

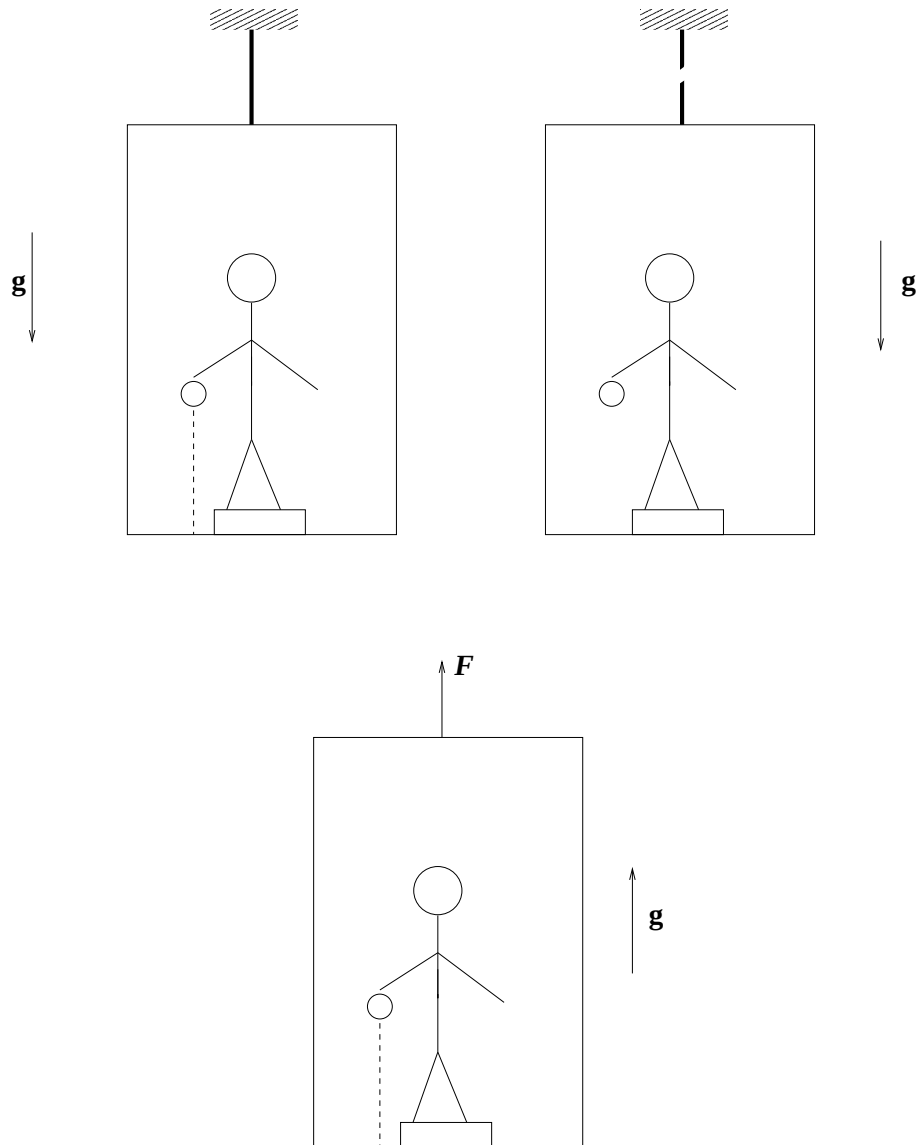
RELATIVIDADE GERAL

1. O ARTIGO DE REVISÃO DE 1907
2. TRÊS ANOS E MEIO DE SILÊNCIO
3. PRAGA E O DESVIO DA LUZ
4. COLABORAÇÃO COM MARCEL GROSSMANN
5. AS EQUAÇÕES DE CAMPO DA GRAVITAÇÃO
6. EINSTEIN CELEBRIDADE MUNDIAL
7. COSMOLOGIA E A CONSTANTE COSMOLÓGICA
8. AVANÇOS DA TEORIA ATÉ OS DIAS DE HOJE

1. O ARTIGO DE REVISÃO DE 1907

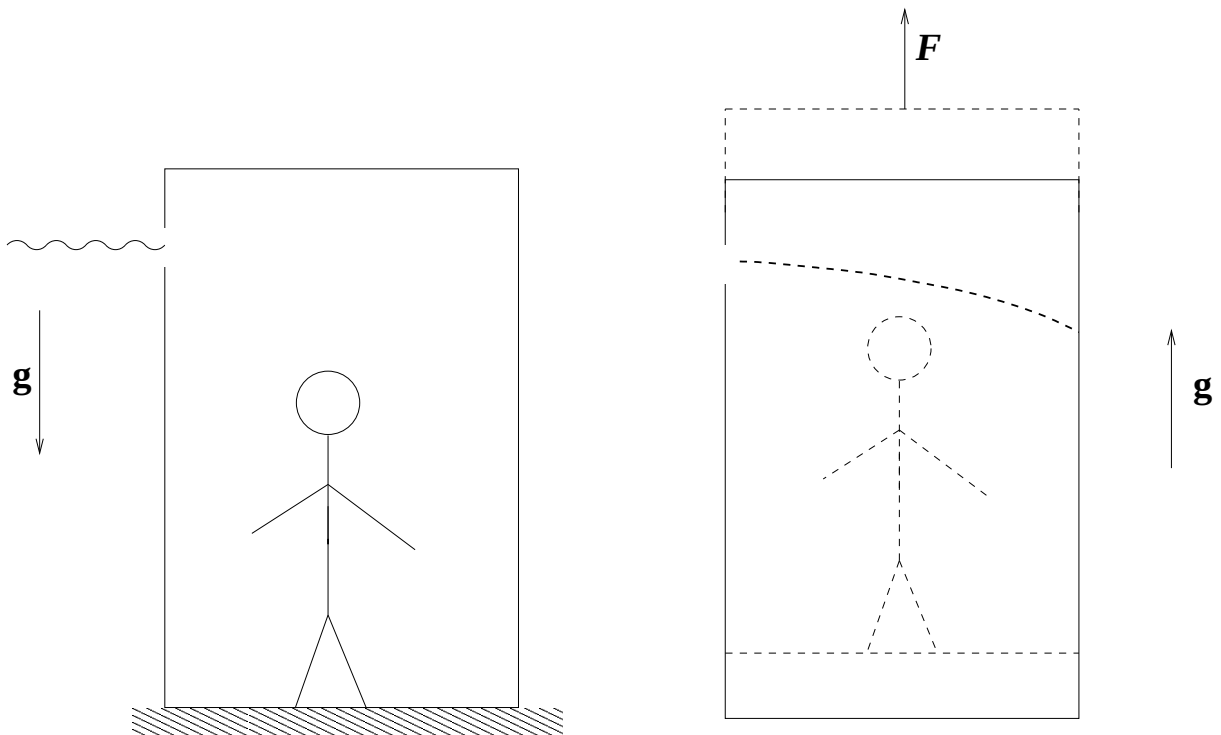
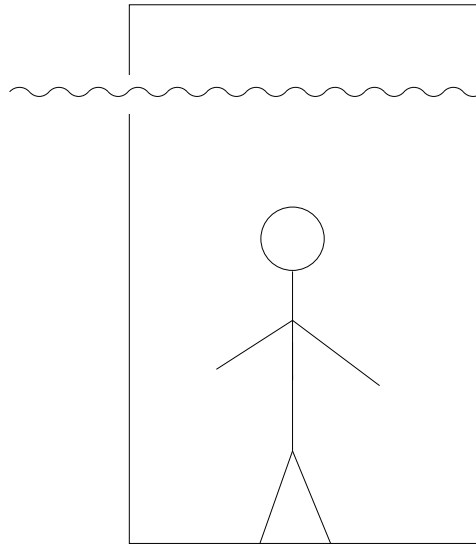
Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik

1.1 O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

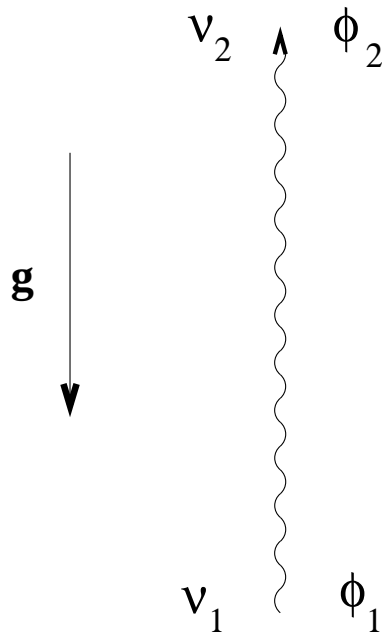


“O pensamento mais feliz da minha vida.”

1.2 DESVIO DA LUZ PELO CAMPO GRAVITACIONAL



1.3 DESVIO PARA O VERMELHO GRAVITACIONAL



$$h\nu_1 + \frac{h\nu_1}{c^2}\phi_1 = h\nu_2 + \frac{h\nu_2}{c^2}\phi_1$$

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 + \frac{\phi_1}{c^2}}{1 + \frac{\phi_2}{c^2}} \approx \nu_1 \left(1 + \frac{\phi_1}{c^2} - \frac{\phi_2}{c^2}\right) = \nu_1 \left(1 - \frac{\Delta\phi}{c^2}\right)$$

Na superfície do Sol: $\phi/c^2 = GM/Rc^2 \approx 10^{-6}$.

Como o período τ é o inverso da frequência:

$$\tau_2 = \tau_1 \left(1 + \frac{\Delta\phi}{c^2}\right)$$

2. TRÊS ANOS E MEIO DE SILÊNCIO

Carta a Johann Jakob Laub (1908): “Eu estou incessantemente ocupado com a questão da constituição da luz.”

Carta a Johannes Stark (1908): “Você mal pode imaginar quanta dificuldade eu tenho encontrado para inventar um tratamento matemático satisfatório da teoria quântica.”

Carta a Michele Besso (1909): “Refleti um pouco e sem sucesso sobre os quanta de luz.”

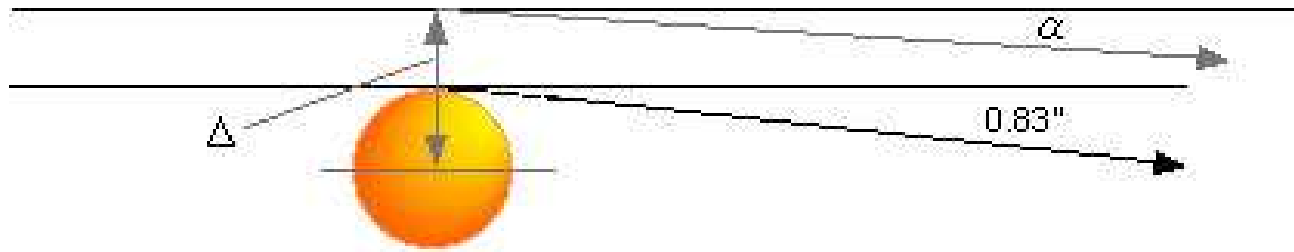
Carta a Laub (1910): “Neste momento eu tenho grandes expectativas de resolver o problema da radiação.”

Carta a Laub (1910): “O enigma da radiação não quer ceder.”

Carta a Besso (1911): “Eu não pergunto mais se esses quanta realmente existem. Nem eu tento mais construí-los, pois agora eu sei que meu cérebro é incapaz de penetrar no problema dessa maneira.”

3. PRAGA E O DESVIO DA LUZ

Annalen der Physik (1911)



$\alpha = 2kM / c^2 \Delta$, where k is the gravity constant, M the mass of the sun, and Δ is the distance of the ray from the center of the sun

Apelo aos astrônomos: “É urgente que os astrônomos se preocupem com a questão aqui levantada, mesmo que as considerações anteriores pareçam insuficientemente fundamentadas ou até temerárias.”

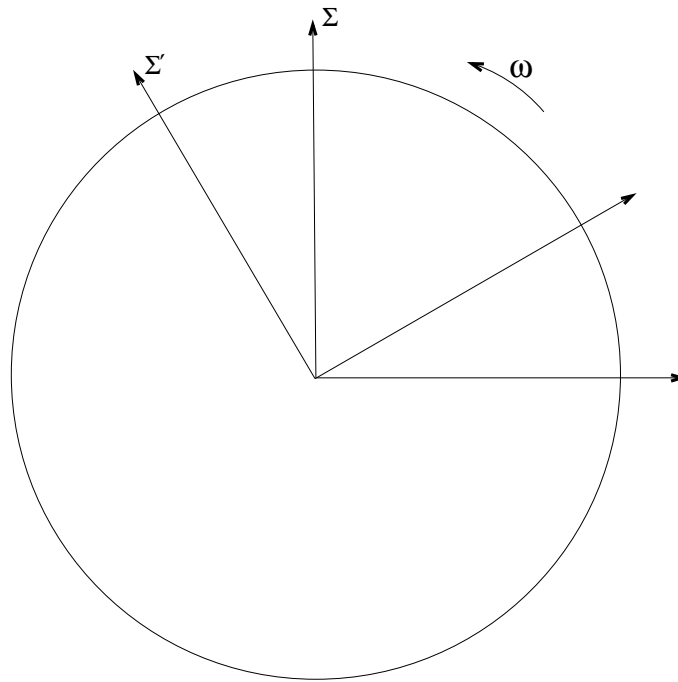
PRECURSORES

Isaac Newton (*Opticks*, 1704, Query 1): “Não agem os corpos à distância sobre a luz e, por sua ação, encurvam seus raios? E não é essa ação mais forte à menor distância?”

Johann Georg von Soldner, *Berliner Astronomisches Jahrbuch*, 1801: Tratando a luz como um feixe de partículas, Soldner aplicou a teoria do espalhamento newtoniana e encontrou $\alpha = 0,84''$!

Este trabalho permaneceu desconhecido pelos físicos até 1921, quando foi reproduzido parcialmente por Philip Lenard na revista *Annalen der Physik*, como parte da campanha anti-semita para desacreditar Einstein.

O ESPAÇO-TEMPO CURVO



Vista do referencial girante, a circunferência do disco parece mais curta (contração dos comprimentos na direção do movimento) mas o raio é o mesmo (comprimentos perpendiculares ao movimento não mudam). Logo, no referencial girante a razão entre a circunferência e o diâmetro do círculo não é igual a π e a geometria não é euclidiana! Como o referencial girante acelerado comporta-se como um sistema inercial no qual existe um campo gravitacional, o campo gravitacional altera a geometria do espaço. Como o tempo também é alterado, a gravitação afeta a geometria do espaço-tempo.

Zeitschrift für Mathematik und Physik (1913)

Grossmann: “Desde que eu não tenha que assumir nenhuma responsabilidade por quaisquer asserções ou interpretações de natureza física.”

Recuo: invariância apenas sob transformações lineares.

5. 1915: AS EQUAÇÕES DE CAMPO DA GRAVITAÇÃO

Entre julho e outubro de 1915 Einstein muda de idéia: covariância geral.

Carta a Hilbert (07/11/1915): “Eu percebi há cerca de quatro semanas que meus métodos anteriores de demonstração eram enganosos.”

Comunicações à Academia Prussiana de Ciências

4 de Novembro: Restrição a transformações unimodulares; equações de campo incorretas.

11 de Novembro: Restrição ainda maior ($g = 1$) mas equações de campo quase corretas.

18 de Novembro: Einstein apresenta duas de suas maiores descobertas.

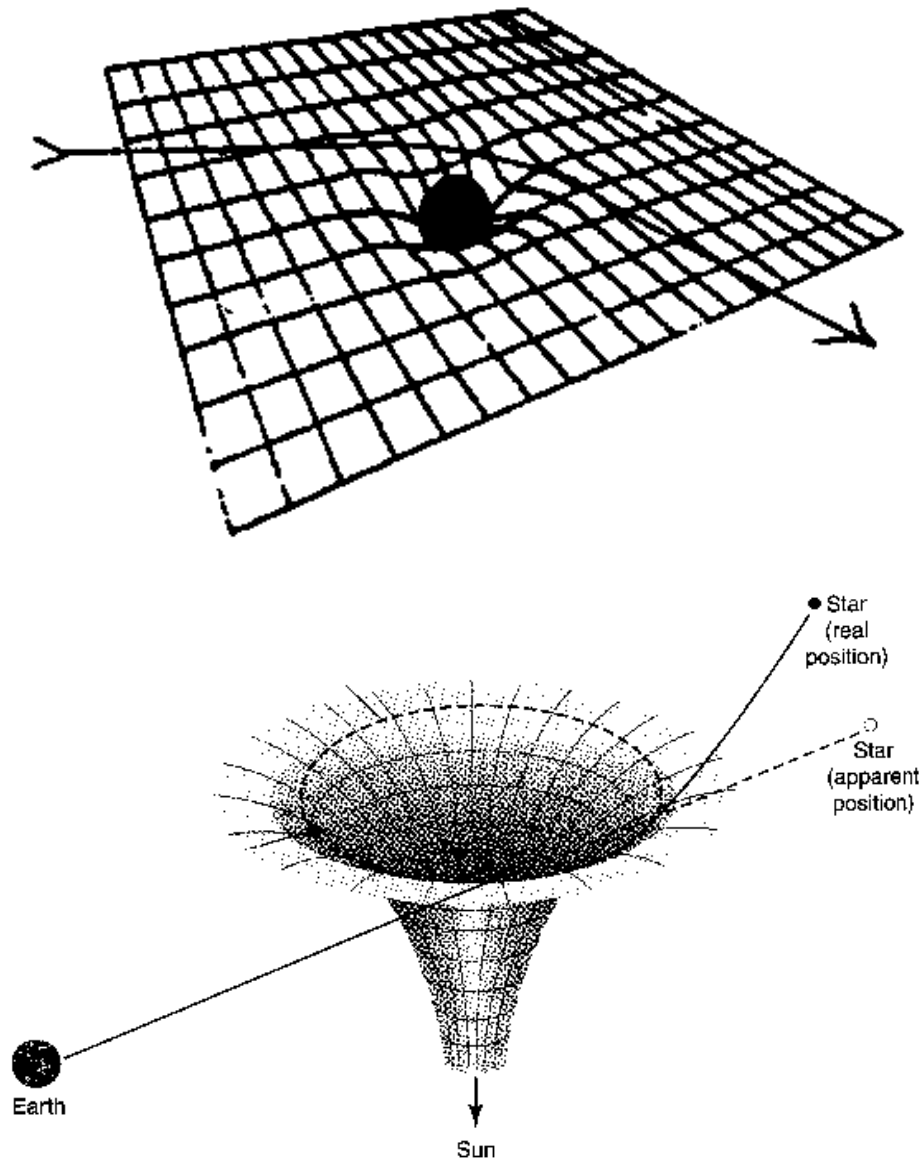
Precessão do periélio de Mercúrio: 43 segundos de arco por século .

Urbain Jean Joseph Le Verrier (1859) .

Fora de si por alguns dias, palpitações do coração.

ANIMAÇÃO - PRECESSÃO DO PERIÉLIO DE MERCÚRIO

Desvio da luz pelo Sol: 1,75 segundos de arco, o dobro do resultado de 1911.



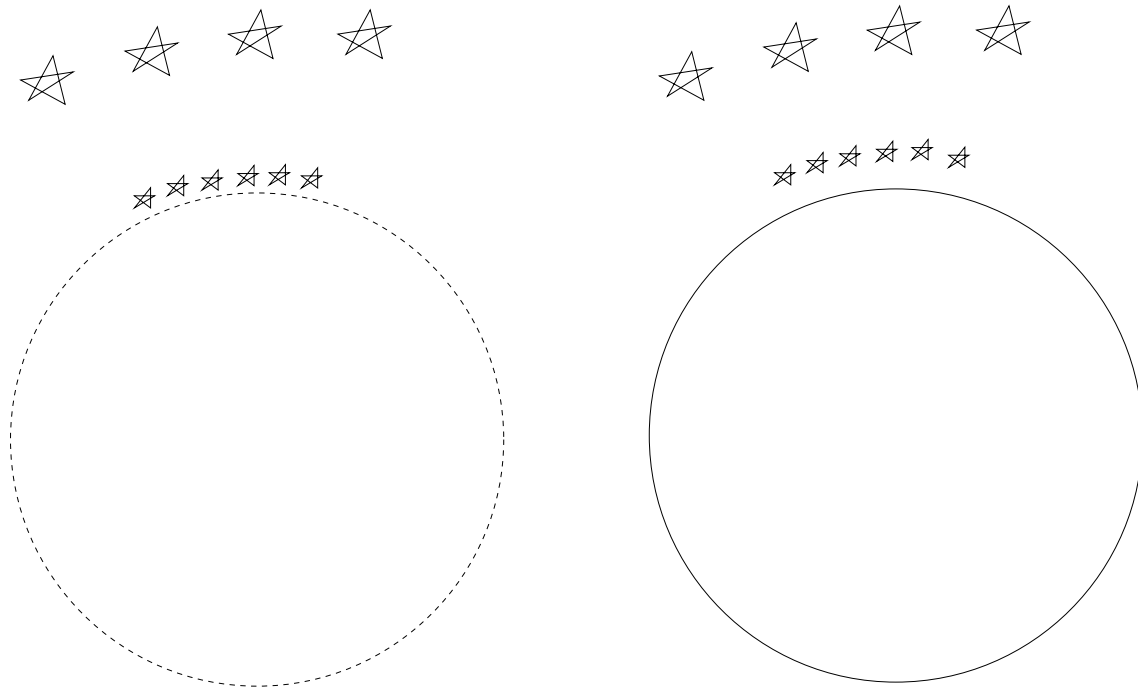
25 de Novembro: As equações de campo definitivas da gravitação.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$$

David Hilbert: mesmas equações de Einstein 5 dias antes (Sociedade Científica de Göttingen).

6. EINSTEIN CELEBRIDADE MUNDIAL

Eclipse total do Sol em 29 de maio de 1919



Duas expedições: uma para Sobral, no Ceará, e outra para a Ilha Príncipe, na costa da Guiné Espanhola (África).

Resultados anunciados numa sessão conjunta da **Royal Society** e da **Royal Astronomical Society** em 6 de novembro de 1919.

Astronomer Royal, Sir Frank Watson Dyson: “Depois de um estudo cuidadoso das placas fotográficas, eu estou preparado para dizer que elas confirmam a previsão de Einstein. Um resultado bem definido foi obtido, de que a luz é defletida de acordo com a lei da gravitação de Einstein.”.

Joseph John Thomson, Presidente da Royal Society: “Este é o resultado mais importante relacionado à teoria da gravitação desde os dias de Newton ... O resultado é uma das maiores realizações do pensamento humano.”

REVOLUTION IN SCIENCE.

NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN.

Yesterday afternoon in the rooms of the Royal Society, at a joint session of the Royal and Astronomical Societies, the results obtained by British observers of the total solar eclipse of May 29 were discussed.

The greatest possible interest had been aroused in scientific circles by the hope that rival theories of a fundamental physical problem would be put to the test, and there was a very large attendance of astronomers and physicists. It was generally accepted that the observations were decisive in the verifying of the prediction of the famous physicist, Einstein, stated by the President of the Royal Society as being the most remarkable scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was difference of opinion as to whether science had to face merely a new and unexplained fact, or to reckon with a theory that would completely revolutionize the accepted fundamentals of physics.

SIR FRANK DYSON, the Astronomer Royal, described the work of the expeditions sent respectively to Sobral in North Brazil and the island of Principe, off the West Coast of Africa. At each of these places, if the weather were propitious on the day of the eclipse, it would be possible to take during totality a set of photographs of the obscured sun and of a number of bright stars which happened to be in its immediate vicinity. The desired object was to ascertain whether the light from these stars, as it passed the sun, came us directly towards us as if the sun were not there, or if there was a deflection due to its presence, and if the latter proved to be the case, what the amount of the deflection was. If deflection did occur, the stars would appear on the photographic plates at a measurable distance from their theoretical positions. He explained in detail the apparatus that had been employed, the corrections that had to be made for various disturbing factors, and the methods by which comparison between the theoretical and the observed positions had been made. He convinced the meeting that the results were definite and conclusive. Deflection did take place, and the measurements showed that the extent of the deflection was in close accord with the theoretical degree predicted by Einstein, as opposed to half that degree, the amount that would follow from the principles of Newton. It is interesting to recall that Sir Oliver Lodge, speaking at the Royal Institution last February, had also ventured on a prediction. He doubted if deflection would be observed, but was confident that if it did take place, it would follow the law of Newton and not that of Einstein.

DR. CROMMELIN and PROFESSOR EDDINGTON, two of the actual observers, followed the Astronomer Royal, and gave interesting accounts of their work, in every way confirming the general conclusions that had been enunciated.

"MOMENTOUS PRONOUNCEMENT."

So far the matter was clear, but when the discussion began, it was plain that the scientific interest centred more in the theoretical bearings of the results than in the results themselves. Even the President of the Royal Society, in stating that they had just listened to "one of the most momentous, if not the most momentous, pronouncements of human thought," had to confess that no one had yet succeeded in stating in clear language what the theory of Einstein really was. It was accepted, however, that Einstein, on the basis of his theory, had made three predictions. The first, as to the motion of the planet Mercury, had been verified. The second, as to the existence and the degree of deflection of light as it passed the sphere of influence of the sun, had now been verified. As to the third, which depended on spectroscopic observations there was still uncertainty. But he was confident that the Einstein theory must now be reckoned with, and that our conceptions of the fabric of the universe must be fundamentally altered.

At this stage Sir Oliver Lodge, whose contribution to the discussion had been eagerly expected, left the meeting.

Subsequent speakers joined in congratulating the observers, and agreed in accepting their results. More than one, however, including Professor Newall, of Cambridge, hesitated as to the full extent of the inferences that had been drawn and suggested that the phenomena might be due to an unknown solar atmosphere further in its extent than had been supposed and with unknown properties. No speaker succeeded in giving a clear non-mathematical statement of the theoretical question.

SPACE "WARPED."

Put in the most general way it may be described as follows: the Newtonian principles assume that space is invariable, that, for instance, the three angles of a triangle always equal, and must equal, two right angles. But these principles really rest on the observation that the angles of a triangle do equal two right angles, and that a circle is really circular. But there are certain physical facts that seem to throw doubt on the universality of these observations, and suggest that space may acquire a twist or warp in certain circumstances, as, for instance, under the influence of gravitation, a dislocation in itself slight and applying to the instruments of measurement as well as to the things measured. The Einstein doctrine is that the qualities of space, hitherto believed absolute, are relative to their circumstances. He drew the inference from his theory that in certain cases actual measurement of light would show the effects of the warping in a degree that could be predicted and calculated. His predictions in two of three cases have now been verified, but the question remains open as to whether the verifications prove the theory from which the predictions were deduced.

6. COSMOLOGIA E A CONSTANTE COSMOLÓGICA

Universo Estático

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$$\Lambda = \frac{4\pi G\rho}{c^2}$$

Universo Ilimitado de Volume Finito

Espaço Tridimensional de Curvatura Constante e Positiva

Análogo Tridimensional da Superfície de uma Esfera

8. AVANÇOS DA TEORIA ATÉ OS DIAS DE HOJE

1916: Karl Schwarzschild obtém a primeira solução exata das equações de Einstein, para uma massa pontual em repouso. Einstein leu o artigo na Academia Prussiana de Ciências em 16/01/1916. Schwarzschild estava no exército alemão, na frente russa, onde contraiu uma doença que o matou em 11/05/1916.

1918: Einstein deduz uma fórmula (na aproximação quadrupolar) para a taxa de perda de energia por um sistema isolado sob a forma de radiação gravitacional.

1922: O russo Alexander Friedmann encontra as primeiras soluções cosmológicas das equações de Einstein que prevêm um universo em expansão.

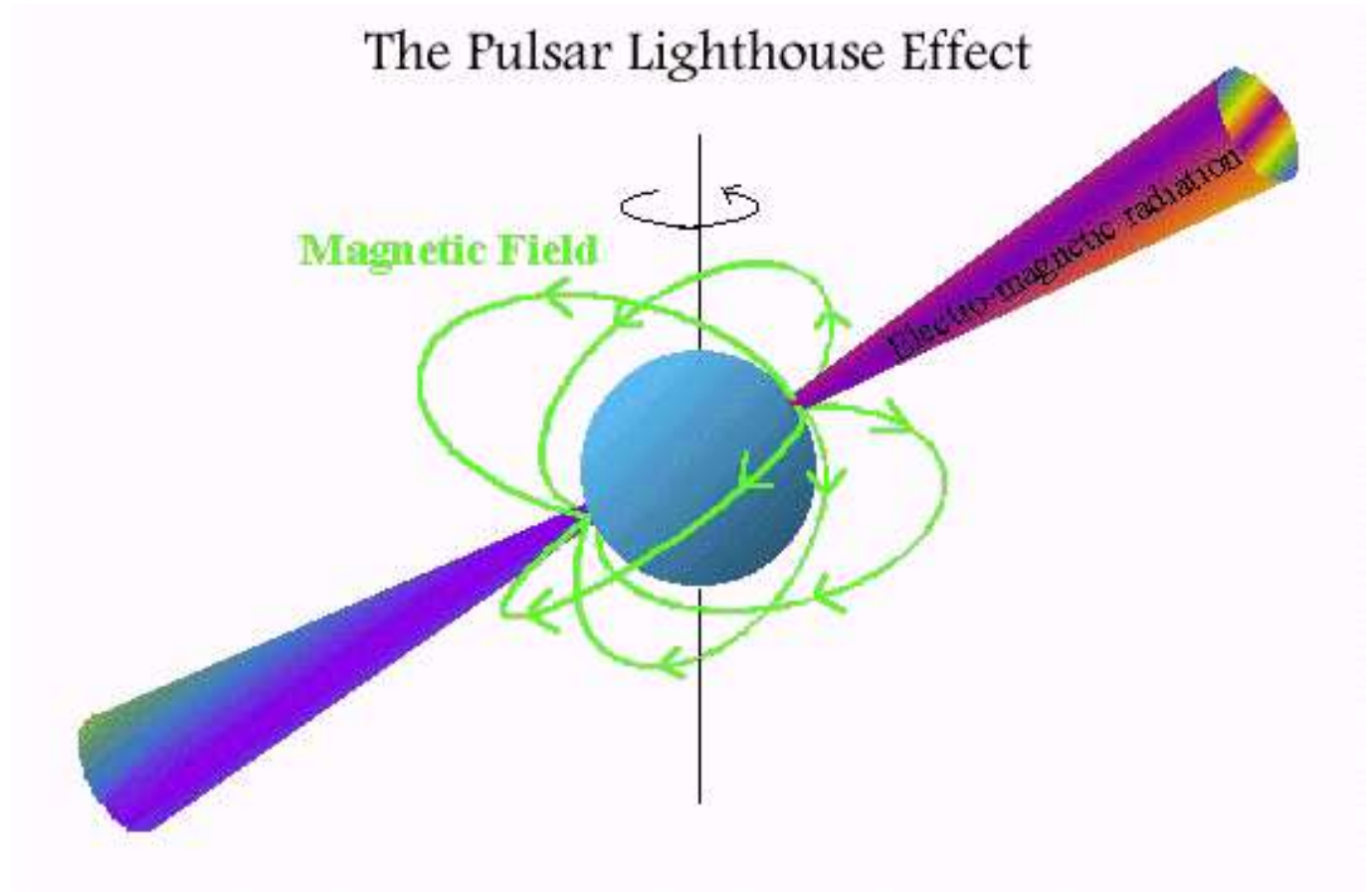
1929: O astrônomo americano Edwin Hubble estabelece que as galáxias distantes estão se afastando de nós com velocidades proporcionais à distância (Universo em expansão).

1939: Robert Oppenheimer e H. Snyder estudam o colapso gravitacional de uma estrela de massa suficientemente alta cujas fontes de energia termonuclear se esgotaram. Nasce a física dos buracos negros (nome dado por John A. Wheeler em 1967).

ANIMAÇÕES

1. Estrela engolida por buraco negro.
2. Ejeção periódica de material por buraco negro.
3. Buraco negro no centro da Via Láctea.

1974-1993: Joseph Taylor e Russel Hulse estudam o pulsar binário PSR 1913+16 e observam uma diminuição sistemática do período orbital. Medições cuidadosas mostraram que o decréscimo do período orbital deve-se à perda de energia por emissão de radiação gravitacional, confirmando a previsão de Einstein de 1918. O avanço observado do periastro para o PSR 1913+16 é de 4,2 graus por ano; em um único dia o avanço é quase igual ao do periélio de Mercúrio em um século. O trabalho de Hulse e Taylor é a mais forte evidência indireta da existência de ondas gravitacionais, e lhes valeu o Prêmio Nobel em 1993.



1998: A partir dos estudos de estrelas supernovas, surgem fortes evidências de que o Universo encontra-se num estágio de expansão acelerada. A constante cosmológica ressurge como forte candidata a explicar por que a expansão do Universo é cada vez mais rápida.