

porquê que a velocidade de rotação do pêndulo era mais lenta que a velocidade de rotação da terra, de um fator " $\text{sen}(\lambda)$ ", onde λ representa a latitude em que se localiza o pêndulo. Se necessitava outro aparato para demonstrar a rotação da terra de forma mais simples. **Foucault** apresentou assim um aparato capaz de conservar uma rotação suficientemente rápida (150 a 200 voltas por minuto) durante um tempo suficiente (uma dezena de minutos) para que se pudesse fazer medidas. Esta proeza mecânica (para a época) ilustra o talento de **Foucault** e seu colaborador **Froment**, em mecânica.



Fig.2 - Jean Bernard Léon Foucault
(1819-1868)

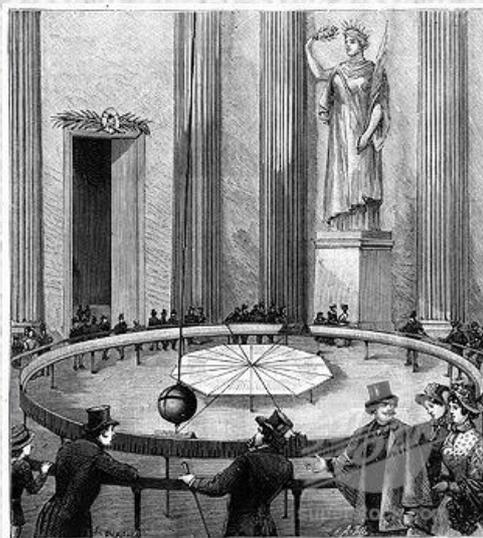


Fig.3 - Demonstração da rotação da terra
no Pantheon de Paris em 1851.

Foucault também se deu conta de que seu aparato podia servir para indicar o **Norte**. Em se impedindo certos movimentos do suporte do giroscópio, este se alinha com o **meridiano**. Isto permitiu a invenção do **girocompasso** ou **bússola giroscópica** (Fig.4).



Fig.4 - Girocompasso ou Bússola Giroscópica

Os giroscópios têm sido utilizados em **girocompassos** e **pilotos automáticos**. Os giroscópios também têm sido utilizados para balancear de **navios**, para estabilizar plataformas de tiro e para estabilizar plataformas inerciais, sobre as quais estão fixados captadores de aceleração para a navegação inercial em aviões e mísseis, construídos antes do aparecimento do **GPS**. O **efeito giroscópico** é à base do funcionamento dos piões (Fig.5) e do Power Ball (Fig.6), o qual é um dispositivo giroscópico desenhado para exercitar, especialmente, as mãos em **fisioterapia**, ou para fortalecer, em geral, os diversos músculos da extremidade superior.

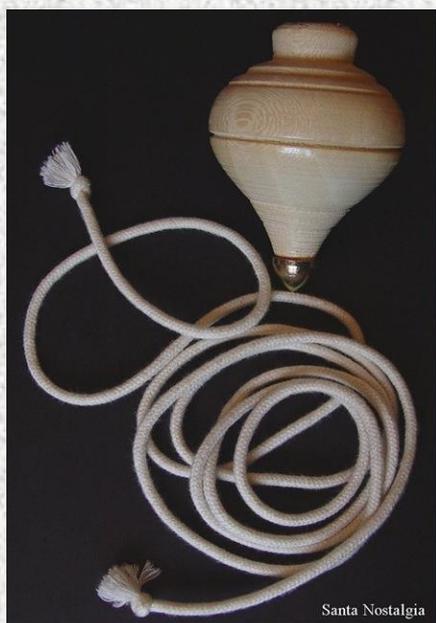


Fig.5 – Pião

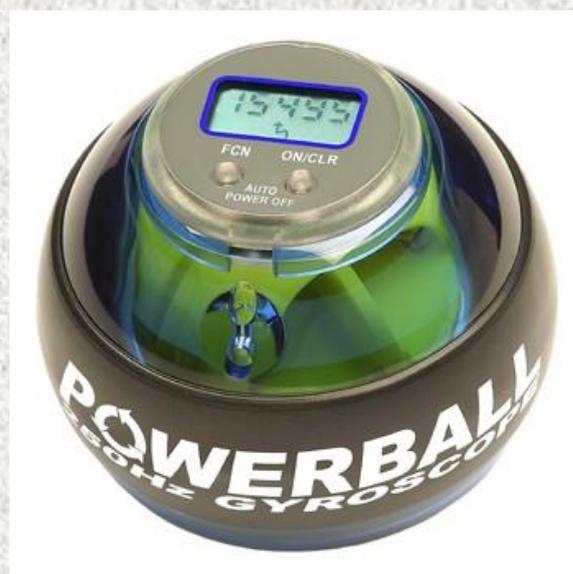


Fig.6 - Power Ball

Dessa maneira, o **giroscópio** serve como referência de direção, mas não de posição. Ou seja, é possível movimentar um giroscópio normalmente no espaço sem qualquer trabalho além do necessário para transportar sua massa. A resistência surge contrária as forças que atuem de maneira à rotacionar seu eixo de rotação a qualquer configuração não paralela à sua posição original. Assim, um veículo munido de um giroscópio e sensores apropriados podem medir com precisão qualquer mudança em sua orientação, exceto rotações que ocorram no plano de giro dos discos do giroscópio. Por essa razão, normalmente são utilizados dois giroscópios perpendiculares de modo a integralizar a possibilidade de detecção de variações na orientação.

O efeito giroscópico

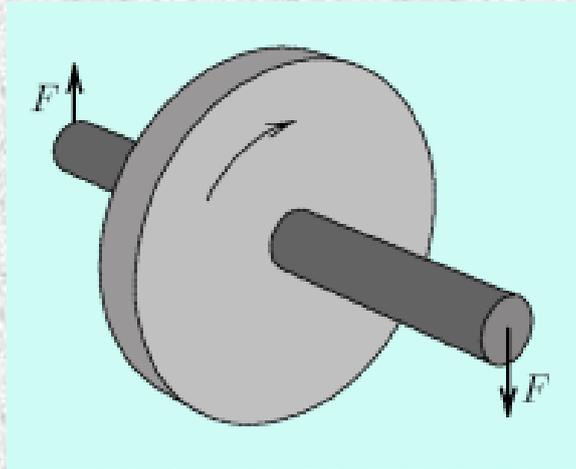


Fig.7 - Quando se empurra o lado direito para baixo, este, em lugar de baixar, se move em direção ao observador.

Suponhamos um **giroscópio** formado por um disco montado sobre um eixo horizontal, ao redor do qual o disco gira livremente a grande velocidade, como se observa na figura 8. Um observador mantém o eixo da esquerda com a mão esquerda e o eixo da direita com a mão direita. Se o observador trata de girar o eixo em direção à direita (baixando a mão direita e subindo a mão esquerda) sentirá um comportamento muito curioso, já que o giroscópio empurra sua mão direita e tira de sua mão esquerda. O observador acaba de sentir o **efeito giroscópico** (Fig.8). É uma sensação muito surpreendente porque dá a impressão de que o giroscópio não se comporta como um objeto "normal".



Fig.8 - O efeito giroscópico

Origem física do efeito giroscópico

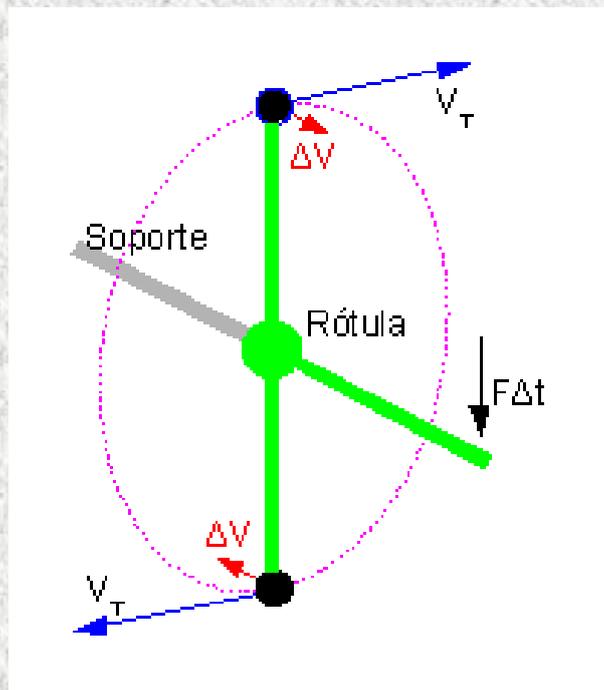


Fig. 9 - Quando se dá um pequeno golpe na extremidade da barra horizontal se comunica às massas uma velocidade horizontal perpendicular a suas velocidades tangenciais.

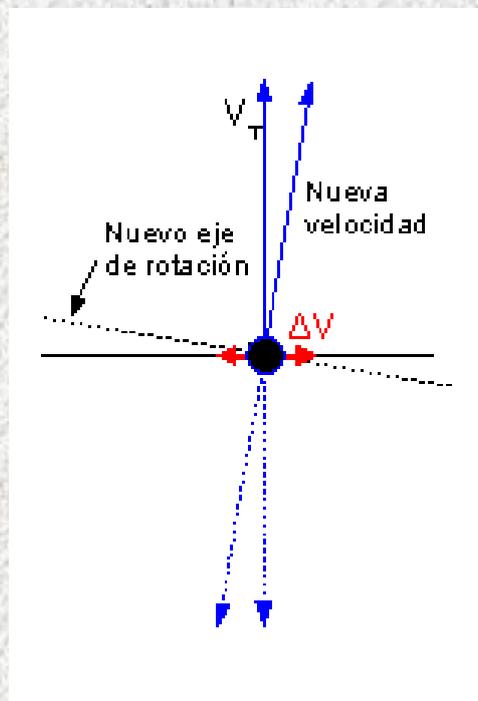


Fig. 10 - Vista de cima do desenho anterior. As velocidades da massa de cima estão desenhadas em traços contínuos e as da massa de baixo em pontilhado.

Seja o objeto desenhado na figura 9, formado por duas massas (em preto) de pequenas dimensões contidas em uma barra (em verde) em forma de T, de massa desprezível e de total rigidez. O centro do T

está fixado a um suporte por meio de uma **rótula** que permite que a barra em T gire livremente ao redor de qualquer eixo.

As massas giram rapidamente ao redor do ponto fixo com uma **velocidade tangencial** v_T . No momento quando as massas passam pela posição do desenho se dá um pequeno golpe para baixo na extremidade livre do T. Esse pequeno golpe é na realidade uma força aplicada durante um curto instante e se chama, em Física, um **impulso**. A barra verde transmite esse impulso as duas massas e dá a cada uma, uma pequena velocidade horizontal Δv perpendicular a velocidade atual. Em direção à direita a massa de cima e em direção a esquerda na massa de baixo.

Na figura 10 as velocidades comunicadas pela impulsão se somam as velocidades correntes. O resultado é que a velocidade da massa de cima se desvia ligeiramente para a direita e a velocidade da massa de baixo se desvia para a esquerda. E o resultado é que o plano de rotação das duas massas girou um pouco para a direita. Ou, dizendo de outra maneira, o eixo de rotação das duas massas gira para a direita.

Em um **giroscópio** não se trata de duas massas pontuais, mas sim de massas distribuídas sobre todo o disco ou o cilindro, porém isso na altera a base da explicação. E quando, em lugar de dar-lhe um impulso a um giroscópio, se lhe aplica um momento, se pode considerar este momento como uma sucessão de curtos impulsos. Cada uma delas agrega as massas uma ínfima velocidade perpendicular a suas velocidades. Isso faz com que a velocidade mude de direção sem mudar de módulo.

Bicicleta

Pensou-se por muito tempo que o **efeito giroscópico** estava relacionado com o equilíbrio das **bicicletas** e **motocicletas**, ainda que tenha sido muitas vezes refutado. A forma mais sensível de comprovar que o **efeito giroscópico** não traz estabilidade a uma bicicleta é compensá-la com giroscópios nas rodas. A experiência foi realizada e comprovou que a bicicleta é perfeitamente estável sem o **efeito giroscópico**. Entretanto é impossível conduzir uma bicicleta com o guidão bloqueado, o que demonstra que são as forças centrífugas (no sistema de referência da bicicleta) que aparecem ao mover o guidão, as que lhe confere estabilidade. Uma **bicicleta** ou uma **motocicleta** colocada em movimento sem condutor seguem avançando sem cair até que encontrem um obstáculo ou que percam seu impulso. A trajetória será uma espiral, um círculo ou, raramente, uma reta.

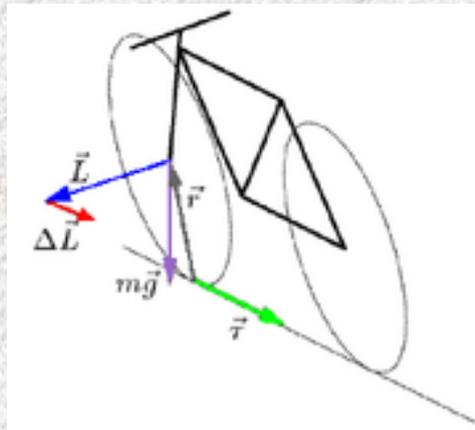


Fig. 11 Bicicleta em movimento

Quando a bicicleta se inclina para a esquerda, o torque criado pelo peso sobre a roda dianteira desloca o momento angular desta para trás e a faz girar para a esquerda. Esta situação continua até que o torque, criado pela força centrífuga, devido ao giro, compense o torque criado pelo peso.

Na figura 11 é representada uma bicicleta em movimento com o guidão direito inclinado um pouco para a esquerda. O peso da bicicleta cria um **momento** $\vec{\tau}$ que tende a inclinar ainda mais a bicicleta e fazê-la cair. Porém como a bicicleta avança, a roda dianteira tem um **momento angular** \vec{L} dirigido para a esquerda. A roda traseira também tem um momento angular, porém a maneira na qual está sujeita não lhe permite ter efeito no equilíbrio da bicicleta. Este momento cria uma variação $\Delta\vec{L}$, dirigida para trás, do momento angular da roda dianteira. Isto quer dizer que a roda dianteira gira para a esquerda, como se tivesse girado o guidão para a esquerda. A bicicleta começa a girar para a esquerda. Enquanto o momento tende a inclinar mais a bicicleta, o momento angular da roda dianteira se inclinará para trás, o guidão para a esquerda e o raio da trajetória da bicicleta diminuirá (Fig.12).



Fig. 12 Coloca-se a roda de bicicleta para girar e pede-se para o visitante alterar a direção do eixo da roda. Quando o visitante assim faz, ele próprio começa a girar em cima da plataforma giratória. Permite discutir a conservação do momento angular, o efeito giroscópico.

Visto desde o sistema acelerado e **não inercial** da bicicleta, o raio de rotação diminui enquanto aumenta a **força centrífuga**. Esta força centrífuga cria um momento que tende a direcionar a bicicleta e a compensar o momento do peso que tende a fazer a bicicleta cair. Quando os dois momentos terminam por compensar-se, a bicicleta deixa de se inclinar e o guidão de girar para a esquerda. A bicicleta continua em sua trajetória circular com raio constante. Se a fricção do ar ou outras coisas diminuïrem a velocidade da bicicleta, a força centrífuga diminuirá, a bicicleta recomeçará a cair, o que ocasionará o giro do guidão para a esquerda. O raio de giro diminuirá, aumentando a força centrífuga até que esta compense novamente o momento do peso. Quando o guidão chegar a 90° ou bloqueia, a bicicleta cai.

Se lançarmos a bicicleta com o guidão imobilizado (amarrado), a bicicleta cairá como se estivesse parada.

Movimentos do giroscópio

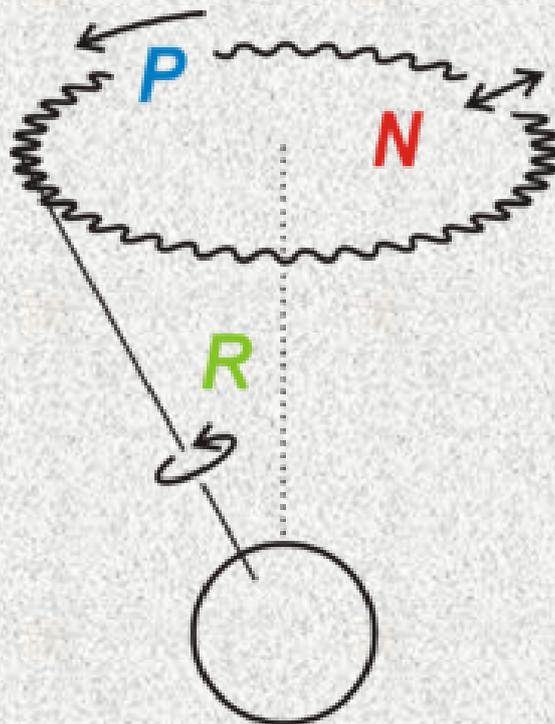


Fig.13 - Precessão (azul), nutação (vermelho) e rotação (verde).

De acordo com a **mecânica de sólido rígido**, além da rotação ao redor de seu eixo de simetria, um giroscópio apresenta, em geral, dois movimentos principais: a **precessão** e a **nutação**. Este feito se deduz diretamente das **equações de Euler** (Fig.13).

Precessão

Quando se aplica um momento $\vec{\tau}$ a um corpo em rotação cujo **momento angular** é \vec{L} , a direção do eixo de rotação do corpo se anima de um movimento de rotação de **velocidade angular** $\vec{\Omega}$. Esta velocidade angular, chamada **velocidade de precessão** é dada pela fórmula:

$$\vec{\tau} = \vec{\Omega} \times \vec{L}$$

O sinal \times indica o produto vetorial. A **velocidade de precessão**, como todas as velocidades angulares se mede em radianos/segundo. Em módulo, a velocidade de precessão é igual a $\Omega = \frac{\tau}{L}$. Isto quer dizer que em um mesmo momento, a velocidade de precessão é tanto menor quanto maior for o momento angular. E como o momento angular é o produto da velocidade de rotação do giroscópio multiplicada por seu **momento de inércia**, se pode reduzir a velocidade de precessão aumentando o momento de inércia e a velocidade de rotação.

Aqui encontramos o interesse de utilizar um giroscópio para conservar uma referência de direção. Partindo do repouso, todos os corpos conservam a orientação que tem quando se lhes aplicam momentos externos. Nesse caso, quando um corpo não gira, o efeito do momento é o de criar uma **aceleração angular**, a qual cria uma **velocidade angular** crescente. Quando o momento é interrompido, o objeto segue girando com a velocidade angular que adquiriu. Em troca, quando o mesmo momento for aplicado a um objeto em rotação, este começa a girar com a velocidade de precessão calculada antes. E quando o momento for interrompido, a precessão do objeto também se interrompe. O resultado é que, em um giroscópio, os momentos parasitas têm menor efeito em longo prazo do que em um objeto sem rotação. Além disso, se pode diminuir o efeito desses momentos, aumentando o momento de inércia e a velocidade de rotação do giroscópio.

Nutação

Quando o momento que causa a precessão troca de valor, a velocidade de precessão também muda de valor. Porém esta troca não sucede instantaneamente. Tem um período de transição durante o qual o giroscópio "cede" um pouquinho ao momento na mesma direção que um objeto que não gira. Depois o giroscópio recobra o que havia cedido, oscilando na direção do momento ao redor da trajetória de

precessão final. A este movimento de oscilação transitório se chama **nutação**.

Se a mudança de valor dos momentos se prolongar, a nutação pode durar muito. É o caso da **terra**. A atração da **lua** e do **sol** sobre o inchamento da terra no equador é diferente entre o lado próximo e o lado afastado em relação ao astro. Essa diferença de atração cria um momento, o qual causa a **precessão dos equinócios**. Porém nem o sol nem a lua estão no plano do equador terrestre, o momento produzido por estes astros mudam periodicamente e o movimento de nutação da terra não é amortecido.

Girocompasso ou Bússola Giroscópica



Fig.14 - Bússola Giroscópica

Um **girocompasso ou bússola giroscópica** é uma **bússola** que se orienta sempre em direção do **polo geográfico** usando um jogo de discos ou anéis que giram muito rápido (movidos eletricamente) e as forças de fricção para aproveitar a rotação da Terra (Fig.14). Os girocompassos se usam amplamente nos barcos e navios. Têm duas vantagens principais sobre as bússolas magnéticas:

- Assinalam o **norte geográfico**, quer dizer, a direção do eixo de rotação da **Terra**, e não o **norte magnético**.
- No são afetados pelo metal do casco dos navios.

Funcionamento

Um girocompasso é essencialmente um **giroscópio**, uma roda girando montada de forma que seu eixo fique livre para orientar-se em qualquer direção. Suponhamos que a roda gire com seu eixo orientado em alguma direção diferente a da **estrela polar**. Devido a lei de conservação do **momento angular**, uma roda nesta situação manterá sua orientação original. Dado que a Terra gira, para um observador estacionário sobre a Terra parecerá que o eixo do giroscópio gira uma vez a cada 24 horas. Um giroscópio girando desta forma não pode ser usado em navegação. O ingrediente adicional crucial necessário para um girocompasso é algum mecanismo que aplique um **par de giros** quando o eixo do giroscópio não indica o norte.

Um método usa **fricção** para aplicar o par necessário: o giroscópio do girocompasso não é por tanto totalmente livre para reorientar-se por si mesmo. Se por exemplo um dispositivo conectado ao eixo é submergido em um fluido viscoso, então o dito fluido resistirá a reorientação do eixo. Esta força de fricção provocada pelo fluido resulta em um par de giros atuando sobre o eixo, provocando que este gire em uma direção ortogonal ao par até o norte geográfico (a estrela polar). Uma vez que o eixo aponte em direção ao norte, parecerá estacionário e não experimentará nenhuma força de fricção mais. Isto se deve a que o norte geográfico é a única direção para a que o giroscópio pode permanecer sobre a superfície da Terra sem ser forçado a mudar. Considera-se que este é um ponto de energia potencial mínima.

Outro método mais prático é usar pesos para forçar o eixo do giroscópio a permanecer horizontal em relação a superfície da Terra, porém permitindo girar livremente dentro desse plano. Neste caso, a **gravidade** aplicará um par de giros obrigando ao eixo do giroscópio a se orientar em direção ao norte. Devido a que os pesos confinaram ao eixo a estar horizontal em respeito a superfície da Terra, este nunca pode alinhar-se com o eixo do planeta (exceto no Equador) e deve realinear-se a medida que a terra gira. Porém com respeito a superfície terrestre, o giroscópio parecerá estar estacionário e assinalando junto a superfície terrestre até o **polo norte geográfico** (Fig.15).

Devido que o funcionamento de um **girocompasso** depende crucialmente de sua rotação sobre a Terra, não funcionará corretamente se o barco em que estiver montado se movimentar rapidamente, especialmente na direção leste a oeste.

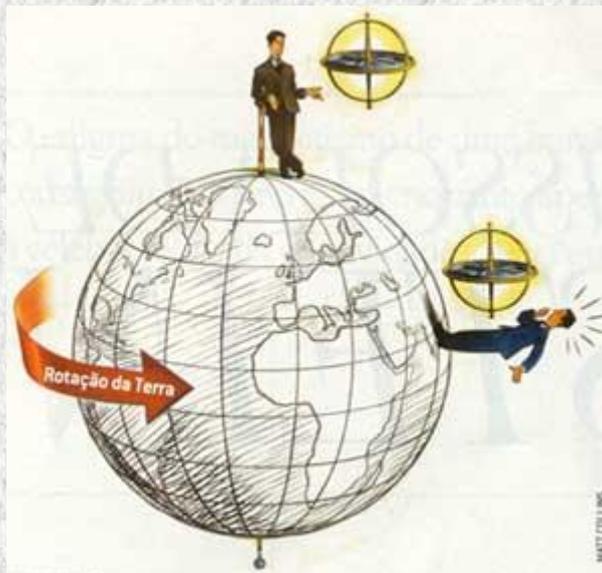


Fig.15 - Um giroscópio capaz de indicar direções, perfeitamente suspenso de modo a poder rodar em qualquer sentido, continuará a apontar para a mesma direção no céu apesar da rotação e translação da Terra. Em qualquer latitude fora do Pólo Norte, porém, como a Terra gira, o giroscópio sairá do plano paralelo ao solo, tornando-se inadequado para uso na navegação.

História

O **girocompasso** foi patenteado em 1885 pelo holandês **Martinus Gerardus van den Bos**, se bem que seu desenho nunca funcionou adequadamente. Em 1889, o capitão **Arthur Constantin Krebs** (Fig.16), desenhou um giroscópio pendular elétrico para o submarino experimental francês *Gymnote*, que o permitiria forçar um bloqueio naval em 1890. Em 1903 o alemão **Herman Anschütz-Kaempfe** (Fig.17), construiu um girocompasso que funcionava e obteve uma patente sobre seu desenho. Em 1908 **Anschütz-Kaempfe** e o inventor estadunidense **Elmer Ambrose Sperry** (Fig.18), patentearam o girocompasso na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos. Quando Sperry intentou vender este dispositivo a armada alemã em 1914, Anschütz-Kaempfe o denunciou por violação de patente. Sperry argumentou que a patente de Anschütz-Kaempfe não era válida devido a que não melhorava significativamente a anterior patente de van den Bos. **Albert Einstein** (Fig.17), então examinador de patentes, testificou no caso, estando inicialmente de acordo com Sperry, porém, mudando logo de opinião e confirmando que a patente de Anschütz-Kaempfe era válida e que Sperry a havia infringido ao usar um método específico de amortecimento. Anschütz-Kaempfe ganhou o caso em 1915.

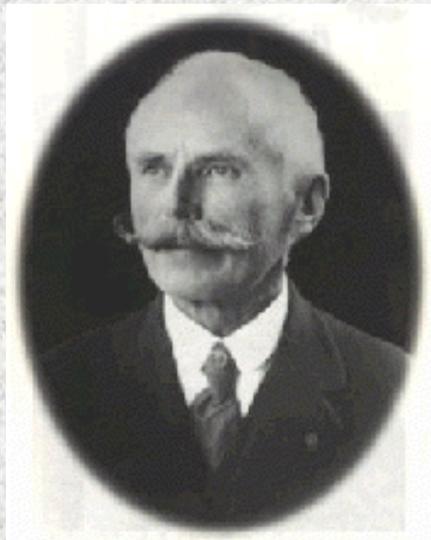


Fig.16 - Arthur Constantin Krebs (1850-1935)



Fig.17 - Herman Anschütz-Kaempfe e Albert Einstein

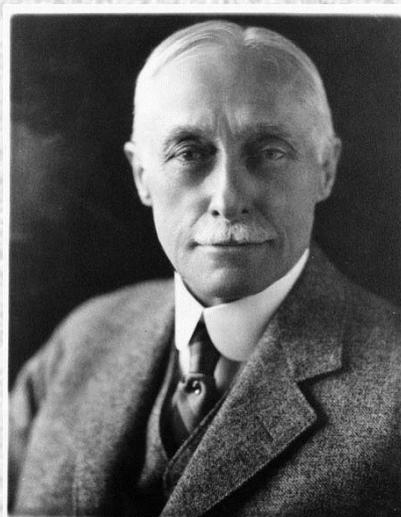


Fig.18 - Elmer Ambrose Sperry (1860-1930)