

# Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

*Departamento de Física da UFPA*

*66075-900 - Belém, Pará*

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

Recebido em 16 de Agosto, 1998

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 cinco tomos de nossas **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994, 1998), 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 five books **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994, 1998), 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: Astronomia, Cosmologia

### Primeira Década do Século XX (1901-1910)

Em 1901, os astrônomos norte-americanos Edward Charles Pickering (1846-1919) e Annie Jump Cannon (1863-1941) apresentaram no Volume 28 (Parte II) dos *Annals of Harvard College Observatory* a classificação do espectro fotográfico de 1.122 estrelas. Essa classificação refinou duas outras publicadas anteriormente. A primeira delas foi apresentada pela astrônoma escocesa Williamina Paton Fleming (1857-1911), em 1890, no Volume 27 dos *Annals of Harvard College Observatory*, na qual o espectro de 10.351 estrelas foi organizado em 17 categorias, distribuídas nas letras de A até Q, com 99,3% delas caindo apenas nas letras A, B, F, K e M. A segunda foi elaborada pela astrônoma, também norte-americana, Antonia Caetana de Paiva Pereira Maury (1866-1952), que a apresentou no Vo-

lume 28 (Parte I) dos *Annals of Harvard College Observatory*, de 1896. Em seu trabalho, Maury classificou o brilho de 681 estrelas, estas contadas a partir do pólo norte e reunidas em 22 grupos, cada um deles dividido em sete diferentes índices denotados com as letras **a**, **b** e **c**. Além do mais, para indicar certos aspectos no espectro estelar, Maury usou letras duplas. Na classificação de Pickering e Cannon, uma boa parte das categorias de Fleming foram suprimidas, e a seqüência final considerada por esses astrônomos foi a seguinte: O, B, A, F, K, G e M. É oportuno observar que esses trabalhos de Fleming, Pickering, Cannon e Maury constituem os primeiros registros do famoso **Catálogo de Espectros Estelares Henry Draper**.

Em 1901, o astrônomo holandês Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) apresentou nas *Publications Astronomical Laboratory at Groningen 8* o resultado de suas pesquisas, realizadas com colaboradores, sobre algumas propriedades da estrutura do sistema estelar, tais como: densidade espacial das estrelas em função

de suas distâncias ao Sol; distribuição estelar, por unidade de volume, de acordo com o brilho das estrelas; valor médio das paralaxes trigonométricas estelares. No estudo dessas propriedades, Kapteyn levou em consideração o movimento próprio das estrelas.

Em 1901, o físico, matemático e astrônomo inglês Sir James Hopwood Jeans (1877-1946) aceitou a **teoria catastrófica das marés**, proposta pelo matemático inglês W. F. Sedgwick, em 1898, para explicar a formação dos planetas. Segundo essa teoria, a passagem de uma estrela próximo do Sol provocou fortes marés no mesmo, e, ao serem destacadas da superfície solar, formaram os planetas.

Em 1901, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) publicou no *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München, Mathematisch-Physikalische Klasse 31* um artigo no qual tratou do brilho dos cometas.

Em 1902, Jeans publicou um trabalho no *Philosophical Transactions of the Royal Society of London 199*, no qual apresentou o hoje famoso **critério de Jeans** para o colapso gravitacional, segundo o qual a força de gravitação excederia à força decorrente do gradiente de pressão dentro de uma nuvem estelar.

Em 1902, Kapteyn apresentou nas *Publications Astronomical Laboratory at Groningen 11* novos resultados sobre suas pesquisas relacionadas com a estrutura do sistema solar.

Em 1902, o físico alemão Arthur Schuster (1851-1934) publicou um artigo no *Astrophysical Journal 16*, no qual mostrou que o processo de transmissão de energia por parte de uma estrela era provocado pelo mecanismo de radiação e não pelo de convecção. Registre-se que essa idéia já havia sido apresentada pelo astrônomo irlandês Ralph Allen Sampson (1866-1939), em 1895, nas *Memoirs of the Royal Astronomical Society 51*.

Em 1904, o físico inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) fez a primeira estimativa da idade da Terra, usando a abundância relativa da radioatividade de alguns elementos químicos pesados.

Em 1904, o astrônomo francês Pierre Jules César Janssen (1824-1907) publicou um Atlas do Sol contendo 6.000 fotografias de seu disco, fotografias realizadas entre 1876 e 1903 e obtidas por intermédio de uma nova técnica denominada de **cronofotografia**. É oportuno registrar que Janssen foi um dos precursores na observação astronômica com balões, cujos resultados foram apresentados, em 1900, na *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 131*.

Em 1904, Kapteyn anunciou no *International Congress of Science at St. Louis (Congresso Internacional de Ciência em St. Louis)* a descoberta do fenômeno conhecido como **fluxo de duas estrelas**, segundo o qual os movimentos estelares apresentavam uma certa ordem, diferentemente do que era aceito, ou seja, que o movimento estelar apresentava um caráter aleatório, semelhantemente ao que ocorria com as velocidades das moléculas em um gás.

Em 1904, o astrônomo alemão Johannes Franz Hartmann (1865-1936) anunciou nas *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam 15* a descoberta de linhas espectrais estacionárias do cálcio (Ca) no espectro da  $\delta$  Orionis, ao observar suas velocidades radiais (componente do vetor velocidade ao longo da linha de visada) por intermédio do **efeito Doppler-Fizeau** daquelas linhas. Essa descoberta provou, pela primeira vez, a existência de matéria interestelar.

Em 1905, Kapteyn apresentou na reunião da *British Association for the Advancement of Science (Associação Britânica para o Progresso da Ciência)*, realizada em Cape Town, a descoberta que havia feito sobre o **fluxo de duas estrelas**.

Em 1905, Schuster (1851-1934) publicou um artigo no *Astrophysical Journal 21* no qual voltou a tratar da transmissão de energia estelar, pelo processo de radiação.

Em 1905, o astrônomo norte-americano William Henry Pickering (1858-1938) descobriu o satélite saturniano *Themis*, entre as órbitas dos também satélites saturnianos Titã e Hiperion.

Em 1905, os norte-americanos, o geólogo Thomas Chrowder Chamberlain (1843-1928) e o astrônomo Forest Ray Moulton (1872-1952) apresentaram uma pequena modificação na **teoria catastrófica das marés** de Sedgwick (1898). Com efeito, segundo esses norte-americanos, a passagem de uma estrela próximo do Sol intensificou as erupções solares e, por efeito de marés, jatos de gás foram lançados fora da superfície solar, os quais, posteriormente, por condensação, formaram os planetas.

Em 1905, o astrônomo norte-americano Percival Lowell (1855-1916) iniciou, juntamente com o *staff* de seu próprio Observatório localizado em Flagstaff, a busca de um novo planeta, além de Neptuno, chamado por ele de **planeta X**, ao perceber um pequeno erro na órbita do planeta Urano.

Em 1905, o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1966) publicou no *Zeitschrift für wissens-*

*chaftliche Photographie 3* um trabalho intitulado **Zur Strahlung der Sterne (Sobre a Radiação das Estrelas)**, no qual destacou a relação entre a cor e a luminosidade das estrelas e mostrou que certas estrelas vermelhas eram muito mais luminosas do que outras também vermelhas. Ainda nesse trabalho, observou que as estrelas mais luminosas eram maiores que as menos luminosas pois, como a quantidade de luz irradiada por unidade de área é a mesma para ambas, então a mais luminosa deveria ter maior superfície lateral. Em vista disso, concluiu que existiam estrelas **gigantes-vermelhas** e **anãs-vermelhas** e, conseqüentemente, as estrelas, de um modo geral, poderiam ser **gigantes** e **anãs**. Registre-se que, para estimar o tamanho das estrelas, Hertzsprung baseou-se no fato de que, conhecendo-se a distância de uma estrela e considerando-se que a mesma radiava energia como se fosse um corpo negro, então a sua dimensão decorria diretamente da **lei de Stefan (1879)-Boltzmann (1884)**.

Em 1906, Schwarzschild publicou um trabalho no *Akademie der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Klasse 1*, no qual mostrou que o processo de transmissão de energia por parte de uma estrela devia-se ao mecanismo de radiação e não ao de convecção.

Em 1906, o astrônomo alemão Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf (1863-1932) usou a técnica da fotografia para descobrir o asteroide *Aquiles*, que representa o primeiro dos “asteróides troianos”, estes considerados como um grupo de corpos celestes (planetóides) que gravita em órbita de Júpiter.

Em 1906, Hertzsprung usou a relação cor  $\times$  luminosidade das estrelas, que havia descoberto em 1905, para mostrar que a estrela Arcturus apresentava um tamanho físico aproximadamente igual ao diâmetro da órbita de Marte. Em vista disso, confirmou a existência de estrelas gigantes, que havia descoberto também em 1905.

Em 1906, Kapteyn publicou, em Groningen, um pequeno livro intitulado *Plan of Selected Areas (Projeto de Áreas Selecionadas)*, no qual apresentou algumas propriedades estelares (movimento próprio, paralaxe, tipo espectral e velocidade radial) de cerca de 200.000 estrelas, distribuídas em 206 áreas estelares, uniformemente demarcadas no céu e nas declinações de  $+ 90^\circ$ ,  $+ 75^\circ$ ,  $+ 60^\circ$  ... até  $- 90^\circ$ .

Em 1907, Hertzsprung publicou no *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie 5* um novo trabalho com

o mesmo título do publicado, em 1905, nessa mesma Revista. Nesse trabalho, Hertzsprung apresentou um estudo da relação cor  $\times$  luminosidade de um grupo de estrelas Plêiades, baseando-se no fato de que, como essas estrelas estão aproximadamente a iguais distâncias, suas aparentes luminosidades (grandezas) e cores revelariam aquela relação.

Em 1907, Rutherford publicou no *Journal of Royal Astronomical Society of Canada 1* o resultado da estimativa que havia feito, em 1904, da idade da Terra, usando a abundância relativa da radioatividade de alguns elementos químicos pesados.

Em 1907, o astrofísico suíço Robert Emden (1862-1940) publicou o livro intitulado **Gaskugeln, Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische und meteorologische Probleme** no qual apresentou um modelo da evolução estelar como sendo a mesma devida à contração de uma esfera de gás perfeito, ocasião em que introduziu o conceito de “mudança politrópica de estado”. Ainda nesse livro, Emden foi o primeiro a deduzir o equilíbrio radioativo de partículas indistinguíveis. Com isso, ele pode ser considerado como um precursor do uso de uma estatística de “fótons” (**Estatística de Bose-Einstein**, 1924). Aliás, é oportuno destacar que o astrofísico norte-americano Jonathan Homer Lane (1819-1880), em trabalho intitulado **On the Theoretical Temperature of the Sun** e publicado no *American Journal of Science 50*, em 1870, foi o primeiro a estudar a estrutura interna do Sol, considerando-o como um corpo gasoso. Nesse trabalho, Emden usou uma lei descoberta um pouco antes, segundo a qual um corpo gasoso se contrai quando perde calor, porém o calor gerado pela contração excede o calor necessário para produzir essa contração. Desse modo, concluiu que, se uma estrela for considerada como uma esfera de gás perfeito, ela aumenta a sua temperatura ao se contrair. Mais tarde, em 1872, August Ritter encontrou resultados semelhantes a essa “lei paradoxal”. Em seu livro de 1907, Emden descreveu a contração de estrelas, conforme dissemos antes, usando as idéias de Lane, razão pela qual seu estudo teórico ficou conhecido como **Equação de Lane-Emden**.

Em 1907, o físico e matemático germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) publicou um trabalho no *Jahrbuch der Radioaktivität 4*, no qual tentou ajustar a **teoria newtoniana da gravitação** (1687) à sua **teoria da Relatividade Restrita** (1905). Ainda nesse trabalho, Einstein apresen-

tou a hipótese de que:

**Um campo de acelerações é equivalente a um campo de forças,**

ao intuir que uma pessoa em queda livre não sentiria seu próprio peso. Baseado nessa hipótese, Einstein estudou o comportamento de relógios em dois referenciais, sendo um em repouso e um segundo com aceleração vertical uniforme ( $\gamma$ ) em relação ao primeiro. Em vista disso, demonstrou que a diferença entre os instantes de tempo registrados por esses relógios dependeria da diferença de energia potencial entre os pontos em que eles estivessem situados. Em consequência desse resultado, concluiu que a luz (de frequência  $\nu$ ) gerada por um certo material na superfície solar teria uma frequência menor que a luz gerada por esse mesmo material na superfície terrestre, uma vez que os potenciais solar e terrestre são diferentes. A esse efeito, Einstein denominou de **red shift**, e é calculado por:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu}.$$

Em 1907/1908, Schwarzschild apresentou no *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, a hipótese de que as estrelas apresentavam uma distribuição elipsoidal de velocidades peculiares, com a maior delas na direção do eixo maior desse elipsóide. Essa hipótese parecia estar de acordo com os dados de observação das estrelas.

Em 1908, Kapteyn apresentou nas *Publications Astronomical Laboratory at Groningen 18*, novos resultados sobre suas pesquisas relacionadas com a estrutura do sistema solar.

Em 1908, a astrônoma norte-americana Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) descobriu cerca de 1.777 estrelas variáveis tipo cefeidas, nas Nuvens de Magalhães. Registre-se que as **variáveis cefeidas** são estrelas cujo brilho varia em períodos (de dias para umas e de meses para outras). A primeira dessas estrelas a ser estudada foi a *delta Cepheu*, da constelação de Cepheu, pelo astrônomo inglês, de origem holandesa, John Goodricke (1764-1786), em 1784.

Em 1909, Sampson publicou um artigo nos *Annals of Harvard College Observatory 52*, no qual desenvolveu a nova teoria para estudar os eclipses dos quatro grandes satélites de Júpiter.

Em 1910, Sampson publicou o livro intitulado **Tables of the Four Great Satellites of Jupiter** (*Tabelas dos Quatro Grandes Satélites de Júpiter*), no qual

reuniu suas pesquisas sobre o movimento dos satélites jupiterianos. Observe-se que essas tabelas têm servido de base para o cálculo das efemérides nacionais.

Em 1910, Wolf foi o primeiro a observar o cometa de Halley em sua passagem próximo da Terra.

## Idade Contemporânea: Óptica

### Primeira Década do Século XX (1901-1910)

Entre 1900 e 1902, os físicos alemães August Karl Johann Valentin Köhler (1866-1948), Moritz von Rohr e Hans Boegehold começaram a trabalhar na construção de um microscópio iluminado com radiação ultravioleta. Inicialmente, eles projetaram uma objetiva (mais tarde conhecida como **monocromator**) para luz de pequenos comprimentos de onda, como, por exemplo, a luz verde do mercúrio (Hg).

Em 1901, o físico escocês William Sutherland (1859-1911) observou que os espectros dos elementos poderiam ser uma função de sua rigidez.

Em 1901, o físico alemão Otto Richard Lummer (1860-1925) publicou no *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft 3* um trabalho no qual apresentou a idéia de introduzir placas planas paralelas em um espectroscópio de alta resolução, para eliminar os anéis de interferência que ocorrem em placas de mica. Esses anéis haviam sido descobertos pelo físico e mineralogista austríaco Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871), em 1849, e, segundo Lummer, os mesmos resultavam das diferenças nos caminhos seguidos por muitos comprimentos de onda.

Em 1901, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) apresentou, na *Revue Scientifique 15*, a hipótese de que os elétrons nos átomos se deslocavam em órbitas em torno de um caroço central com velocidade da ordem das velocidades com que os elétrons são arrancados do alumínio devido ao efeito fotoelétrico. Se tal ocorresse, concluiu Perrin, a frequência de revolução dos elétrons era da ordem das frequências ópticas das raias espectrais.

Em 1902, Ernst Gehrcke eliminou a baixa intensidade luminosa nos espectroscópios, causada pela incidência resvalante (“glancing”) da luz, cimentando com bálsamo do Canadá um prisma nas placas paralelas desses instrumentos ópticos.

Em 1902, o físico alemão Woldemar Voigt (1850-1919) publicou nos *Annales de Physique Leipzig 9* um trabalho no qual descreveu uma fraca birrefringência

(efeito magnético-óptico) que havia observado em vapores.

Em 1902, o físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), na *Philosophical Magazine* 4 descreveu uma experiência na qual tentou refutar a hipótese da **contração de FitzGerald (1893)-Lorentz (1895)**. Essa experiência baseou-se na hipótese de que um meio isotrópico deve tornar-se anisotrópico quando sofre uma contração, resultando daí que um material isotrópico transparente deveria tornar-se duplamente refratário para um raio de luz que o atravessasse obliquamente à direção de seu movimento através do éter. Contudo, Rayleigh não obteve êxito ao realizar essa experiência, pois não detectou a dupla refração que previra com aquela hipótese.

Em 1902, o físico húngaro-alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) apresentou nos *Annales de Physique, Leipzig* 8, as seguintes **leis do efeito fotoelétrico**:

**1. Os elétrons emitidos têm velocidades iniciais finitas, são independentes da intensidade da luz incidente, porém dependem de sua frequência;**

**2. O número total de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da luz incidente.**

Essas leis eram incompatíveis com o eletromagnetismo maxwelliano (1873), já que, para este, por exemplo, quanto mais intensa a radiação eletromagnética, maior seria a energia cinética do elétron.

Em 1902, o físico irlandês Frederick Thomas Trouton (1863-1922) publicou, nos *Transactions of the Royal Dublin Society* 7, um trabalho no qual descreveu 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 muito 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 1902, o astrônomo alemão Johannes Franz Hartmann (1865-1936) apresentou nas *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam* 12 o resultado de suas pesquisas sobre um novo método para testar objetivas de grandes dimensões, baseado numa nova fórmula de dispersão interpolativa que havia deduzido. Esse método ele também utilizou na construção de um novo espectrógrafo que empregava um prisma de quartzo.

Em 1903, K. Strehl publicou no *Zeitschrift für Instrumentkunde* 22 um estudo sobre os efeitos da aberração no **padrão de Airy** formado pela difração em lentes.

Em 1903, os físicos alemães Hermanus Haga e C. H. Wind apresentaram nos *Annalen der Physik* 10 o resultado de uma experiência sobre a difração de raios-X, na qual encontraram que o comprimento de onda desses raios era da ordem de  $6 \times 10^{-9}$  cm.

Em 1903, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) apresentou no *Astronomische Nachrichten* 164 a descrição de uma “câmara de zenite suspensa” que ele havia desenvolvido para ser usado na determinação fotográfica das latitudes.

Em 1903, Erich Ladenburg publicou nos *Annales de Physique Leipzig* 12, o resultado de experiências que confirmaram as leis do efeito fotoelétrico observadas por Lenard, em 1902.

Em 1903, o físico inglês Charles Glover Barkla (1877-1944; PNF, 1917) publicou na *Philosophical Magazine* 5 um trabalho no qual apresentou o resultado de suas primeiras experiências sobre o espalhamento de raios-X pela matéria. Nessas experiências, esses raios foram polarizados, o que evidenciou seu caráter de onda transversal.

Em 1903, Lummer e Gehrcke descreveram nos *Annales de Physique, Leipzig* 10, um novo espectroscópio de interferência que usava a idéia de Lummer (1901) das placas paralelas, para eliminar os anéis de interferência, bem como a idéia de Gehrcke (1902) para eliminar a baixa intensidade luminosa. Esse novo tipo de instrumento tinha a vantagem de apresentar um poder de resolução muito melhor do que o **interferômetro de Fabry-Perot**, construído em 1897.

Em 1903 e 1904, Trouton e H. R. Noble publicaram nos *Proceedings of the Royal Society* 72 e *Philosophical Transactions of the Royal Society* 202A um trabalho no qual descreveram novas experiências que realizaram para detectar o **éter luminífero cartesiano**, tentando medir o efeito sofrido por um capacitor carregado suspenso no “éter”.

Em 1904, A. E. Conrady publicou no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 64 um trabalho no qual ampliou o estudo que o astrônomo alemão Philipp Ludwig von Seidel (1821-1896) havia realizado, em 1856, sobre a aberração cromática nas lentes.

Em 1904, Hartmann publicou no *Zeitschrift für Instrumentkunde* 24 um artigo no qual apresentou o

desenvolvimento de uma nova técnica para testar a aberração de ondas incidindo em espelhos de grandes dimensões. Essa nova técnica, que ele já havia testado em 1900 (*Zeitschrift für Instrumentenkunde* 20), constava do uso de telas (“screens”) perfuradas.

Em 1904, Barkla publicou um novo trabalho na *Philosophical Magazine* 7 no qual confirmou o caráter transversal dos raios-X.

Em 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) apresentou, nos *Proceedings of the Tokyo Mathematics Physical Society* 2, seu modelo atômico do tipo saturniano (caroço central positivo rodeado de anéis de elétrons deslocando-se com a mesma velocidade angular) para explicar o espectro luminoso emitido pelos corpos. Com efeito, segundo esse modelo, as oscilações perpendiculares ao plano de movimento dos anéis resultavam no espectro tipo banda (contínuo), enquanto as oscilações paralelas àquele plano resultavam num espectro tipo raia (discreto).

Em 1904, o físico austríaco Egon von Schweidler (1873-1948) mostrou no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 1 que havia uma relação direta entre a energia do fotoelétron com a frequência da luz incidente em um fotoemissor.

Em 1904, o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) apresentou, no *Philosophical Magazine* 7, seu modelo atômico para explicar o espalhamento da luz pela matéria. Assim, para Thomson, o átomo era considerado como sendo constituído por uma carga elétrica positiva, homoganeamente distribuída na forma de uma esfera de raio da ordem de  $10^{-8}$  cm, e movendo-se no seu interior um certo número de elétrons de modo a manter o átomo neutro. Além disso, cada elétron de carga  $e$  e massa  $m$  era considerado ligado ao centro do átomo e oscilando amortecidamente com frequência angular própria ( $\omega_o$ ), configuração essa que lhe valeu a denominação de “pudim de ameixas”. Com esse modelo, Thomson conseguiu explicar o **espalhamento Rayleigh** (1871), o espalhamento de raios-X pela matéria - conhecido como **espalhamento Thomson** -, e o **espalhamento ressonante** que se relaciona com a luminescência (fluorescência e fosforescência). Registre-se que a **secção de choque de espalhamento** ( $\sigma_s$ ) é calculada relacionando-se a potência média da radiação devida à oscilação amortecida do elétron (obtida pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897) à intensidade média da radiação incidente (demonstrada pelo físico inglês John Henry Poynting (1852-1914), em 1883):

$$\sigma_s = \frac{32 \pi r_o^2}{3} \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_o^2)^2 + (g \omega)^2}; \quad r_o = \frac{\epsilon^2}{8 \pi \epsilon_o m c^2},$$

onde  $r_o$  é o **raio clássico do elétron**,  $g$  é o **coeficiente de amortecimento**,  $\epsilon_o$  a **permissividade elétrica do vácuo** e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. A expressão acima permite obter os três tipos de espalhamento:

**1. Espalhamento Rayleigh** ( $\omega \ll \omega_o$ ):

$$\sigma_{Ra} \simeq \frac{32 \pi r_o^2}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^4;$$

**2. Espalhamento Thomson** ( $\omega_o \ll \omega$ ):

$$\sigma_{Th} \simeq \frac{32 \pi r_o^2}{3};$$

**3. Espalhamento Ressonante** ( $\omega \sim \omega_o$ ):

$$\sigma_{max} \simeq \frac{\omega_o r_o}{g}.$$

Observe-se que a **luminescência** é explicada por intermédio deste último tipo de espalhamento.

Em 1904, o físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) também previu, como fizera o físico inglês Oliver Heaviside (1850-1925), em 1899, a emissão de radiação eletromagnética do movimento de “eletrificação” em um dielétrico.

Em 1904, Köhler publicou um trabalho no *Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und für mikroskopische Technik* 21 no qual descreveu o funcionamento de um microscópio iluminado com radiação ultravioleta oriunda do espectro do cádmio (Cd). Para esse tipo de microscópio, ele também usou a nova objetiva, conhecida desde então como **monocromator**, que ele havia desenvolvido com Rohr e Boegehold, entre 1900 e 1902.

Em 1904, o físico norte-americano Dewitt Bristol Brace (1859-1905) publicou, na *Philosophical Magazine* 7, um trabalho no qual descreveu o resultado de uma experiência, análoga à realizada por Rayleigh, em 1902, porém com um aparelho mais sofisticado. No entanto, não detectou a dupla refração prevista por Rayleigh.

Em 1905, o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) publicou um trabalho, nos *Annales de Physique Leipzig* 17 (p.132), no qual explicou euristicamente o **efeito fotoelétrico**, propondo o conceito de **quantum de luz**. Assim, a energia ( $E$ ) dos elétrons arrancados de alguns elementos químicos devido à incidência de luz (de frequência  $\nu$ ) é dada por:

$$E = h\nu - \phi_o,$$

onde  $h\nu$  é a energia do quantum de luz e  $\phi_o$  é a energia de ligação atômica do elétron.

Em 1905, Einstein apresentou, nos *Annales de Physique Leipzig* 17 (p.891), seu famoso trabalho intitulado

**Elektrodynamik bewegter Körper** (*Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*) no qual ele desenvolveu a hoje famosa **Teoria da Relatividade Restrita**. Nesse trabalho, ele demonstrou alguns resultados revolucionários usando a **transformação de Lorentz**:

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z,$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v x}{c^2}\right), \quad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Dentre esses resultados, destacam-se:

1. **Contração de FitzGerald-Lorentz:**  $L_o = \gamma L$ ;

2. **Dilatação do Tempo:**  $t = \gamma t_o$ ;

3. **Lei de Composição de Velocidade:**  $v =$

$$\frac{v_1 + \frac{v_2}{\gamma}}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}};$$

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

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

onde  $\phi$  é o ângulo entre o raio de luz de frequência  $\nu$  e a direção  $\mathbf{x}$ . Essa fórmula permitiu que Einstein descobrisse o **Efeito Doppler-Fizeau Transverso**:  $\nu'$  difere de  $\nu$  mesmo quando o movimento da fonte de luz é perpendicular ( $\phi = 90^\circ$ ) à direção de observação. É curioso observar que, apesar de Einstein haver deduzido a lei de composição de velocidades referida acima, ele não deduziu, a partir dela, a **fórmula de Fresnel** de 1821:

$$c' = \frac{c}{n} \pm v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right),$$

uma vez que bastaria ele usar aquela lei, expandi-la em primeira ordem de  $\frac{v_1 v_2}{c^2}$ , e fazer  $v_1 = \frac{c}{n}$ ,  $v_2 = v$  e  $v = c'$ .

Em 1905, o físico norte-americano Robert Williams Wood (1868-1955) publicou o livro intitulado **Physical Optics** (*Física Óptica*) no qual descreveu novas técnicas, desenvolvidas por ele próprio, para obter fotografia de ondas sonoras e ultra-sônicas, fotografia colorida, grades de difração de alta precisão e fluorescência.

Em 1905, Schwarzschild publicou no *Abhandlungen der Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse 4*, três artigos sobre Óptica Geométrica nos quais tratou exaustivamente sobre aberrações encontradas nos sistemas ópticos, usando para isso a **função característica**, introduzida pelo matemático irlandês William Ronan Hamilton (1805-1865), em 1828, e denominada de **eikonal** (do grego, que significa **imagem**) por Ernst Heinrich Bruns, em 1895. No primeiro deles, ele mostrou como surgem as aberrações nos sistemas ópticos.

No segundo, demonstrou como a combinação de dois espelhos esféricos (livre de aberração esférica) tornaria aplanática a objetiva de um telescópio, reduzindo também o coma. Por fim, no terceiro trabalho, Schwarzschild apresentou uma série de fórmulas para serem usadas numa variedade de sistemas ópticos compostos.

Em 1905, a unidade de comprimento ( $10^{-8}$  cm) utilizada pelo físico sueco Anders Jonas Ångström (1814-1874) em seus trabalhos sobre espectroscopia recebeu a denominação oficial de **1 ångström**  $\equiv 1 \text{ \AA}$ .

Em 1906, Hartmann apresentou no *Zeitschrift für Instrumentenkunde 26* a descrição do **espectrocomparador** que havia desenvolvido para calcular, de maneira expedita, a evolução do espectro estelar.

Em 1906, Barkla publicou nos *Proceedings of the Royal Society A77* um trabalho no qual, mais uma vez, mostrou a transversabilidade dos raios-X.

Em 1906, Einstein estudou nos *Annales de Physique Leipzig 20* o efeito fotoelétrico inverso, conhecido como o **efeito Volta**.

Em 1906, A. B. Porter publicou um trabalho na *Philosophical Magazine 11*, no qual apresentou uma teoria da formação de imagens no microscópio onde elas eram descritas como uma soma de frequências espaciais.

Em 1907, Thomson publicou um trabalho nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 14*, no qual afirmou que:

**1. As linhas espectrais não são devidas às vibrações de corpúsculos (isto é, elétrons) no interior do átomo, mas sim às vibrações de corpúsculos devidos a um campo de forças exterior ao átomo; 2. O éter tem disseminado**

**através dele linhas discretas de força elétrica em um estado de tensão e a luz consiste de vibrações transversais, e pulsos de "raios-Roentgen" viajam ao longo dessas linhas.**

Em 1907, Rayleigh apresentou, nos *Proceedings of the Royal Society A79*, o cálculo da difração de uma onda eletromagnética (luz) através de uma grade de difração, que se tornou a base da moderna espectroscopia de grades de difração.

Em 1907, Haga relatou nos *Annalen der Physik 33* uma experiência na qual observou a polarização dos raios-X.

Em 1907, Einstein apresentou nos *Annales de Physique Leipzig 23* (p. 197) uma nova discussão relativística sobre o **Efeito Doppler-Fizeau Transverso**

propondo, nessa ocasião, uma experiência para detectá-lo.

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:

$$c' = \frac{c}{n} \pm v \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

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

Em 1907, E. B. Rosa e N. E. Dorsey publicaram no *Bureau of Standards Bulletin 3* o resultado da medida da velocidade da luz que fizeram usando a **fórmula de Maxwell**:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\kappa_o \mu_o}}.$$

Fixando o valor de  $\mu_o$  como sendo  $4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{henry}}{\text{metro}}$ , eles calcularam o valor de  $\kappa_o$  medindo a capacidade de um condensador, que depende de  $\kappa_o$  e de algum fator geométrico, usando uma **ponte de Maxwell**. Assim, encontraram que  $\kappa_o$  valia:

$$\kappa_o = 8,851 \times 10^{-12} \frac{\text{farad}}{\text{metro}}.$$

Dessa forma, eles determinaram para  $c$  o seguinte valor:

$$c = 299.784 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Em 1907, os físicos franceses Aimé Cotton (1869-1951) e H. Mouton apresentaram nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 145* o resultado de uma experiência na qual observaram um novo aspecto do **efeito Faraday**. Assim, ao aplicarem, no nitrobenzeno líquido, um campo magnético forte perpendicular à direção do feixe de luz incidente, produziram no mesmo uma dupla-refração. Esse fenômeno ficou conhecido como **efeito Cotton-Mouton**.

Em 1907, Henry Joseph Round registrou no *Electrical World 19* a emissão de luz amarela do carboneto de silício (SiC) sob a ação de um campo elétrico.

Em 1907, Schwarzschild apresentou no *Abhandlungen der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse 5*, uma discussão sobre a formação de **linhas de Fraunhofer** na atmosfera solar.

Em 1908, o físico austríaco-polonês Marian Ritter von Smolan-Smoluchowski (1872-1917) explicou,

nos *Annales de Physique Leipzig 25*, a opalescência crítica observada pelo químico irlandês Thomas Andrews (1813-1885), em 1869, e também por M. Avenarius, em 1874, como sendo devida às flutuações da densidade do meio considerado que, por sua vez, provoca flutuações no índice de refração, alterando o espalhamento da luz. Ele deduziu a seguinte equação:

$$\langle \delta^2 \rangle = \frac{R T}{N V \left( - \frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_T},$$

onde  $\langle \delta^2 \rangle$  representa a média quadrática do número de flutuações das partículas. Ora, como no ponto crítico  $\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_T = 0$ , então a expressão acima tende para infinito.

Em 1908, Voigt publicou seu famoso livro intitulado **Magneto- und Elektro-optik**, no qual as propriedades elástica, térmica, elétrica, magnética e óptica dos cristais foram ordenadas em grandezas de três tipos: escalar, vetor e tensor. Aliás, observe-se que foi Voigt quem introduziu, em 1898, o termo **tensor** no vocabulário da Física-Matemática.

Em 1908, o físico alemão Gustav Mie (1868-1957) estudou, nos *Annales de Physique Leipzig 25*, o espalhamento da luz por uma gotícula de água na atmosfera. No entanto, logo se descobriu que a solução exata, em forma de série, encontrada por Mie, apresentava uma grande dificuldade, pois a mesma só se aplicava a partículas de dimensões pequenas comparadas com o comprimento de onda da luz. Ora, como a gotícula de água na atmosfera atinge dimensões milhares de vezes maiores do que o comprimento de onda da luz, era necessário também somar milhares de termos da **série de Mie** para se obter um resultado razoável.

Em 1908, Trouton voltou a realizar uma experiência (agora, auxiliado pelo 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 físico suíço Walter Ritz (1878-1909) propôs, nos *Annales de Chimie et Physique 13*, uma teoria segundo a qual a velocidade da luz dependia aditivamente da fonte emissora, e que era invariante por uma **transformação de Galileu**. Essa teoria, hoje conhecida como **Teoria da Emissão de Ritz**, alterava

alguns resultados da eletrodinâmica maxwelliana, mas, conseguia explicar o resultado da **experiência de Michelson-Morley**, quando nesta fosse usada uma fonte estelar. Porém, ela previa que na observação de uma estrela dupla gigante deveriam aparecer “estrelas fantasmas”, pois a luz emitida por cada estrela, no mesmo instante, chegaria em instantes diferentes na Terra.

Em 1908, o físico alemão Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947) comunicou nos *Annales de Physique Leipzig 27* a descoberta de uma nova série de linhas espectrais do hidrogênio na região do infravermelho, hoje conhecida como a **série de Paschen**.

Em 1908, Ritz publicou um trabalho no *Zeitschrift für Physik 9*, no qual formulou o **princípio da combinação** segundo o qual a frequência ( $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ) de uma linha arbitrária do espectro de qualquer átomo pode ser representada como a soma algébrica das frequências de duas outras linhas quaisquer do mesmo espectro:

$$\nu(n, n-1) + \nu(n-1, n-2) = \nu(n-2).$$

Com esse princípio, Ritz explicou um fato que intrigava os espectroscopistas, qual seja, o de que existiam mais raias claras (espectro de emissão) do que escuras (espectro de absorção). Observe-se que no espectro de um determinado elemento químico as raias escuras sempre coincidem com as claras.

Em 1909, o físico inglês Geoffrey I. Taylor (1886-1975) apresentou nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 15* o resultado de uma experiência de difração (sugerida por J. J. Thomson) usando um feixe bem fraco de luz ( $\sim 5 \times 10^{-6}$  erg/s), na tentativa de obter interferência de “unidades de energia luminosa” (quanta de luz). O resultado obtido nessa experiência, após um mês de exposição ao feixe fraco, coincidiu com o resultado tradicional: nenhuma influência de “unidades de energia luminosa” foi observada.

Em 1909, Eugen Bessler publicou um trabalho nos *Annalen der Physik 28* relatando uma experiência na qual observou a polarização dos raios-X.

Em 1909, Einstein estudou, no *Physikalische Zeitschrift 10*, a radiação em equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Partindo da **equação de Planck** (1900) para a densidade de radiação  $\rho(\nu)$  e usando a técnica da **expansão de Fourier** para tratar as flutuações, Einstein demonstrou que a radiação do corpo negro exhibe, **simultaneamente**, flutuações características de ondas e de partículas, isto é:

$$\langle [\Delta E \nu]^2 \rangle_{total} = \langle [\Delta E \nu]^2 \rangle_{particula} + \langle [\Delta E \nu]^2 \rangle_{onda},$$

onde:

$$\langle [\Delta E \nu]^2 \rangle_{particula} = h \nu \rho(\nu) V,$$

$$\langle [\Delta E \nu]^2 \rangle_{onda} = \frac{c^3}{8 \pi \nu^2} \rho^2(\nu) V, \quad (V = \text{volume})$$

Essas expressões indicavam que no limite de alta frequência a radiação do corpo negro parece comportar-se como um gás de partículas independentes; no limite de baixa frequência parece comportar-se como uma superposição de ondas clássicas; na região intermediária ela tem a característica de ambos.

Em 1909, o físico alemão Rudolf Walther Ladenburg (1882-1952) publicou no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 17* um artigo de revisão sobre o efeito fotoelétrico.

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  $\lambda$ ) 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)**, para o qual escreveu a seguinte equação:

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

que representava a lei de conservação do momentum.

Em 1910, o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936) e D. Hondros publicaram, nos *Annales de Physique Leipzig 32*, um trabalho teórico sobre a possibilidade da transmissão de luz em um guia de onda dielétrico. Este foi o primeiro passo para o desenvolvimento das **fibras ópticas**.

Em 1910, Einstein publicou um trabalho nos *Annales de Physique Leipzig 33*, no qual demonstrou que o espalhamento da luz de comprimento  $\lambda$  era dado por:

$$r \propto \frac{K_T}{\lambda^4},$$

onde  $r$  indica a razão entre as intensidades espalhada e incidente, e  $K_T$  a **compressibilidade isotérmica**, dada por:

$$K_T = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T.$$

Ora, como  $K_T$  atinge o valor infinito em  $T_c$ , então, para Einstein, esse resultado representava uma explicação satisfatória para a opalescência crítica. Em vista disso, Einstein concluiu que:

### O azul do céu é devido à opalescência crítica.

Em 1910, o físico francês Georges Sagnac (1869-1928) publicou um artigo nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 150, em que descreveu um **interferômetro de rotação** no qual todos os seus componentes - espelhos, fontes de luz e chapa fotográfica - situavam-se em um disco que podia ser girado em várias velocidades. Nesse dispositivo, a luz viajava em torno do disco e ao longo de um circuito poligonal determinado por sucessivas reflexões em quatro espelhos colocados sobre o perímetro do disco. Assim, a luz proveniente da fonte é dividida em dois fei-

xes que viajam em torno do disco em direções opostas e, ao se recombinarem na chapa fotográfica, produzem figuras de interferência.

Em 1910, Schwarzschild publicou a Parte A do texto intitulado **Aktinometrie (Actinometria)**, no qual reuniu suas medições sobre as radiações solares. Ele deu esse nome porque a luz solar produzia um efeito fotoquímico conhecido como **actínico**.

Em 1910, Voigt publicou o livro intitulado **Kristallphysik (Física dos Cristais)**, no qual resumiu suas pesquisas sobre as propriedades físicas dos cristais, ordenadas em grandezas de três tipos: escalar, vetor e tensor.