Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física da UFPA

66075-900 - Belém, Pará

home-page: <http://www.amazon.com.br/bassalo>

Trabalho recebido em 6 de outubro de 1997

Neste trabalho, como em nosso **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), apresentamos em forma de verbetes os principais fatos (*nascimentos*) referentes aos conceitos físicos, surgidos em nosso Século XX. Para isso, basicamente, usaremos os dados que coletamos nos quatro tomos de nossas **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), nos textos **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995) e **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), e nas referências indicadas em todos esses livros.

In this work, as in our **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), we present in entries the main events (*births*) concerned to the physical concepts, appeared in our Century XX. For that, basically, we use the data that we gather in our four books **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), in the books **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995) and **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), and in the references therein.

Idade Contemporânea: Mecânica (Relativista e Quântica)

Primeira Década do Século XX (1901-1910)

Em 1901, os físicos italianos Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925) e Tullio Levi-Civita (1873-1941) apresentaram nos *Mathematische Annalen* 54 o seu famoso **Cálculo Diferencial Absoluto**.

Em 1901, o físico Emil Cohn (1854-1944) publicou um trabalho no *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen* no qual afirmou que o éter:

... enche cada elemento de nosso espaço; ele pode ser um sistema ponderável ou também o vácuo.

Em 1901, o físico alemão Walther Kaufmann (1871-1947) publicou no *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen* 2 o resultado de suas primeiras experiências no sentido de medir a massa do elétron, nas quais usou o desvio de um feixe de **raios beta** (elétrons) ao atravessar uma região de campo elétrico (produzido por um condensador) e um campo magnético (produzido por uma bobina). Nessas experiências, Kaufmann observou que a massa aparente do elétron era apreciavelmente maior do que sua massa real, numa relação de pelo menos três para um.

Em 1902, Kaufmann publicou um trabalho na *Physikalische Zeitschrift* 4 no qual apresentou evidências experimentais sobre a natureza eletromagnética da massa do elétron. Ainda nesse trabalho, Kaufmann apresentou evidências de que essa massa dependia da velocidade com que o elétron se movimenta.

Em 1902, o físico alemão Max Abraham (1875-1922) apresentou na *Physikalische Zeitschrift* 4 um modelo do elétron no qual tratou essa partícula como uma esfera rígida e com sua carga elétrica uniformemente distribuída em sua superfície, obtendo resultados diferentes dos obtidos pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1863-1928; PNF, 1902), em 1899.

Em 1902, o físico irlandês Frederick Thomas Trouton (1863-1922) publicou um trabalho nos *Transactions of the Royal Dublin Society* 7 no qual analisou o resultado de uma experiência que realizou para detectar o **éter luminífero cartesiano**, baseado na idéia de que esse referencial privilegiado poderia ser detectado por um efeito eletrostático. Com efeito, nessa experiência, ele tentou medir, sem êxito, o torque sofrido por um capacitor carregado suspenso no “éter”, torque esse que deveria resultar da interação entre as cargas do capacitor e o “vento etéreo”.

Em março de 1903, Kaufmann realizou uma experiência na qual confirmou a natureza eletromagnética da massa dos elétrons constituintes dos raios beta, bem como observou que os raios catódicos eram também constituídos desse mesmo tipo de elétrons.

Em 1903, Trouton e H. R. Noble publicaram nos *Proceedings of the Royal Society of London* 72 o resultado de uma experiência que realizaram para detectar o **éter luminífero cartesiano**, baseado na idéia de que esse referencial privilegiado poderia ser detectado por um efeito eletrostático. Com efeito, nessa experiência, eles tentaram medir, sem êxito, o torque sofrido por um capacitor carregado suspenso no “éter”, torque esse que deveria resultar da interação entre as cargas do capacitor e o “vento etéreo”.

Em 1903, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) publicou no *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Mathematisch-Physikalische Klasse* 128 três artigos nos quais deduziu as **Equações de Maxwell** em termos de ação à distância, a partir do princípio variacional hamiltoniano. Nesse trabalho, ele demonstrou - antes do advento da Teoria da Relatividade - que essas equações eram invariantes por um certo tipo de transformações, estudadas logo depois, em 1904, por Lorentz.

Em 1903, Abraham apresentou nos *Annales de Physique Leipzig* 10 um estudo mais detalhado de seu

modelo eletrônico formulado em 1902. Nesse estudo, Abraham mostrou que a energia e o momento eletromagnético de um elétron, com velocidade $\mathbf{v}$, considerado como uma esfera rígida de raio $\mathbf{a}$ e carga elétrica e distribuída uniformemente, apresentam os seguintes valores:

$$E_{em} \simeq \frac{e^2}{2a} + \frac{1}{2} \mu v^2 + \dots,$$

$$p_{em} \simeq \mu \mathbf{v} + \dots,$$

onde:

$$\mu = \frac{2e^2}{3a c^2},$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo. Ainda nesse trabalho, Abraham calculou o componente transversal da massa eletromagnética de um elétron em movimento com velocidade $\mathbf{v}$:

$$m = m_o [1 + \frac{2}{5} \beta^2 + \frac{3}{70} \beta^4 + \dots], \quad (\beta = \frac{v}{c}).$$

onde m_o é a massa de repouso do elétron.

Em 1904, Trouton e Noble apresentaram nos *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 202A o resultado de uma experiência que realizaram para detectar o **éter luminífero cartesiano**, baseado na idéia de que esse referencial privilegiado poderia ser detectado por um efeito eletrostático. Com efeito, nessa experiência, eles tentaram medir, sem êxito, o torque sofrido por um capacitor carregado suspenso no “éter”, torque esse que deveria resultar da interação entre as cargas do capacitor e o “vento etéreo”.

Em 1904, o físico e matemático francês Jules Henri Poincaré (1854-1912) publicou no *Bulletin de la Société Mathématique de France* 28 um trabalho no qual apresentou a seguinte questão:

Que é o éter, como suas moléculas se arranjam, elas se atraem ou se repelem?

Registre-se que, ainda nesse trabalho, Poincaré afirmou que os corpos em movimento sofrem uma contração uniforme na direção desse movimento.

Em 1904, Lorentz publicou na *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften, mit Einschluss ihrer Anwendungen Physik* 5 um trabalho no qual deduziu, a partir de sua teoria microscópica do elétron, um conjunto de equações macroscópicas para um meio material que, contudo, não eram invariantes por sua famosa transformação, obtida ainda em 1904.

Em 1904, Lorentz publicou um trabalho nos *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam 6* no qual apresentou um novo modelo para um elétron em movimento. Nesse modelo, ele considerou o elétron em repouso como uma pequena esfera, porém, ao deslocar-se com uma velocidade $\mathbf{v}$ ele sofreria uma contração do tipo proposto pelo físico irlandês George Francis Fitzgerald (1851-1901), em 1887, qual seja, de que qualquer bastão que se desloca com velocidade $\mathbf{v}$ contrai-se de um fator $\gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ na direção de seu movimento. Com esse modelo, Lorentz demonstrou que:

$$E_{em} \simeq \mu_o c^2 + \frac{1}{2} \mu_1 v^2 + \dots,$$

$$p_{em} \simeq \mu v,$$

onde:

$$\mu_o = \frac{3}{4} \mu, \quad \mu_1 = \frac{5}{4} \mu, \quad \mu = \frac{2}{3} \frac{\epsilon^2}{a c^2},$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo. Com essas fórmulas, Lorentz verificou que as medidas de Kaufmann eram compatíveis com o seu modelo. Foi também nesse trabalho que Lorentz apresentou as hoje famosas **transformações de Lorentz** (nome cunhado por Poincaré, em 1905), dadas por:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma (x - v t), & y' &= y, & z' &= z, & t' &= \gamma (t - \frac{v x}{c^2}), \end{aligned}$$

onde:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

substituindo as **transformações de Galileu** (nome dado pelo físico austríaco Philipp Frank (1884-1966), em 1909):

$$x' = x - v t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

É importante observar que Lorentz já havia chegado às suas transformações, em 1899, porém, com um fator de escala ϵ . Contudo, nesse seu trabalho de 1904, Lorentz fez $\epsilon = 1$.

Em 1904, o físico alemão Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927) publicou, em Leipzig, uma monografia intitulada *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie* na qual mostrou que um elétron se contraía ao se deslocar com velocidade $\mathbf{v}$ através do éter, porém, mantendo seu volume constante. Segundo esse modelo, a contração sofrida pelo elétron transformava-o em uma elipse, cujos eixos eram dados por:

$$a s^{\frac{1}{3}}, \quad a s^{-\frac{1}{3}},$$

onde a é o raio do elétron considerado inicialmente como esférico, e:

$$s = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Esse modelo previa uma massa transversal para o elétron movente, cujo valor se situava entre os encontrados por Abraham (1902-1903) e por Lorentz (1904).

Em 1905, os norte-americanos, o químico Edward Williams Morley (1838-1923) e o físico Dayton Clarence Miller (1866-1941), publicaram um trabalho no *Philosophical Magazine 9* no qual descreveram a experiência pioneira que realizaram no topo de uma colina, com o objetivo de comprovar ou não o resultado da famosa **experiência de Michelson-Morley**, realizada em 1887.

Em 5 de junho de 1905, Poincaré comunicou à *Academia Francesa de Ciências* um trabalho, que foi publicado nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris 140 (1905)*, no qual apresentou as hoje famosas **transformações de Lorentz**, nome cunhado por ele nessa ocasião, e dadas por (em notação atual):

$$\begin{aligned} x' &= \gamma (x - v t), & y' &= y, & z' &= z, & t' &= \gamma (t - \frac{v x}{c^2}), \end{aligned}$$

onde:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ainda nesse artigo, Poincaré discutiu o problema da gravitação newtoniana, afirmando que todas as forças deveriam se transformar da mesma maneira sob aquelas transformações. Ele concluiu que a lei da gravitação newtoniana deveria ser modificada e, em vista disso, afirmou:

Deveriam existir ondas gravitacionais que se propagam com a velocidade da luz!

Em 30 de junho de 1905, o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) enviou aos *Annalen der Physik* (publicado no Volume 17, pp.891-921) seu famoso trabalho intitulado *Elektrodynamik bewegter Körper (Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento)* no qual ele desenvolveu a hoje famosa **Teoria da Relatividade Restrita**, baseada nos seguintes princípios:

1. As Leis da Física são invariantes por uma Transformação de Lorentz;

2. A velocidade da luz no vácuo (c) é uma constante em qualquer sistema de referência.

Usando esses princípios, Einstein demonstrou uma série de resultados revolucionários, tais como (em notação atual):

I. Contração de FitzGerald-Lorentz:

$$L_o = \gamma L, \quad (\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}})$$

onde L_o é o comprimento de um bastão rígido que se desloca com uma velocidade $\mathbf{v}$ em relação a um observador $\mathbf{O}$ em repouso, L é o comprimento desse bastão visto por $\mathbf{O}$.

II. Dilatação do tempo: $\Delta \tau = \gamma \Delta \tau_o$,

onde esse resultado significa que o intervalo de tempo ($\Delta \tau$) entre dois eventos, medido numa série de relógios sincronizados e em repouso, é maior do que o intervalo de tempo ($\Delta \tau_o$ - chamado **tempo próprio**) entre esses mesmos eventos, medido por um observador solidário a um relógio que se desloca com velocidade $\mathbf{v}$ em relação ao conjunto de relógios sincronizados referido anteriormente.

III. Composição de velocidades:

$$V'_x = \frac{V_x - v}{(1 - \frac{V_x v}{c^2})}, \quad V'_y = \frac{V_y}{\gamma (1 - \frac{V_x v}{c^2})}, \\ V'_z = \frac{V_z}{\gamma (1 - \frac{V_x v}{c^2})}.$$

Nessas expressões ($\mathbf{V}'_x, \mathbf{V}'_y, \mathbf{V}'_z; \mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y, \mathbf{V}_z$) indicam, respectivamente, os componentes da velocidade de um corpo em relação a um referencial ($O'x'y'z'$) que se desloca com uma velocidade constante $\mathbf{v}$ em relação a um referencial ($Oxyz$), sendo que, nesse deslocamento, os eixos Ox' e Ox permanecem paralelos.

IV. Aberração Relativística da Luz: $\text{tg } \alpha = \gamma \frac{v}{c}$;

V. Efeito Doppler-Fizeau: $\nu' = \gamma \nu (1 - \frac{v \cos \phi}{c})$,

onde ϕ é o ângulo entre o raio de luz de frequência ν e a direção $\mathbf{x}$. Essa fórmula permitiu que Einstein descobrisse o **Efeito Doppler-Fizeau Transverso**: ν' difere de ν mesmo quando o movimento da fonte de luz é perpendicular ($\phi = 90^\circ$) à direção de observação.

VI. Massas Transversal (m_t) e Longitudinal

$$(\mathbf{m}_\ell): m_t = m \gamma^2, \quad m_\ell = m \gamma^{\frac{3}{2}};$$

VII. Energia Cinética ($\mathbf{W}$): $W = m c^2 (\gamma - 1)$.

Observando essa última expressão e considerando que $\mathbf{W}$ é infinitamente grande para $\mathbf{v} = c$, Einstein concluiu que velocidades superiores à velocidade c da luz não têm possibilidade de existir.

Em 1905, Einstein publicou um artigo nos *Annales de Physique Leipzig 18* no qual demonstrou que:

A massa ($\mathbf{m}$) de um corpo é a medida de seu conteúdo de energia ($\mathbf{E}$): $E = m c^2$.

Em 1905, Kaufmann publicou um trabalho nas *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin Sitzungsberichte* no qual apresentou o resultado das experiências que realizou sobre as medidas da massa do elétron, que o levou a concluir que tais medidas continuavam a se ajustar mais ao **modelo de Abraham** do que ao **modelo de Lorentz-Einstein**.

Em 1906, Einstein publicou um artigo nos *Annales de Physique Leipzig 20* no qual discutiu o movimento do centro de gravidade no âmbito da teoria que apresentara em 1905, mais tarde conhecida como a Relatividade Especial. Ainda nesse trabalho, Einstein discutiu a lei da conservação da massa como um caso particular da lei de conservação da energia.

Em 1906, Einstein publicou um artigo nos *Annales de Physique Leipzig 21* no qual discutiu a possibilidade de determinar experimentalmente as massas transversal e longitudinal do elétron, através das fórmulas que deduzira em 1905.

Em 1906, Poincaré publicou um artigo no *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo 21* no qual usou as **transformações de Lorentz** para demonstrar a covariância da eletrodinâmica maxwelliana. Também nesse trabalho Poincaré demonstrou a estrutura de grupo daquelas transformações.

Em 1906, Kaufmann publicou um trabalho nos *Annales de Physique Leipzig 19* no qual apresentou o resultado das experiências que realizou sobre as medidas da massa do elétron, que o levou a concluir que tais medidas continuavam a se ajustar mais ao **modelo de Abraham** do que ao **modelo de Lorentz-Einstein**.

Em 1906, o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) apresentou um tra-

balho na *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft 8* no qual demonstrou que:

$$\vec{p} = m_o \gamma \vec{v}, \quad (\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}})$$

onde $\vec{p}$ é o **momentum** de uma partícula de velocidade $\vec{v}$, sendo m_o sua massa de repouso. Ainda nesse trabalho, Planck apresentou o seguinte princípio variacional:

$$\delta \int L dt = 0. \quad (L = m_o \gamma c^2)$$

Em 1907, Einstein apresentou nos *Annales de Physique Leipzig 23* (pg. 197-198) uma nova discussão relativística sobre o **Efeito Doppler-Fizeau Transverso** propondo, nessa ocasião, uma experiência para detectá-lo.

Em 1907, Einstein apresentou nos *Annales de Physique Leipzig 23* (pg. 371-384) a expressão $-\gamma m c^2$ - para representar a energia total, bem como deduziu a maneira pela qual a energia e o momentum se transformam na presença de forças externas.

Em 1907, Einstein fez um trabalho, que foi publicado no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4*, no qual mostrou o ajuste dos resultados experimentais de Kaufmann com o **modelo de Lorentz-Einstein**, bem como fez a observação de que a carga elétrica total de um sistema fechado é uma invariante de Lorentz. Observe-se que foi ainda nesse trabalho que Einstein fez a primeira transição entre a Relatividade Especial e a Geral, ao formular a seguinte hipótese:

Um campo de acelerações é equivalente a um campo de forças.

Também nesse trabalho, Einstein apresentou uma discussão quanto aos efeitos de seus postulados de 1905, sobre a Termodinâmica.

Em 1907, o físico alemão Max Theodor Felix von Laue (1879-1960; PNF, 1914) apresentou, nos *Annales de Physique Leipzig 23*, a dedução da **fórmula de Fresnel** de 1821:

$$u = \frac{c}{n} \pm (1 - \frac{1}{n^2}),$$

onde u é a velocidade da luz em um meio de índice de refração n , e c a velocidade da luz no vácuo. Para demonstrar essa fórmula, von Laue usou a lei de composição de velocidades decorrente da Relatividade Restrita Einsteiniana (1905).

Em 1907, Planck publicou um artigo na *Preussische Akademie der Wissenschaften* no qual usou a relação massa $\times$ energia einsteiniana para estimar o equivalente em massa da energia de ligação de um mol de água: $\sim 10^{-8}$ g.

Em 1907, Planck apresentou, nos *Annalen der Physik 26*, a **Termodinâmica Relativística** segundo a qual a entropia (S) de um sistema era invariante por uma **transformação de Lorentz**, enquanto a temperatura (T) *decrecia* do fator relativístico:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}.$$

Em 1907, o físico austríaco Paul Ehrenfest (1880-1933) publicou um trabalho nos *Annales de Physique Leipzig 23* no qual apresentou a seguinte questão:

Como aplicar as transformações de Lorentz a um corpo rígido?

Em 1907, foi publicado, postumamente, nos *Annales de Physique Leipzig 22*, a tese de doutoramento do físico Kurd von Mosengeil (1884-1906) sobre Relatividade, sob a orientação de Planck.

Em 1907, o físico austríaco Johann Jakob Laub (1872-1962) publicou um trabalho nos *Annales de Physique Leipzig 23* sobre a Relatividade Restrita.

Em 1908, Einstein e Laub publicaram trabalhos nos *Annales de Physique Leipzig 26, 27, 28* nos quais estudaram a eletrodinâmica relativística dos meios macroscópicos, principalmente o tensor energia-tensão e a força ponderomotiva desses meios.

Em 1908, Trouton publicou um trabalho nos *Proceedings of the Royal Society of London 80A* no qual descreveu o resultado de uma experiência, realizada com o auxílio do físico inglês Alexander Oliver Rankine (1881-1956), para detectar o **éter luminífero cartesiano**, baseado ainda na idéia de que esse referencial privilegiado poderia ser detectado por um efeito eletrostático. Nessa experiência, eles tentaram medir, sem êxito, a mudança na resistência de um fio de cobre quando o mesmo fosse girado paralela e transversalmente à direção na qual a Terra se move em torno do Sol.

Em 1908, o matemático russo-alemão Hermann Minkowski (1864-1909) publicou um trabalho no *Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische*

Klasse no qual mostrou que as **Transformações de Lorentz** representavam uma espécie de “rotação” num espaço 4-dimensional:

$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z, \quad x_4 = ict,$$

e que as mesmas mantêm invariante o intervalo de espaço (s) nesse **espaço de Minkowski**:

$$(s')^2 = s^2 \leftrightarrow x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = (x')^2 + (y')^2 + (z')^2 - c^2 (t')^2.$$

É oportuno observar que, nesse espaço minkowskiano, a posição, a velocidade, o momento, a aceleração e a força são representados por 4-vetores e definidos pelas seguintes expressões (em notação atual):

4-Posição: $r_\mu = (\vec{r}, ict)$; ($\mu = 1, 2, 3, 4$; $\vec{r} = (x, y, z)$)

4-Velocidade: $V_\mu = \frac{dr_\mu}{d\tau} = \gamma \frac{d}{dt} (\vec{r}, ict) = \gamma (\vec{v}, ic)$, ($\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$)

4-Momento: $P_\mu = m_o V_\mu = m_o \gamma (\vec{v}, ic) = (m \vec{v}, ime) = (\vec{p}, \frac{iE}{c})$,

($m_o =$ massa de repouso; $m = m_o \gamma$; $\vec{p} = m \vec{v}$; $E = m c^2$)

4-Aceleração:

$$A_\mu = \frac{d^2 r_\mu}{d\tau^2} = \frac{dV_\mu}{d\tau} = \gamma \frac{d}{dt} [\gamma (\vec{v}, ic)],$$

4-Força: $F_\mu = \frac{dP_\mu}{d\tau} = m_o A_\mu = \gamma \frac{d}{dt} (\vec{p}, icm) = \gamma (\vec{f}, ic \frac{dm}{dt})$, ($\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt}$).

Em 1908, Bucherer apresentou no *Deutsche Physikalische Gesellschaft Verhandlungen 10* e na *The Philosophical Magazine 15; 16* o resultado de novas experiências que realizou com o objetivo de medir a massa específica do elétron. Como essas medidas eram mais compatíveis com o **modelo de Lorentz-Einstein** do que com o seu próprio modelo (1904), ele decidiu então abandoná-lo.

Em 1908, Poincaré apresentou na *Revue générale de sciences pures et appliquées 19* uma versão semipopular da Relatividade.

Em abril de 1909, Poincaré ministrou, em Göttingen, uma série de seis palestras intituladas *Sechs Vorträge aus der Reinen Mathematik und Mathematischen Physik*. Na última delas, com o nome de a

Nova Mecânica, tratou de algumas questões relacionadas com a Relatividade. Para Poincaré, essa “nova mecânica” era baseada em três hipóteses (em linguagem atual):

1. Os corpos não podem atingir velocidades maiores do que a da luz no vácuo;

2. As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais;

3. Um corpo em movimento translacional sofre uma contração na direção de seu movimento.

É curioso observar que em 1909, Poincaré ainda não soubesse que a contração de bastões em movimento era uma decorrência dos postulados apresentados por Einstein, em 1905.

Em 1909, o físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919) sugeriu, em artigo publicado no *Physikalische Zeitschrift 10*, que o momento (p) do quantum luminoso einsteiniano (de comprimento de onda λ) poderia ser medido através da relação:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Registre-se que ele apresentou essa sugestão com o objetivo de explicar o fenômeno do **Bremsstrahlung (Radiação de frenagem)**, isto é, a emissão de Raios-X quando elétrons rápidos são freados num processo de colisão cuja lei de conservação do momentum das partículas envolvidas nessa colisão, é dada pela seguinte equação:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 + \frac{h\nu}{c^2} \vec{c}.$$

Em 1909, Philipp Frank publicou um trabalho no *Sitzungsberichte Berlin Akademie der Wissenschaften (Wien) 118* no qual deu o nome de **transformação de Galileu** para as seguintes expressões:

$$x' = x - v t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

Em 1909, o físico alemão Max Born (1882-1970; PNF, 1954) publicou nos *Annales de Physique Leipzig 30* e na *Physikalische Zeitschrift 10* um trabalho no qual apresentou o tratamento relativístico dos corpos rígidos. Nesse tratamento, Born usou um **lagrangeano relativístico** e uma **métrica riemanniana**.

Em 1909, Ehrenfest publicou na *Physikalische Zeitschrift 10* um trabalho no qual mostrou que, em

relação a um observador em repouso, um elemento de volume sofre uma contração lorentziana correspondente à velocidade instantânea desse volume.

Em 1909, os físicos-químicos norte-americanos Gilbert Newton Lewis (1875-1946) e Richard Chase Tolman (1881-1948) publicaram um artigo no *The Philosophical Magazine* 18 no qual deduziram as expressões relativísticas para a energia e o momentum de uma partícula, partindo da suposição de que as leis de conservação dessas grandezas físicas se conservam em todos os referenciais inerciais.

Em 1909, o físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) publicou no *Physikalische Zeitschrift* 10 um trabalho no qual analisou a **fórmula de Fresnel-Laue** relacionada com a velocidade da luz em um meio refringente. Em sua análise, encontrou uma simples interpretação para essa lei: as velocidades decorrentes da composição relativística usada por Laue, em 1907, formam os lados de um triângulo esférico sobre uma esfera imaginária de raio ic .

Em 1909, Abraham publicou um trabalho no *Circulo Matematico di Palermo Rendiconti* 28 no qual estudou a eletrodinâmica relativística dos meios macroscópicos, ocasião em que demonstrou ser simétrico o tensor energia-tensão desses meios.

Em 1910, Gustav Herglotz (1881-1953) e F. Noether, independentemente, demonstraram que um corpo em movimento translacional sofre uma contração lorentziana na direção de seu movimento. Esses trabalhos independentes foram publicados nos *Annales de Physique* 31.

Em 1910, Born voltou a apresentar, na *Physikalische Zeitschrift* 11, o tratamento relativístico dos corpos rígidos.

Em 1910, Einstein publicou nos *Archives des Sciences Physique et Naturelles* 29 um artigo no qual, ao estudar as conseqüências do Princípio da Relatividade na Física Moderna, afirmou que qualquer sinal pode ser usado para sincronizar relógios em repouso em um referencial inercial, desde que sua propagação seja isotrópica e sua velocidade constante com respeito àquele referencial.

Em 1910, Sommerfeld apresentou nos *Annales de Physique Leipzig* 32, 33 a Relatividade Restrita sob os formalismos quadri-vetorial e tensorial.

Em 1910, o físico W. Ignatowski publicou nos *Archiv der Mathematik und Physik* 17 um trabalho no qual mostrou que a Relatividade Restrita não precisa do postulado da constância da velocidade da luz.

Em 1910, Laub publicou no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 7 um artigo no qual apresentou uma grande revisão sobre a base experimental da Relatividade Restrita.

Em 1910, os irmãos suíços, o matemático Johann Conrad Habicht (1876-1958) e o engenheiro Franz Paul Habichtt (1884-1948) publicaram um artigo na *Physikalische Zeitschrift* 11 no qual apresentaram os resultados de uma experiência que haviam realizado com Einstein, nos laboratórios da Universidade de Zürich. Nessa experiência, eles estudaram a flutuação da voltagem em um conjunto de seis condensadores girantes, um fenômeno similar ao **movimento browniano**.