

Histórias na Origem da Astrofísica

Vladimir Jearim P. Suárez
ON-OV

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF

Rio de Janeiro
Fevereiro 19 de 2016

Conteúdo

- Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s
- Todo o sólido desmancha no ar... (1880s-1913)
- A Astrofísica andando seus próprios passos... Até 1930



Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s I

- **Kant**(S. XVIII): Antinômias e prolegômenos → *Sería absurdo querer conhecer, de objeto algum, mais do que é próprio da experiência possível*
- **Messier**(1771): Primeiro catálogo de “nebulosas” ... Vestígios de cometas, mundos, ...
- **Herschel** (1791): Descobridor do planeta Urano; Descobridor dos “raios calóricos” além do vermelho no prisma

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s II



- Herschel: *Existe um fluido brilhante de natureza não estelar que forma nebulosas tênues..., Todas as estrelas do céu pertencem a nossa galáxia*

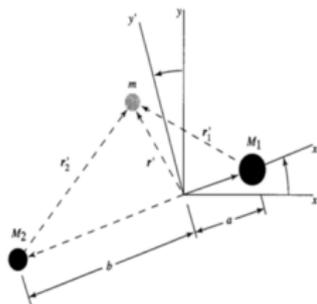
Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s III

- Regra de **Titius-Bode** obtida teóricamente rende uma descoberta relevante: Ceres, o maior objeto do Cinturão de Asteoides (**Piazzi**, 1801)

Até o primeiro terço do século XIX a Astronomia principalmente se tratava do estudo das efemérides, da Astronomia de Posição e da Mecânica Celeste

- O determinismo mecanicista impulsionado por **Lagrange** e **Laplace** motivava o interesse de descrever os movimentos dos planetas e seus satélites: Estudo do problema dos três corpos de **Euler**

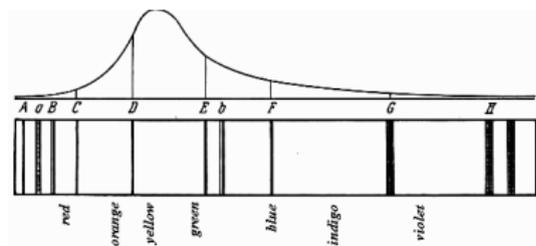
Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s IV



- **Ritter** (1801): Descobre os “raios químicos” → radiação além do violeta capaz de interagir diretamente com o Cloreto de Prata
- **Wollaston** (1802): Primeira observação das “faixas escuras” que separam as nuances da luz solar

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s V

- Noções “quantitativas” sobre a natureza e composição solar, **Arago** (1811): Luz solar não é polarizada, superfície solar é gasosa
- **Fraunhofer** (1814): Rede de difração permite diferenciar quantitativamente as “nuances da luz solar”. Diferentes estrelas têm diferentes nuances.

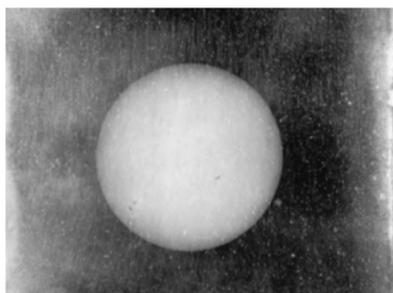


Além do paradigma mecanicista do 18, **Comte** estrutura o **Positivismo** (1842) como uma sistematicidade da construção do conhecimento científico... e como medida das suas possibilidades

- *O conhecimento possível é o imediato dos sentidos... Nunca se conhecerá a composição química das estrelas*
- **Parsons** (1840): Algumas “nebulosas” possuem estrutura em forma espiral. Primeira representação gráfica da Nebulosa M51. Nebulosas como objetos diversos e em evolução
- **E. Becquerel** (1842): Primeira “foto” do espectro solar até o domínio UV

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s VII

- **Waterston** (1843): Enunciado do *Teorema de equipartição da energia* consolida a noção duma Física concordante com a concepção positivista
- Primeiro daguerrotipo do Sol: **Fizeau & Foucault** (1845): Confirmação do critério de Arago sobre a estrutura superficial do Sol



Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s VIII

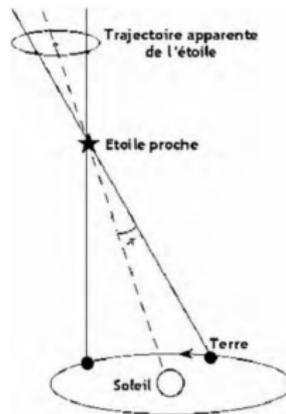
- **Roche** (1850): Interação entre sistemas gravitantes: Forças de Maré e efeito disruptivo
- **von Helmholtz** (1853): Explicação possível da energia solar é a contração gravitacional permanente do Sol e sua transformação em energia térmica ($t_{\text{Kelvin-Helmholtz}} \simeq 10^7$ anos)

Em poucos anos, com uma estrutura teórica mais sólida e problemas-alvo mais específicos a análise da luz dos objetos celestes rende muita informação que traz novidades impensadas

- **Airy** (1857): *Medir a Unidade Astronômica é o problema mais digno da Astronomia do nosso tempo*

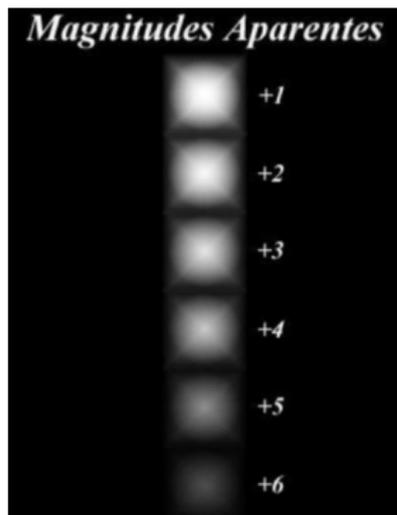
Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s IX

- Método da estimativa de distâncias astronómicas é a *Paralaxe trigonométrica*



Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s X

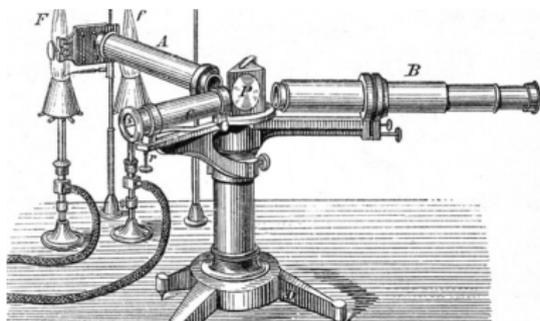
- Fizeau **vs.** Foucault: Medida precisa da velocidade da luz permitiria calcular a UA a partir do estudo das posições dos satélites de Jupiter (Fizeau: $v_{luz} \simeq 313000 \text{ km s}^{-1}$)
- **Pogson** (1856): Sistema de classificação estelar clássico de **Hipparco** é exprimido em forma quantitativa: Análise do fluxo “radiativo” dos objetos celestes
$$m - n = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{F_m}{F_n} \right)$$



- **Carrington** (1858): Análise astrofotográfica da variação latitudinal das manchas solares

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s XII

- **Maxwell** (1859): Análise estatística da distribuição de velocidades em sistemas de partículas.
- **Bunsen & Kirchhoff** (1860): O “Bico de Bunsen” permite estabelecer os espectros de diferentes elementos (Fe, Ca, Mg, Ni, Cr, Na) e a descoberta de outros (Cs, Rb, Th, In, Ga)



- Kirchhoff (1862): Coincidência entre frequências das linhas “emergentes” e as “incidentes” nos espectros dos corpos exprime a relação entre a capacidade de absorção e emissão de radiação, dependentes só da temperatura do corpo:

Modelo do corpo negro

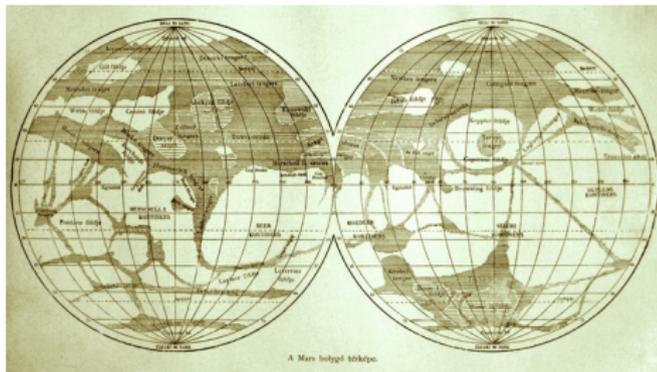
- **Angström** (1862): Linhas de Hidrogênio no espectro do Sol
- **Huggins** (1864): Observou linhas espectrais nalgumas nebulosas de Messier, semelhantes às produzidas no laboratório, observadas quando havia descargas elétricas intensas em gases → Nebulosas \neq estrelas

- **Jansen** (1868): Descobre o Hêlio

No estudo dos planetas, a hipótese kantiana da origem do Sistema Solar continuava sendo a mais elaborada explicação e vários fatos pareciam bater com ela. Em aspectos mais específicos, salvo os resultados da Mecânica Celeste, a imaginação delirante estava no comando

- **Schiaparelli** (1877): Observação de Marte e confusão editorial (*canals* \neq *channels*) → “Não há nenhum fato concludente sobre a origem desses canais.”

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s XVI



- **Flamarion** Divulgação científica: (1862) *La pluralité des mondes habités*, (1879) *L'Astronomie populaire*, (1892) *La planète Mars et ses conditions d'habitabilité*, Astrofotografia e descrição da atmosfera terrestre

Surgimento da Astrofísica: 1800-1880s XVII

- A diferença do cientista de fim do século XIX e do cientista do fim do século XVIII é uma certa independência dos fins pragmáticos que pregava o Positivismo.
- O grande problema da Astronomia neste momento era uma enorme quantidade de dados disponíveis e limitações de interpretação. Os dados e fatos disponíveis parecem não configurar uma teoria sólida
- Os grandes debates da Física entraram na Astronomia: Descrições estatísticas vs. descrições macroscópicas; Luz como onda ou partícula; Atomismo ou Descrição de meios contínuos...

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) I

- No começo do século XIX, sem conhecimento das ondas eletromagnéticas, se sabia da existência dum “calor obscuro”, diferente do calor radiante associado à luz solar
- **Delaroche** (1811): O calor obscuro tem a mesma natureza do calor radiante
- O enfoque da Termodinâmica no século XIX deixou de ser substancialista depois de Maxwell & **Boltzmann**: descrição estatística dos gases e do transporte da radiação
- **Tyndall** (1864): Conceito de *Temperatura de cor*, definição do domínio da radiação IR. Explicou que, tendo grande capacidade para absorver calor, o vapor d'água é a componente da atmosfera que controla sua temperatura.

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) II

- **Stefan** (1879): Relação entre Fluxo e Temperatura para o modelo de Corpo Negro em todos os comprimentos de onda, desde o IR até o UV.
- **Rowland** (1882): *Onde está Kepler para as moléculas?*; Rede de difração côncava com mais de 14000 linhas", espectroscopia de 36 elementos e maior mapa espectroscópico do Sol então. Medida das linhas espectrais não parecia ser interessante à luz de nenhuma teoria.
- **Wien** (1883): A intensidade da emissão dum corpo negro pode ser aproximada com uma expressão da forma $I(\lambda, T) \propto \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5}$, com $f(\lambda T) = e^{\frac{-B}{\lambda T}}$. A *Lei de Wien* descreve bem a intensidade da radiação para valores pequenos de λ

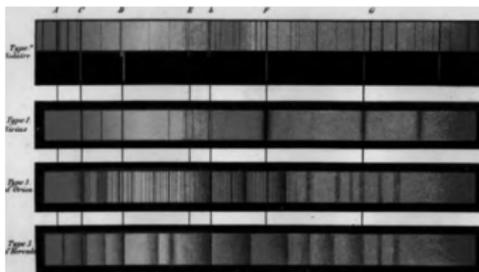
Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) III

- Boltzmann (1884): Demonstração formal da Lei de Stefan e implementação física do corpo negro padrão
- **Balmer** (1885): Regra empírica dos multipletos das linhas espectrais do Hidrogênio, com base nos resultados de Angström. Estados multipletos dependem de relações entre números inteiros
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), n_2 > n_1$$
- **Michelson & Morley** (1887): Experimento que determina a invariância da velocidade da luz e determina seu valor “c”, desestimando a necessidade da existência do éter sugerida por cientistas desde **Fresnel** até **Clausius**

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) IV

- **H. Hertz** (1888): Descobre a produção e propagação de ondas eletromagnéticas
- **Poincaré** (1888): Não existem soluções gerais estáveis para o problema de três ou mais corpos
- Poincaré (1899): “Peu nous importe si l'éther existe réellement... ce qui compte pour nous, c'est que tout se déroule comme s'il existait...”
- **Pickering & Girls*** (1890s-1915): Classificação das estrelas segundo seu espectro: **A**: Linhas mais fortes de Hidrogênio, **B**: Linhas mais fortes de Hélio...
*: **Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Jump Cannon, Henrieta Leavit**

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) V



Oh Be A Fine Girl/Guy Kiss Me... Classificação espectral com nuances: OII, GV (Sol), MIII

- Henrieta (1902): Catálogo de 1777 estrelas variáveis cefeidas nas Nuvens de Magalhães

- **Lorentz** & Poincaré (1892): Teoria do éter luminífero para descrever o movimento da luz no vácuo. O “fracasso” da experiência de Michelson & Morley pode ser superado com novas interpretações... *Transformações de Lorentz*
- **Perrin** (1895): Demonstra a existência dos elétrons usando descargas de raios catódicos, otimizando a montagem do *Tubo de Crookes*
- **Roentgen** (1895): Descargas de raios catódicos em superfícies enriquecidas de sais de Fósforo permitem encontrar uma radiação emergente inusitada, *Raios X*



- **H. Becquerel** (1896): Emissão de radiação por luminiscência solar sobre sais de Urânio. A radiação também é emitida pelos sais sem a iluminação → Emissão espontânea (Radioatividade)

- **Thomson** (1897): Na hipótese da existência de partículas nos raios catódicos, descobre a relação q/m das partículas. Calcula o valor da carga e em 1899 e comprova que seu valor é independente do material do cátodo. Na procura do descaso de massa perfila o seu modelo atômico.
- **Rutherford** (1898): Descoberta dos “dois jatos” de radiação da radioatividade → raios α e β
- **Villard** (1900): Existe um terceiro “jato” que é mais penetrante que os outros → raios γ . Raios α são suscetíveis ao campo magnético, raios β não.

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) IX

- **Lord Rayleigh & Jeans (1900):** Modelo de intensidade da radiação do corpo negro para comprimentos de onda longos $I(\lambda, T) \propto \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5}$, com $f = B\lambda T$
- O modelo de intensidade do corpo negro de Wien rende resultados incoerentes quando T aumenta ($I \rightarrow \infty$). O modelo de R-J dá previsões incoerentes quando λ é muito pequeno \rightarrow *Catástrofe Ultravioleta*

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) X

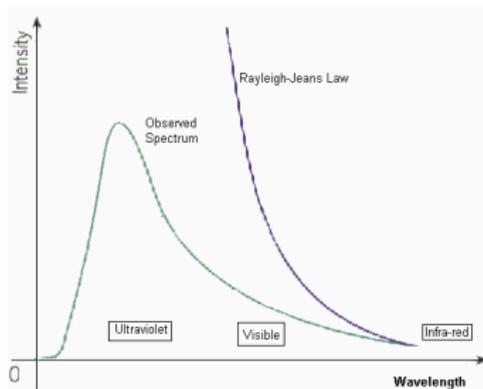
Os últimos anos do século XIX viram aparecer uma ciência com princípios limitados na sua aplicabilidade, com discussões abertas e acirradas, sobre o significado das descobertas que a cada vez ampliavam mais as possibilidades do que parecia já concluído.

A evidência ia à contramão de alguns princípios e as vezes criava cenários divergentes, semsaídas, interpretações artificiosas de resultados que lembravam “as esferas epicíclicas” para não invalidar modelos aceitos.

Só duas pequenas nuvens no horizonte da Física, disse Lord Kelvin em 1900...

- *Revolucionário a pesar de sí*, **Planck** em 1901 assume que o corpo negro se comporta como um conjunto de osciladores que contribuem com unidades mínimas e fixas de energia cujo valor depende da frequência, $E = h\nu$.
- A função de intensidade de Planck tem a forma $I(\lambda, T) \propto \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5}$, com $f(\lambda T) = \frac{1}{e^{\frac{B}{\lambda T}} - 1}$. O enfoque do modelo de Planck é reproduzir uma distribuição discretizada de energia.

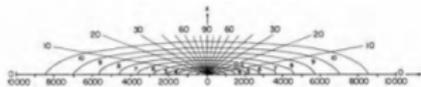
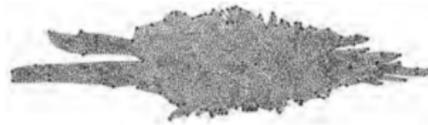
Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) XII



- **Einstein** publica em 1905 três trabalhos referentes a três problemas fundamentais que marcaram o fim do século XIX e aprofunda o sentido dos resultados de Planck, no tocante à radiação de corpo negro. A equivalência entre a massa e a energia terá consequências relevantes posteriormente

- *Efeito fotoelétrico*: Luz de frequências específicas é capaz de liberar elétrons de superfícies metálicas. Modelo de Planck fundamenta a descrição → Luz deve estar formada de partículas com energia discreta
- Rutherford (1907): Partículas α são núcleos de Hélio
- **Kapteyn** (1908): Primeira determinação do espessor da Galáxia, sem certeza sobre a sua extensão ou sobre a localização do Sistema Solar

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) XIV



- Rutherford contesta o modelo atômico de Thomson (1909) em virtude de experiências com a interação entre partículas α e superfícies metálicas. A massa do átomo é principalmente concentrada no centro. Modelo atômico “planetário”

Todo o sólido desmancha no ar... (1880-1913) XV

- Rutherford verifica que há um padrão de difração dos R-X nas estruturas cristalinas - Espectroscopia de R-X (1911) - Definição do conceito de isótopo (1912)
- Einstein calcula o efeito de curvatura da trajetória da luz na proximidade de corpos massivos (1911). Prediz tal efeito relativo à luz de estrelas próximas do Sol. Eclipse de 29 de maio de 1919 observado por **Crommelin**. Jornal de Sobral (CE) é o primeiro meio em validar a TGR



- **Bohr** (1913): Modelo atômico de Rutherford contradiz a Eletrodinâmica. Devem existir órbitas possíveis para os elétrons nas quais estes não emitem espontaneamente. A mudança de nível dum elétron entre dois níveis n_1 , n_2 acontece quando há emissão ou absorção de radiação de frequência ν_{1-2} : $E_1 - E_2 = h\nu$
- Modelo de Bohr do átomo de Hidrogênio se ajusta bem às séries espectrais de Balmer, **Lyman**, **Paschen** e **Bracket**
- **Franck & G. Hertz** (1914): Bombardeio de átomos com elétrons produz ionizações que batem bem com o modelo de Bohr

- *A matéria lhe diz ao espaço como se curvar e a geometria lhe diz à matéria e a radiação como se mover* Einstein (1915)

“O ponto de vista que considera a mecânica como a base de todos os outros ramos da física, explicando todos os fenômenos físicos pelas concepções mecânicas, é, na nossa opinião, um preconceito.”

Mach (1883)

A Astrofísica andando seus próprios passos I

- Relação de magnitude e fluxo radiativo de Pogson permite ser estudada para fluxos integrados em todos os comprimentos de onda ou em comprimentos de onda
- **Magnitude Bolométrica:** Magnitude integrada em todos os comprimentos de onda.
Fluxo Bolométrico: Fluxo associado à radiação em todos os comprimentos de onda. → Lei de Stefan-Boltzmann
- Um sistema de magnitudes sempre procura tomar um objeto de referência, cuja magnitude possa ser declarada “zero” em qualquer filtro: $\alpha - Lyrae$ (Vega de Lira)

A Astrofísica andando seus próprios passos II

- **Índice de cor:** Comparação entre diferentes bandas fotométricas dum objeto

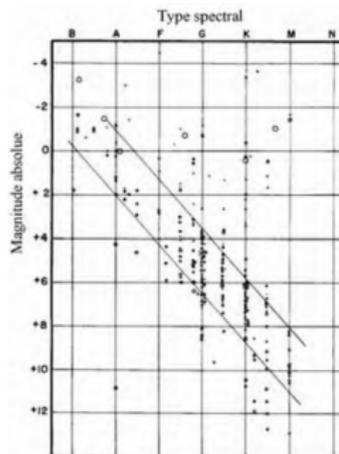
$$(B - V) = Cte - 2.5 \log \left(\frac{\int F_\lambda S_B d\lambda}{\int F_\lambda S_V d\lambda} \right) \simeq Cte - 2.5 \log \left(\frac{B(\lambda_B, T) \Delta\lambda_B}{B(\lambda_V, T) \Delta\lambda_V} \right)$$

Com a resolução dos problemas da Física que impediam abordar várias questões da Astronomia, em poucos anos esta se subdivide em virtude da escala de distância estudada, teoria/observação

- O índice de cor e a temperatura têm uma relação inversa. A temperatura das estrelas-corpo negro pode ser estimada usando a *Lei de deslocamento de Wien*.
- **Schwarzschild** (1910): Modelo para estudar a transferência de energia no Sol: Equilíbrio radiativo na atmosfera solar

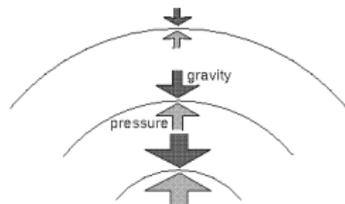
- **Hertzprung & Russell (1905-15):** Catálogo-Diagrama da correlação entre classe espectral e luminosidade da estrela → Distribuição das estrelas no diagrama mostra diferenças energéticas e insinua estágios evolutivos diferentes

A Astrofísica andando seus próprios passos IV



Relação período-luminosidade das variáveis cefeidas: Novo critério para estimar distâncias (*Paralaxe fotométrica*)

- **Eddington** (1916): Estrelas são configurações de gás cujo equilíbrio depende só da pressão de radiação. Possuem um gradiente interno de temperatura, com $T_0 \simeq 10^7 K$. Estrelas são estáveis e não tem convecção interna (...)



- **Slipher** (1916): Espectros de algumas nebulosas com linhas já conhecidas mostram desfasagem respeito aos comprimentos de laboratório, principalmente pro vermelho

A Astrofísica andando seus próprios passos VI

- **Shappley** (1918): Obtenção da distancia de estrelas afastadas do plano galáctico usando variabilidade de estrelas *RR-Lira*
Shappley encontra que ha enxames de estrelas longe do plano, mas ainda pertenciam à Galáxia.
Sugere que a desfassagem encontrada por Slipher é devida ao *Efeito Doppler* (1919)
Uma das grandes questões da astronomia sempre foi descrever nossa vizinhança, nossa localização na Galáxia e sua estrutura.
- **Curtis & Shappley** (1921): Curtis considera que enxames e nebulosas afastados do plano galáctico são “Universos ilha”, objetos independentes da nossa galáxia e muito distantes.
Shappley considera que o único Universo é a Galáxia → *Grande Debate da IAU*

A Astrofísica andando seus próprios passos VII

Os recentes sucessos da Teoria Geral da Relatividade motivaram que uma legião de Matemáticos, Físicos e Astrônomos propusessem modelos de sistemas gravitacionalmente ligados, introduzindo a Teoria, mas sem considerar efeitos de campos gravitacionais muito fortes

- **Friedman** (1922): As equações de campo de Einstein aplicadas a um universo homogêneo e isotrópico tem soluções tais que o Universo poderia estar em expansão
- Einstein não gostou nada desse resultado do Friedman e procura uma solução estática no mesmo sentido que ele fez, introduzindo uma constante de integração que ele chamou *Constante Cosmológica*

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda = -\frac{k}{R^2}$$

Aprimorar a análise espectral mostrou ser uma forma de complementar a informação dos estudos de campo mais distante do céu

- Modelo difusivo da atmosfera estelar de Eddington (1920-23):
Radiação emitida pela estrela é absorvida (excitações/ionizações).
Perfil das linhas espectrais mostra quantidade de matéria que absorve radiação em comprimentos de onda específicos.

A Astrofísica andando seus próprios passos IX

- (1925) Origem da energia radiada pelas estrelas pode ser a transmutação de núcleos de elementos químicos, possivelmente a transformação de Hidrogênio em Hélio sob altas temperaturas
- **Oort** (1926): Descreve o modelo de rotação da Galáxia, baseado na ideia da rotação diferencial e estima o potencial gravitacional da Via Lactea
- **Hubble** (1924-26): Nebulosas distantes são galáxias diferentes da nossa (10x a distância as Nuvens de Magalhaes). M33 e M31 têm seus próprios sistemas estelares

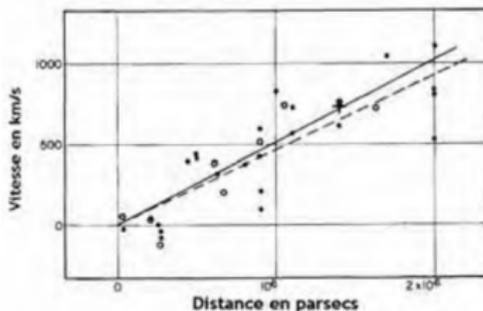
A Astrofísica andando seus próprios passos X

- **Lindblad** (1927): Modelo da rotação da Galáxia baseado no conceito de *ressonância de corotação* entre as órbitas estelares e o movimento do gás/poeira do disco galáctico
- **Lemaitre** (1927): Resultado de Friedman sobre a expansão está associado a uma condição de singularidade gravitacional no começo do Universo
- **Bowen** (1928): Algumas linhas de emissão intensas na Nebulosa de Orion insinuavam a existência dum novo elemento: “Nebulium”

Linhas abundantes que não se observam em laboratório podem ser transições com baixa probabilidade de acontecer (baixa densidade) → *Transições proibidas*

A Astrofísica andando seus próprios passos XI

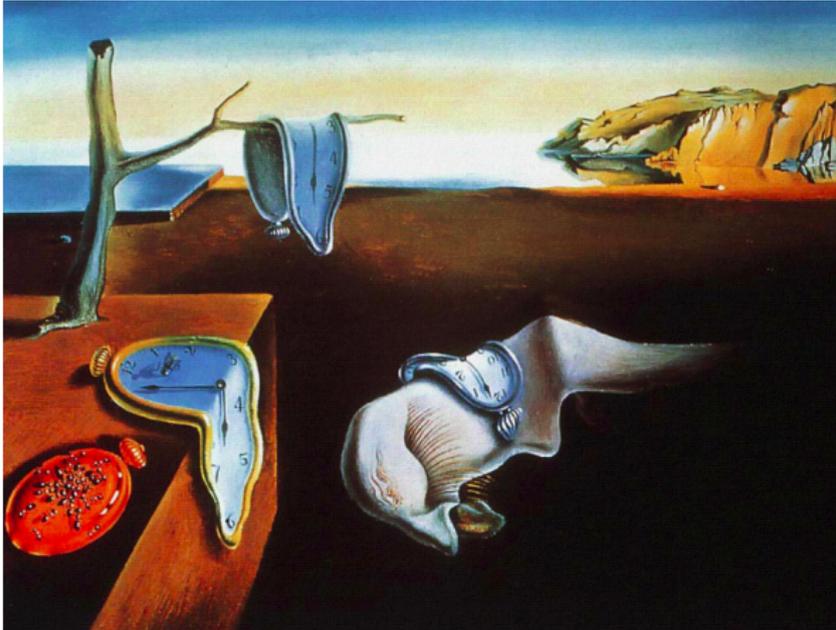
- Hubble (1929): Usando um grande levantamento de galáxias a diferentes distâncias, mostra que ha uma tendência entre o maior deslocamento espectral pro vermelho e a maior distancia do objeto → *Universo está se expandindo*



A Astrofísica andando seus próprios passos XII

- **Trumpler** (1930): Cria um modelo de extinção visual associado à poeira do Meio Interestelar que pode melhorar a precisão da estimativa de distancias
- **Tombaugh** (1930): Descobre um novo planeta, o número 9, batizado Plutão

Obrigado!



- Carroll, B. & Ostlie, D. *An introduction to modern Astrophysics*. Pearson Education, Inc. San Francisco, 2007
- Lequeux, J. *L'Universe dévoilé: Une histoire de l'Astronomie de 1910 à aujourd'hui*. EDP Sciences. Paris. 2005
- Maury, J. P. *Petite histoire de la Physique*. Larrouse. Paris. 1992