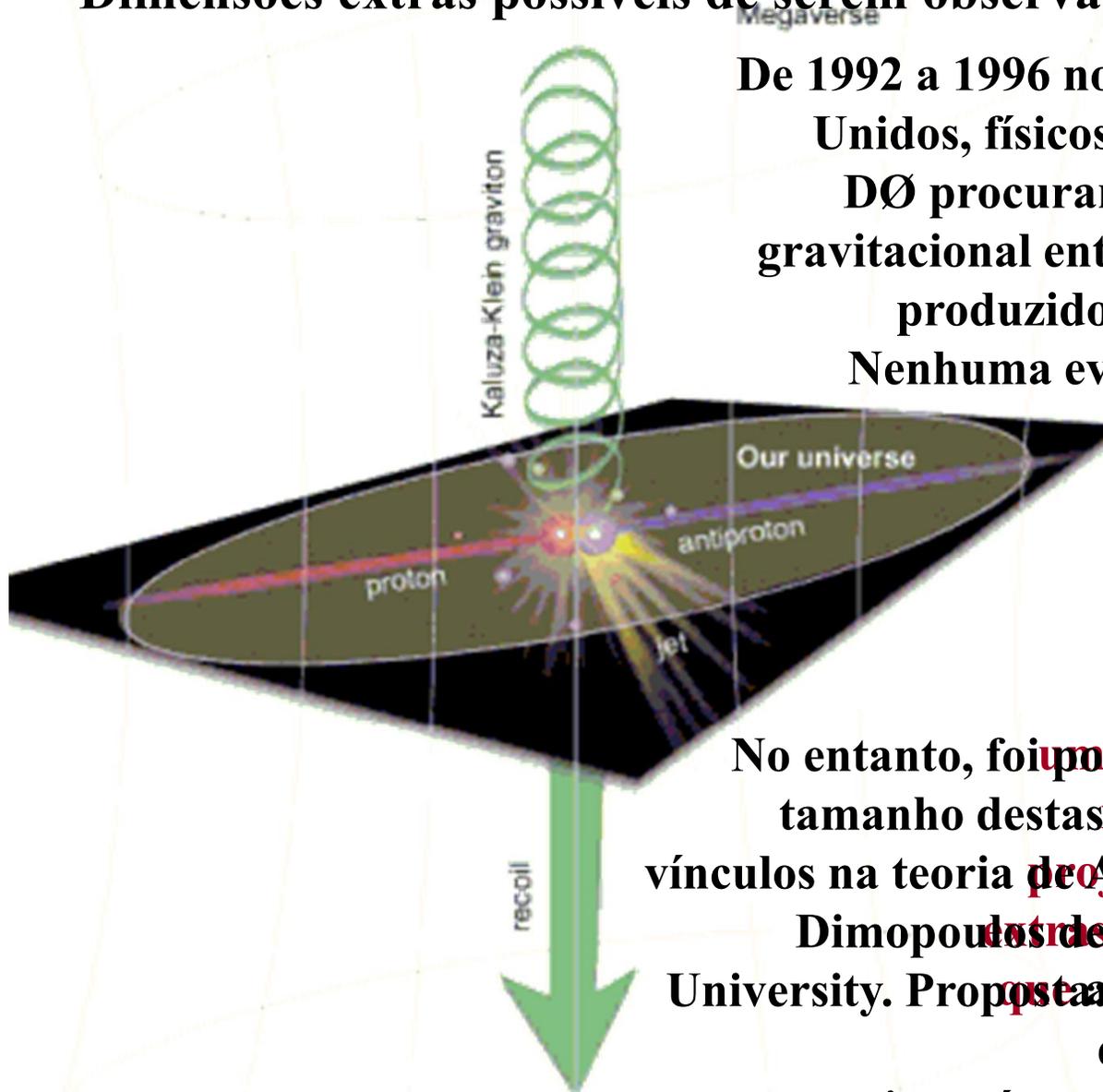
Cordas e dimensões extras:



Dimensões Extras: A busca experimental

Dimensões extras possíveis de serem observadas em anéis de colisão:

De 1992 a 1996 no Tevatron, Fermilab, Estados Unidos, físicos trabalhando no experimento DØ procuraram pelos efeitos da interação gravitacional entre pares de elétrons ou fótons produzidos em colisões a altas energias. Nenhuma evidência de dimensão extra foi encontrada.

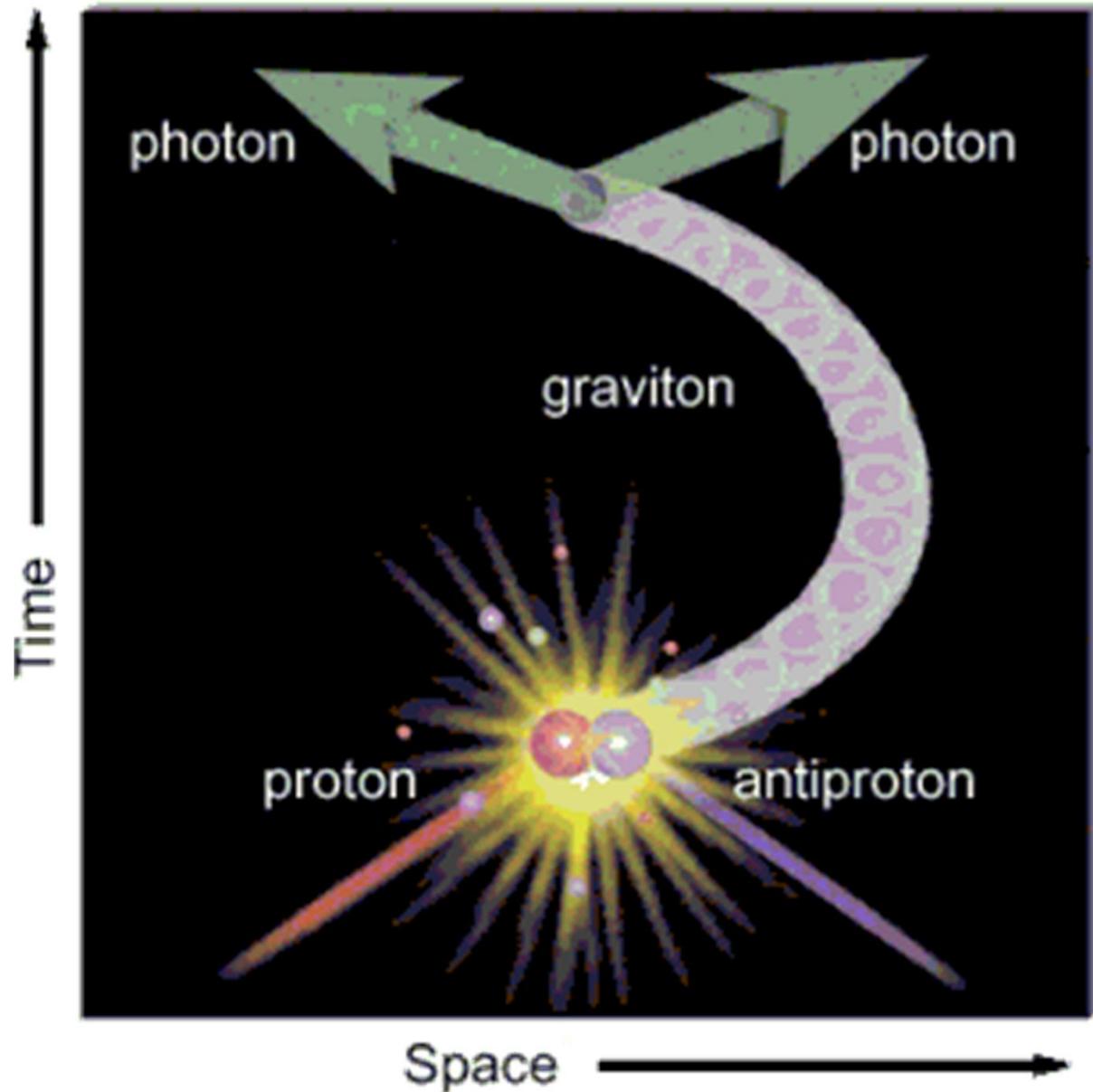


No entanto, foi impossível estabelecer limites para o tamanho destas dimensões. Estes limites impõe vínculos na teoria de Arkani-Hamed, Dimopoulos e Dvali da Stanford University. Proposta que não agiu em mais do que 3 dimensões espaciais – o que sentimos é apenas parte do seu efeito.

Dimensões Extras: A busca experimental

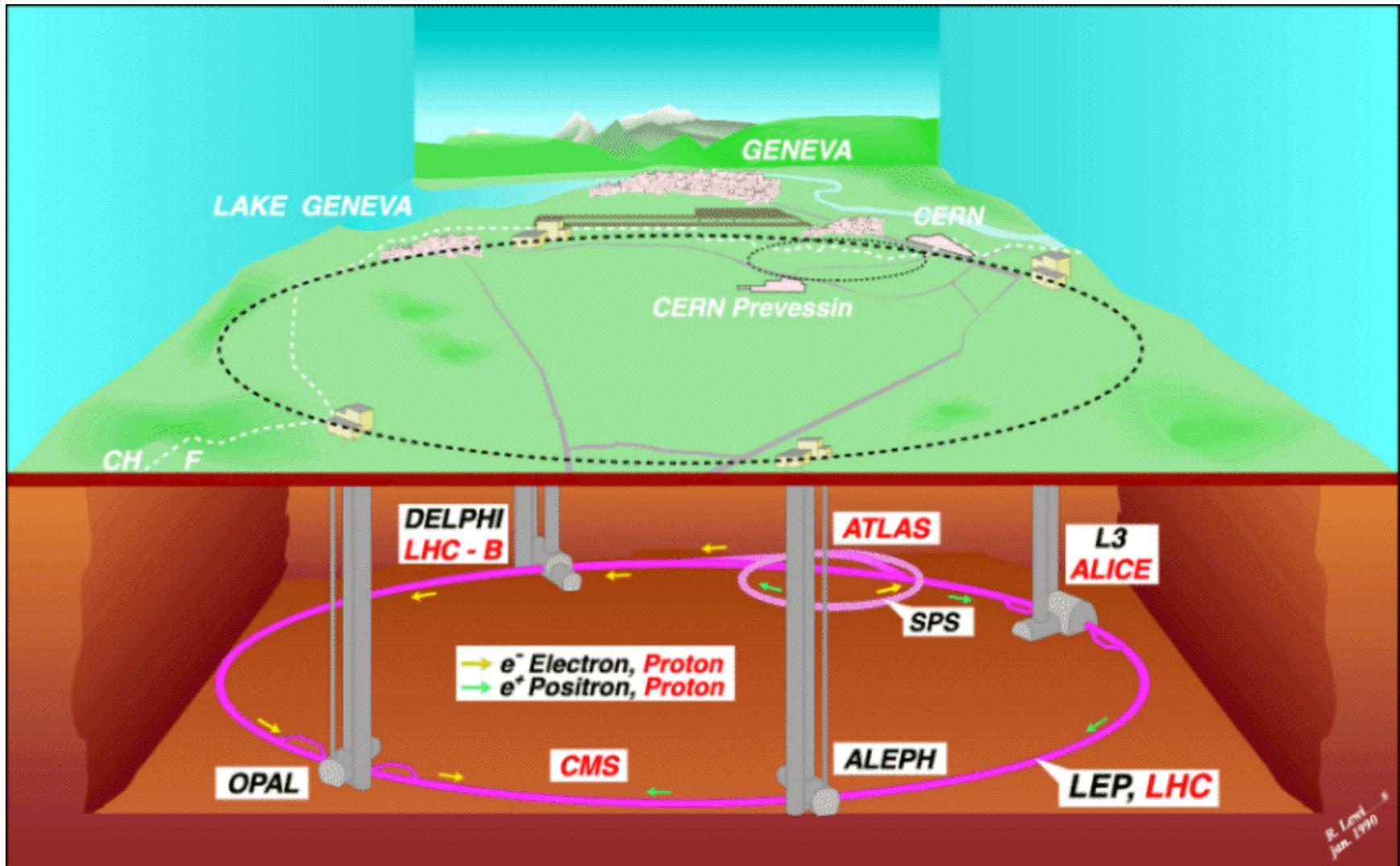
Dimensões extras possíveis de serem observadas em anéis de colisão:

um gráviton abandona nosso mundo por um breve lapso de tempo para voltar em seguida e decair em um par de fótons.



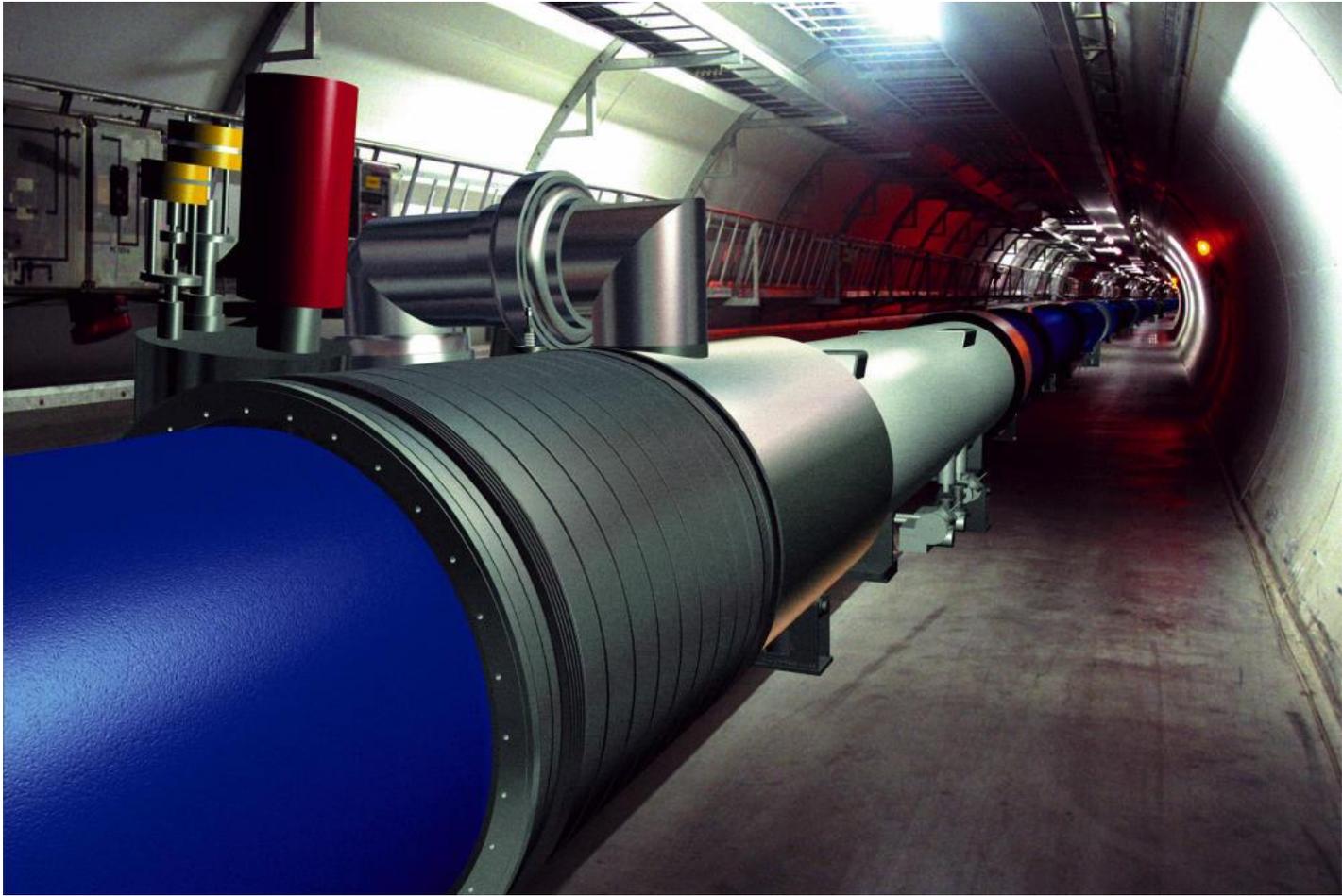
Um experimento não conclusivo não determina o fim da busca!

A busca não terminou: **LHC**

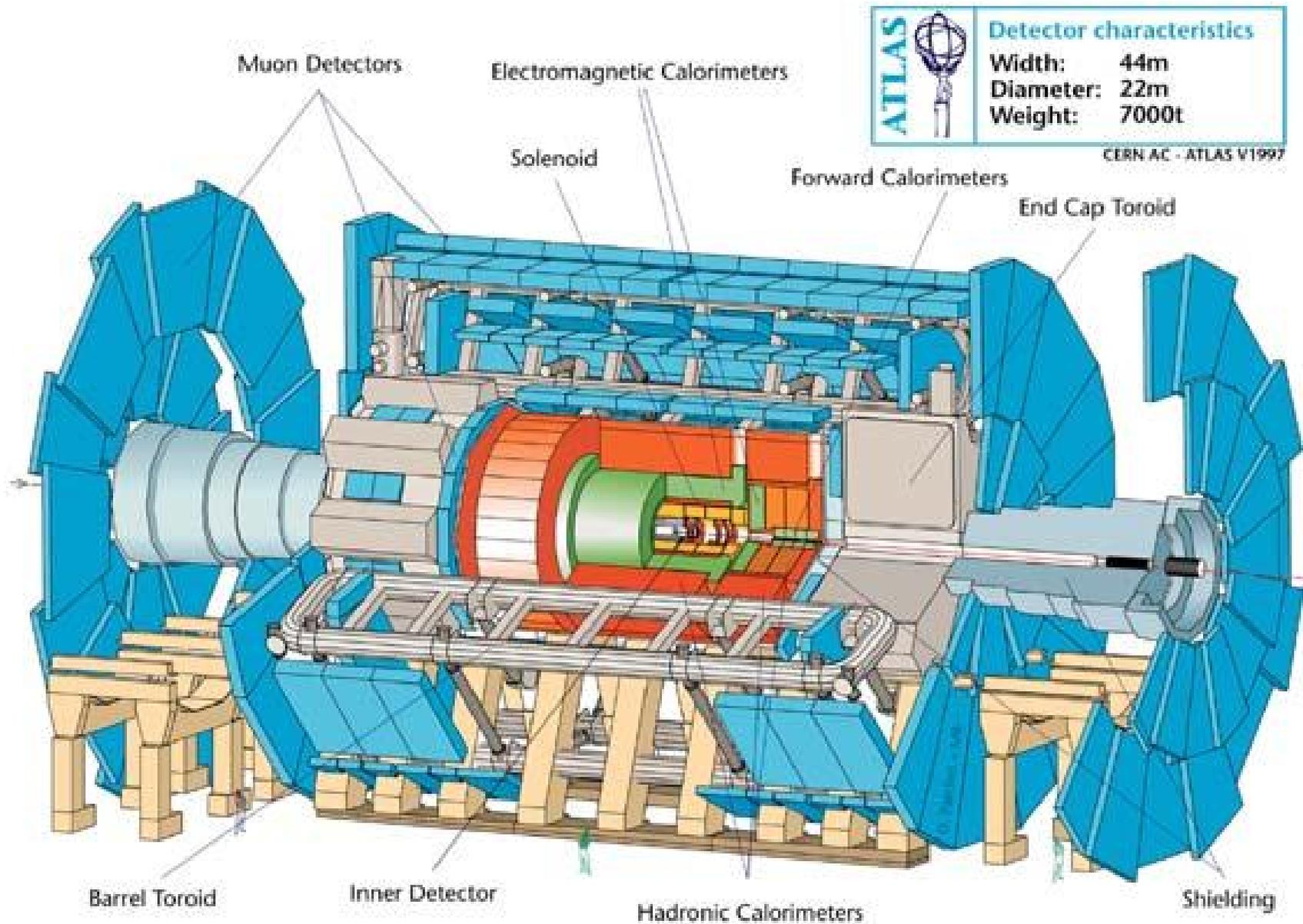


O Large Hadron Collider – LHC que estará pronto em 2007 para tomar dados tem um dos aceleradores desenhado especialmente para ver as dimensões extras caso elas existam. Se em colisões a altas energias algum gráviton escapar para dimensões extras relação massa-energia da reação sofria um déficit, aparentemente violando a primeira lei da termodinâmica.

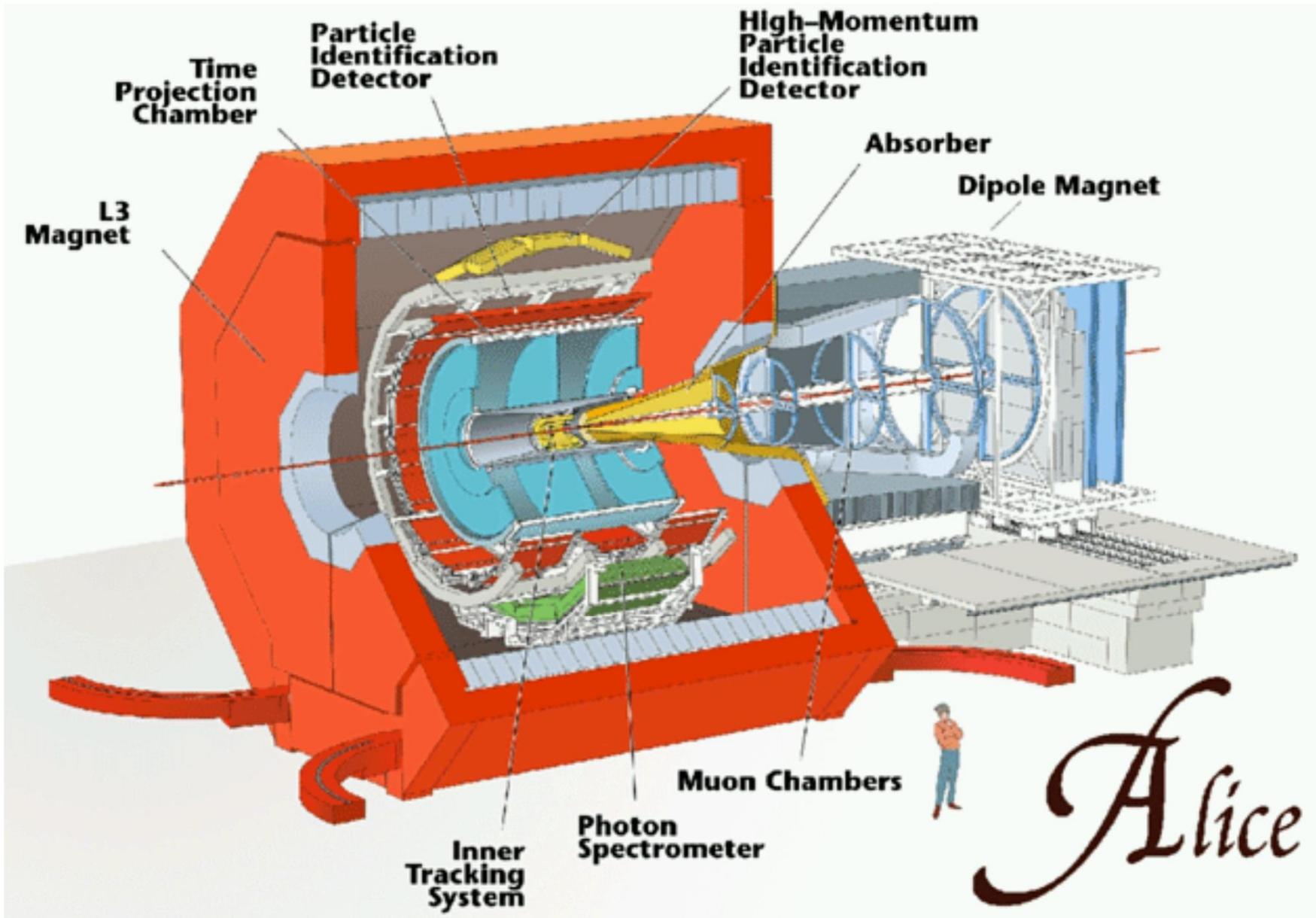
E mais: regiões onde de campos gravitacionais extremamente fortes podem ser criadas num raio caracterizando um mini black hole que pode evaporar rapidamente liberando um chuveiro de radiação “do nada”.



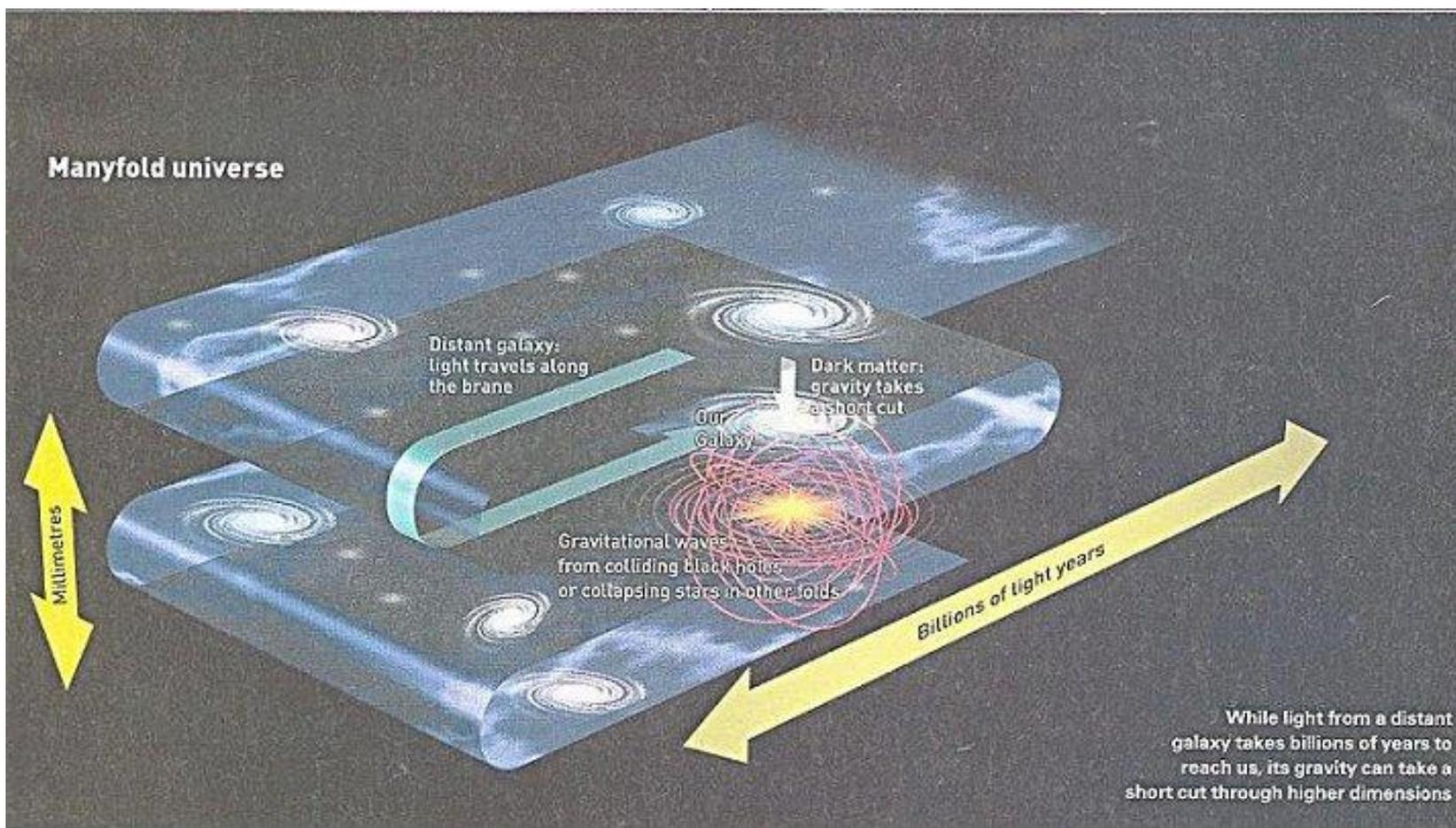
Precisamos de detetores grandes, herméticos e de alta performance



Veja: <http://na49info.cern.ch/alice/html/intro/>



Suplencorões pcrvâs quistire universo tenha 10 ou 11 dimensões. Por que não as vemos? Talvez estejamos morando em uma brana – flutuando num espaço de 5, 6 ou mais dim como a poeira que gruda numa bolha de sabão que flutua. A teoria "manifold universe" afirma que a brana onde vivemos poderia estar dobrada sobre si mesma várias vezes. A luz só pode viajar sobre a brana. Contudo a gravitação poderia pegar atalhos influenciando de uma folha para



O tempo Quântico?

INTRODUÇÃO

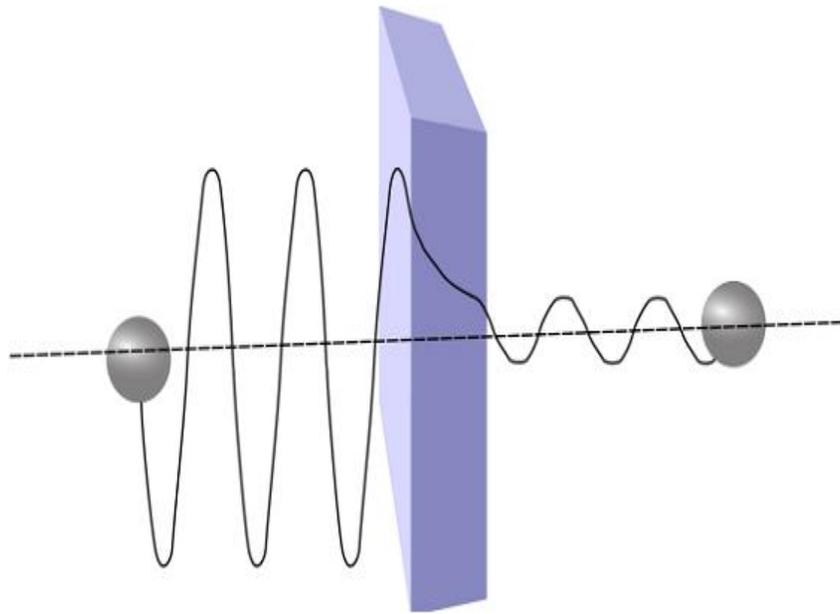


Figura: Tunelamento na mecânica quântica.



Jorge Henrique Sales · Alfredo Takashi Suzuki ·
Gislan S. Santos

Why the Light Front Time x^+ is the Best Time Variable

Received: 19 September 2014 / Accepted: 13 April 2015
© Springer-Verlag Wien 2015

Abstract Investigating the coordinate transformations from the usual Minkowski's space-time to the light-front coordinates, we obtain two possible forms to represent the time coordinate in the light-front, x^+ and/or x^- , which usually is said to be equivalent and symmetric. We observe that this equivalence and symmetry is only apparent, since in the ultra-relativistic limit $v \rightarrow c$ the former x^+ is well defined while the latter x^- becomes singular and not well-defined. From this setting and choice we analyze the concept of time in quantum mechanics tunneling effect using the light front tools.

Tempo de Tunelamento



Figura: Tempo de tunelamento.

$$\tau_p = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx}{j(x, t)} \quad (1)$$

$$\vec{j} = \frac{1}{2}[\Psi^* \hat{v} \Psi - (\hat{v} \Psi^*) \Psi]$$

onde \hat{v} é o operador velocidade dada por \hat{p}/m com $\hat{p} = \frac{\hbar}{i} \nabla$, logo

$$\hat{v} = \frac{\hbar}{im} \nabla.$$

Para a partícula livre, tem-se

$$\hat{j} = \rho \hat{v}.$$

$$dt = \frac{\rho dx}{J}$$

$$t = \frac{\int \rho dx}{J}$$

Tempo de Permanência na Mecânica Quântica

- A função de onda estacionária $\Psi(x, t) = \phi(x)e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$.
- Aqui $\rho(x, t) = |\Psi^*\Psi|$
- $j(x, t)$ é dada por

$$j(x, t) = \frac{\hbar}{2im} \left[\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} \right]. \quad (2)$$

$$j(x, t) = \frac{\hbar}{2im} \left[\phi^* \frac{\partial \phi}{\partial x} - \phi \frac{\partial \phi^*}{\partial x} \right] \quad (3)$$

A probabilidade será independente do tempo ou seja,

$$\rho(x, t) = |\Psi^* \Psi| = |\phi^* \phi| = 1 \quad (4)$$

O tempo de permanência estacionário para uma partícula livre usando (1), (3) e (4), resulta em

$$\tau_p = \frac{\int_0^L \rho(x, t) dx}{j_i(x, t)} = \frac{mL}{p} = \frac{m^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2E}} L. \quad (5)$$

onde o $p = \sqrt{2mE}$.

Tempo de Tunelamento: Equação de Klein-Gordon

- Equação de Klein-Gordon

$$\left(\square + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\right) \psi = 0.$$

- Dada a eq. de Klein-Gordon encontramos

$$J_{KG} = \frac{\hbar}{2im} \left[\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} \right]$$

- $\rho_{KG} = -\frac{\hbar}{2imc^2} \left[\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial t} \right] = \frac{E}{mc^2} \rightarrow \begin{cases} \rho > 0, E > 0 \\ \rho < 0, E < 0 \end{cases}$

$$\text{onde } E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 + (mc^2)^2}.$$

- NÃO PODEMOS
CALCULAR!!!!!!

Frente de Luz

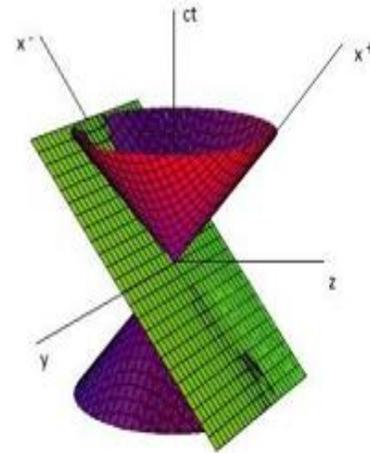


Figura: Cone de Luz.

$$\begin{cases} x^+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(x^0 + x^3) \\ x^- = \frac{1}{\sqrt{2}}(x^0 - x^3) \\ \vec{x}^\perp = x^1 \vec{i} + x^2 \vec{j} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 x^+ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(x^0 + x^3) \\
 x^- &= \frac{1}{\sqrt{2}}(x^0 - x^3)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\vec{x}^\perp = x^1\vec{i} + x^2\vec{j}$$

com $x^0 = ct$ é a componente temporal, x^1 , x^2 e x^3 são as componentes espaciais (x, y, z) respectivamente. O vetor \vec{x}^\perp está contido no plano (x, y) e, é transversal às componentes (x^+, x^-) . Os momentos canonicamente conjugados às coordenadas x^+ , x^- e x^\perp são respectivamente dados por

$$\begin{aligned}
 p^+ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(p^0 + p^3) \\
 p^- &= \frac{1}{\sqrt{2}}(p^0 - p^3)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\vec{p}^\perp = p^1\vec{i} + p^2\vec{j}$$

aqui, p^- representa a hamiltoniana na frente de luz, ou a energia da partícula livre. Uma primeira aplicação é na relação de energia de Einstein:

$$p^\mu p_\mu = m_0^2 c^2.$$

Usando (22), tem se

$$p^- = \frac{c^2 m_0^2 + p_\perp^2}{2p^+}. \tag{17}$$

A métrica na frente de luz é dada por

Uma propriedade de $g_{\mu\nu}$ é ação de baixar ou levantar índices, ou seja,

$$A_\mu = g_{\mu\nu} A^\nu.$$

Na frente de luz, por exemplo:

$$\begin{aligned} x_+ &= g_{+v} x^v \\ x_+ &= g_{+-} x^- . \end{aligned}$$

Qualquer outro valor é zero. Portanto: $x_+ = x^-$, $x_- = x^+$ e $x_\perp = -x^\perp$. O mesmo se procede para as derivadas covariantes e contravariantes, no caso da dupla derivada, tem-se

$$\begin{aligned} \partial_\mu \partial^\mu &= g_{\mu\nu} \partial^\mu \partial^\nu = g_{+-} \partial^+ \partial^- + g_{-+} \partial^+ \partial^- + g_{++} \partial^+ \partial^+ + g_{--} \partial^- \partial^- + \\ &+ g_{\perp+} \partial^\perp \partial^+ + g_{\perp-} \partial^\perp \partial^- + g_{+\perp} \partial^+ \partial^\perp + g_{-\perp} \partial^- \partial^\perp + g_{\perp+} \partial^+ \partial^\perp + g_{\perp-} \partial^- \partial^\perp \\ &+ g_{\perp\perp} \partial^\perp \partial^\perp . \end{aligned}$$

Resultando em

$$\partial_\mu \partial^\mu = 2\partial^+ \partial^- - (\partial^\perp)^2.$$

Para análise na frente de luz Fig. (1), inicialmente é tomado a função de onda no espaço de quadridimensional

$$\Psi = e^{\frac{i p_{\mu} x^{\mu}}{\hbar}}, \quad (14)$$

Para um produto escalar na frente de luz, é obtido:

$$p_{\mu} x^{\mu} = p^{-} x^{+} + p^{+} x^{-} - p^{\perp} x^{\perp}.$$

Portanto, a função de onda na frente de luz é dada por:

$$\Psi_{LF} = e^{\frac{i}{\hbar}[p^{-} x^{+} + p^{+} x^{-} - p^{\perp} x^{\perp}]}$$

Dada a equação de Klein-Gordon para uma partícula livre

$$\left(\square + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \Psi = 0 \quad (8)$$

obtem-se equação Klein-Gordon na frente de luz

$$\left[2\partial^+ \partial^- - \partial^{\perp 2} + \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \Psi_{FL} = 0 \quad (9)$$

Com d'alambertiano $\square = \partial_\mu \partial^\mu$, que na frente de luz fica

$$\square_{LF} = \alpha^2 \partial^+ \partial^- - (\partial^\perp)^2 = 2\partial^+ \partial^- - (\partial^\perp)^2.$$

Tempo de Tunelamento: Frente de Luz

Para resolver a equação de tempo de permanência, precisamos antes calcular a densidade de probabilidade e o fluxo de corrente de probabilidade nas coordenadas na frente de luz. Da equação de Klein-Gordon na frente de luz (9) tem se:

$$j_{FL} = \frac{\hbar}{2im} (\Psi_{FL}^* \partial^\perp \Psi_{FL} - \Psi_{FL} \partial^\perp \Psi_{FL}^*) \quad (10)$$

e

$$\rho_{FL} = \frac{\hbar}{im} (\Psi_{FL}^* \partial_+ \Psi_{FL} - \Psi_{FL} \partial^+ \Psi_{FL}^*). \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para resolver a equação do tempo de permanência, é necessário calcular a densidade de probabilidade e o fluxo de corrente de probabilidade nas coordenadas na frente de luz. Da equação de Klein-Gordon na frente de luz (19) pode-se obter:

$$j_{FL} = \frac{\hbar}{2im} (\Psi_{FL}^* \partial^\perp \Psi_{FL} - \Psi_{FL} \partial^\perp \Psi_{FL}^*), \quad (20)$$

e

$$\rho_{FL} = \frac{\hbar}{im} (\Psi_{FL}^* \partial_+ \Psi_{FL} - \Psi_{FL} \partial_+ \Psi_{FL}^*). \quad (21)$$

Agora é redefinida a equação de tempo de tunelamento via equação de Klein-Gordo na frente de luz:

$$\tau_{FL} = \frac{\int_0^L \rho_{FL}(x^-, x^+) dx^-}{j_{FL}(x^-, x^+)}, \quad (22)$$

sendo que a coordenada x^- representa um ponto qualquer da largura da barreira de tamanho L e x^+ o tempo na frente de luz.

Usando Eq. (26) a densidade de probabilidade na frente de luz é obtida

$$\rho_{FL} = \frac{2p^-}{m}, \quad (23)$$

e o fluxo de corrente de probabilidade na frente de luz (20)

$$j_{FL} = \frac{p^+}{m}$$

Para um elétron com velocidade 20% da velocidade da luz dentro da barreira de potencial constante com largura da ordem de 10^{-9} m, tem um tempo de tunelamento descrito pelo gráfico dado na Fig (2).

$$\tau_{FL} = \frac{2Lp^-}{p^+}$$

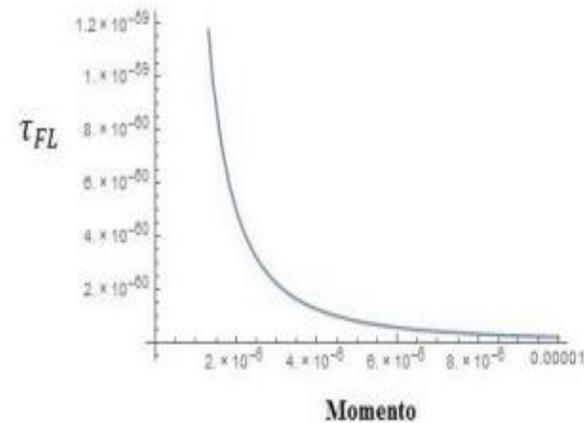


Figura 2: Tempo de tunelamento para o elétron na frente de luz.

No gráfico da Fig. (3), é comparado o tempo de tunelamento via mecânica quântica com o tempo de tunelamento na frente de luz. Observa-se que os dois modelos dão resultados semelhantes para momentos abaixo de $2 \times 10^{-6} \text{Kg m/s}$.

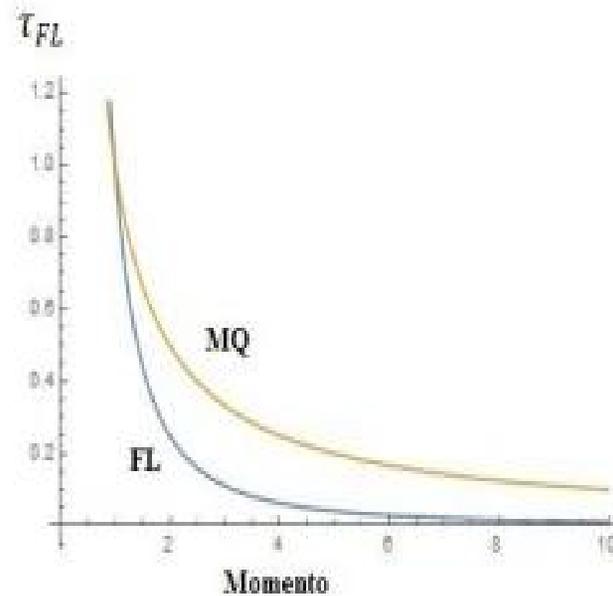


Figura 3: Tempo de tunelamento na frente de luz e na mecânica quântica.

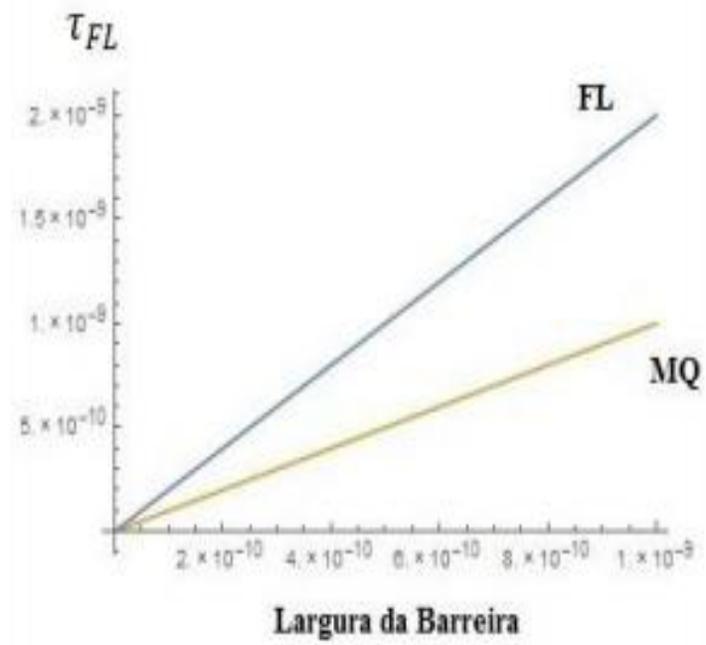


Figura 4: Tempo de tunelamento em função da largura da barreira.

CONCLUSÃO

Esses resultados mostram que há diferenças entre os dois modelos para a descrição do tempo de tunelamento estacionário. Na mecânica quântica esse tempo pode ser interpretado como tempo de transição ao longo da barreira. Na frente de luz mesmo vindo de uma teoria relativística, o resultado mostra que não tem presença de antipartícula no tempo de tunelamento estacionário. Porém, há presença do modo zero na teoria, o que implica em um tempo de tunelamento infinito, ou seja, a partícula ficaria presa na barreira de potencial. Na tabela seguinte é resumida a discussão deste trabalho.

Tabela 1: Relação entre momento p^+ , energia p^- e tempo de tunelamento.

Momento p	Energia na Frente de Luz	τ
$p^+ > 0$	$p^- > 0$ (partícula)	$\tau > 0$
$p^+ < 0$	$p^- < 0$ (antipartícula)	$\tau > 0$
$p^+ = 0$	$p^- \rightarrow \infty$	$\tau \rightarrow \infty$

- Contato: Jorge Sales
- jhosales@uesc.br

- Agradecimentos: CNPq, FAPESB pelo apoio financeiro. A Cristina Abdala pelo texto inicial. Ao Dyakon Possidonio e Ilane Gomes pela colaboração.