



Fontes de Ondas Gravitacionais

José Carlos Neves de Araujo
(DAS/INPE - Grupo GRÁVITON)

Conteúdo

- Ondas Gravitacionais (OGs)
- OGs vs. OEs (ondas eletromagnéticas)
- OGs realmente existem?
- Fontes de OGs
- Que astrofísica podemos fazer com as OGs?
- Um pouco sobre detectores de OGs

Ondas gravitacionais

- Descobertas por Einstein através da teoria da relatividade geral em 1916.
- Concentrações de massa (ou energia) mudando de forma ou posição podem causar distorções no espaço-tempo que se propagam no Universo com a velocidade da luz.

Perturbação no campo gravitacional,
($h_{\mu\nu}$)  Equação de onda:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$h_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{[ik(z-ct)]} \quad \text{para } T_{\mu\nu} = 0$$

Amplitude da onda: $h = \Delta L/L$

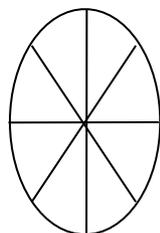
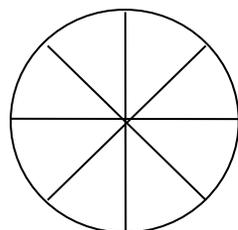
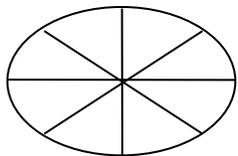
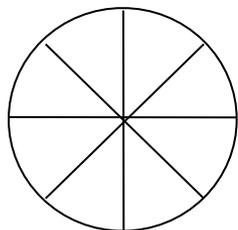
Freqüências das ondas: 10^{-18} Hz a 10^{10} Hz

$$R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

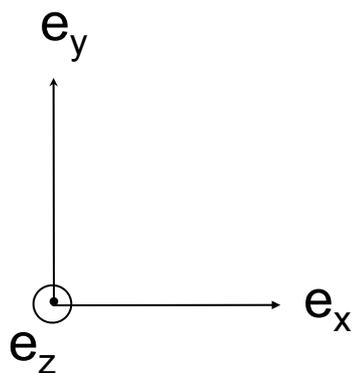
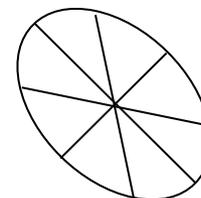
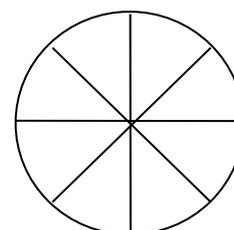
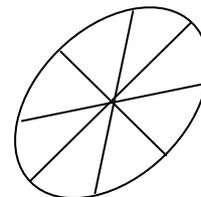
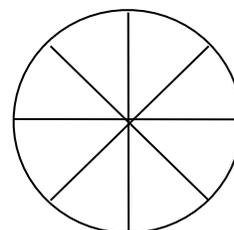
$$g_{ij} = \eta_{ij} + h_{ij}$$

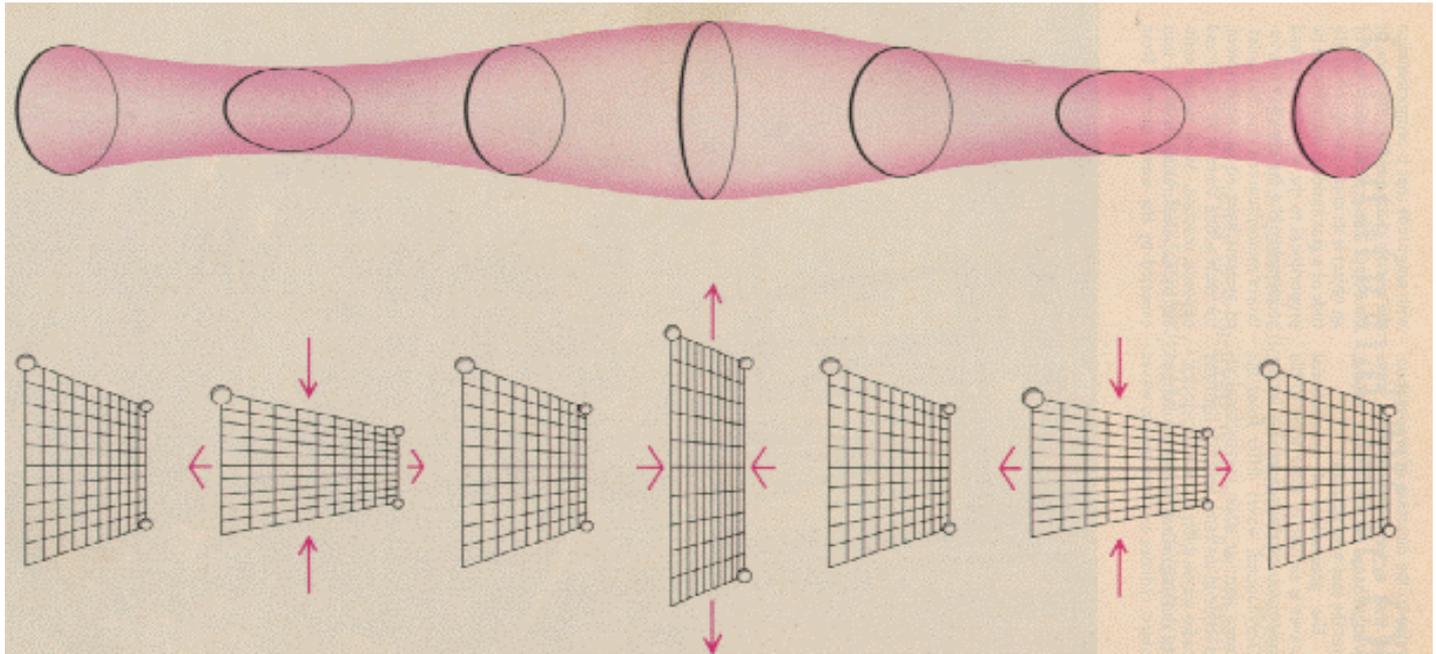
Duas polarizações “+” e “x”

h_+



h_x





$$F \approx \frac{c^3 \pi}{4G} h^2 f^2 \quad \text{Fluxo de ondas gravitacionais}$$

Onde: h - amplitude da OG e f - frequência da OG

$$\Rightarrow F \approx 3 \times 10^{35} h^2 f^2 \quad \text{W/m}^2$$

Qual deveria ser o valor de h de modo que $F \sim 10^3 \text{ W/m}^2$?

Obs.: um fluxo de $\sim 10^3 \text{ W/m}^2$ em ondas eletromagnéticas é, e.g., o que recebemos do Sol em todos os comprimentos de onda!!

Para $f \sim 1\text{kHz} \Rightarrow h \sim 10^{-19}$ (sic) !!

(uma supernova na nossa galáxia, e.g., @ 10 kpc)

$$h \sim \frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-19} \quad \text{para } L = 1 \text{ km}$$

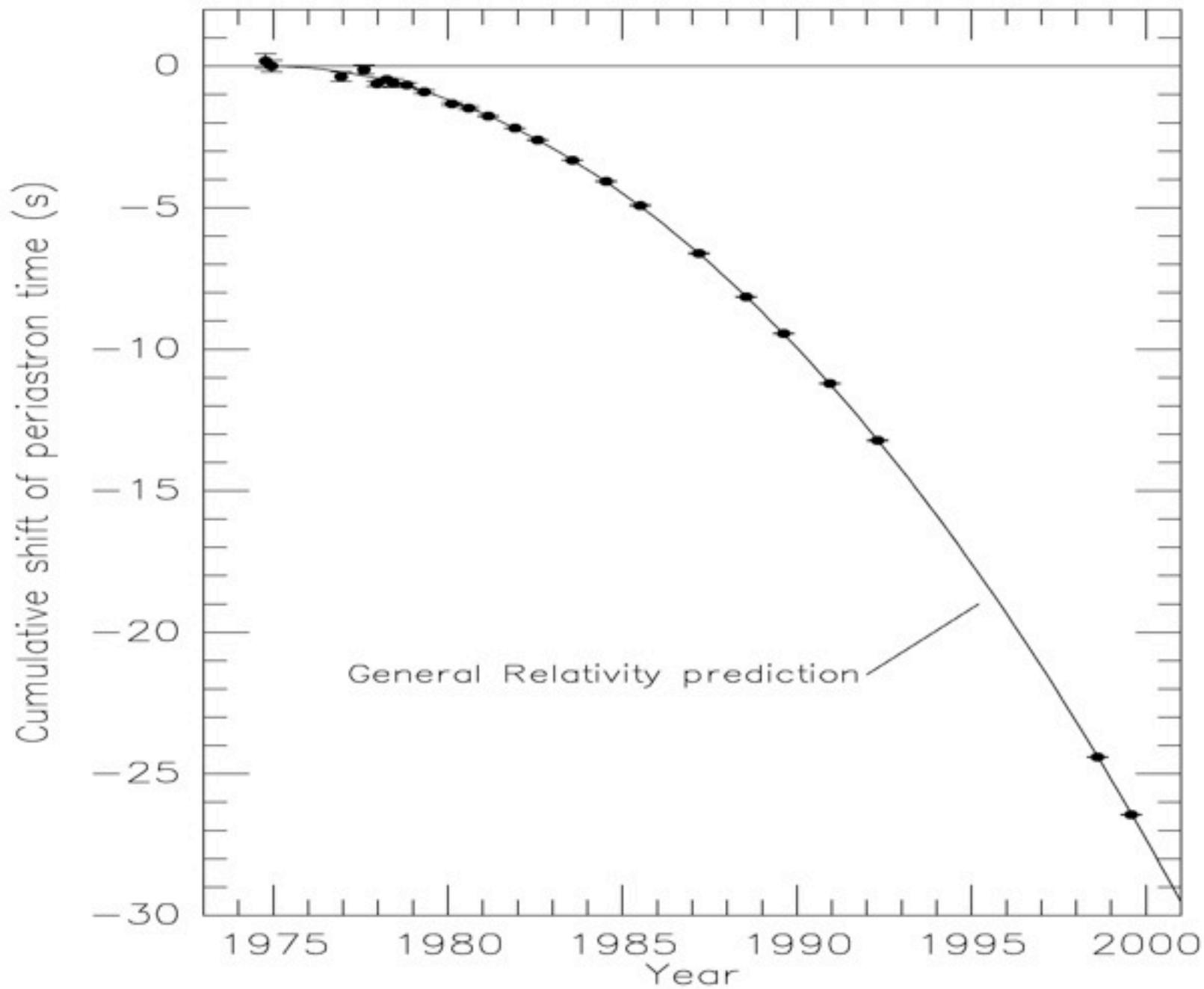
$$\rightarrow \Delta L \sim 10^{-16} \text{ m} \sim 0,1 \text{ núcleo atômico}$$

OGs versus OEs

- Radiação eletromagnética: superposição incoerente de ondas eletromagnéticas geradas por moléculas, átomos e partículas.
- Ondas eletromagnéticas sofrem absorção e espalhamento na interação com a matéria .
- Freqüências típicas das OEs : $f > 10^7$ Hz.
- Ondas gravitacionais: emissão coerente de grandes quantidades de energia em movimento.
- OGs não são absorvidas ou espalhadas.
- A velocidade da OG é sempre c .
- Freqüências típicas das OGs : $f < 10^4$ Hz ($\lambda > 30$ km) !

OGs realmente existem?

- Uma boa evidência:
PSR 1913+16 (Taylor & Hulse 1974)
(Pulsar binário com período de 7,75 horas)
- Existem pelo menos 4 outros sistemas similares, todos em bom acordo com a RG.
- \Rightarrow OGs devem existir, sendo responsáveis pela perda de momento angular destes sistemas.



Fontes de OGs

Ondas Gravitacionais em laboratório?

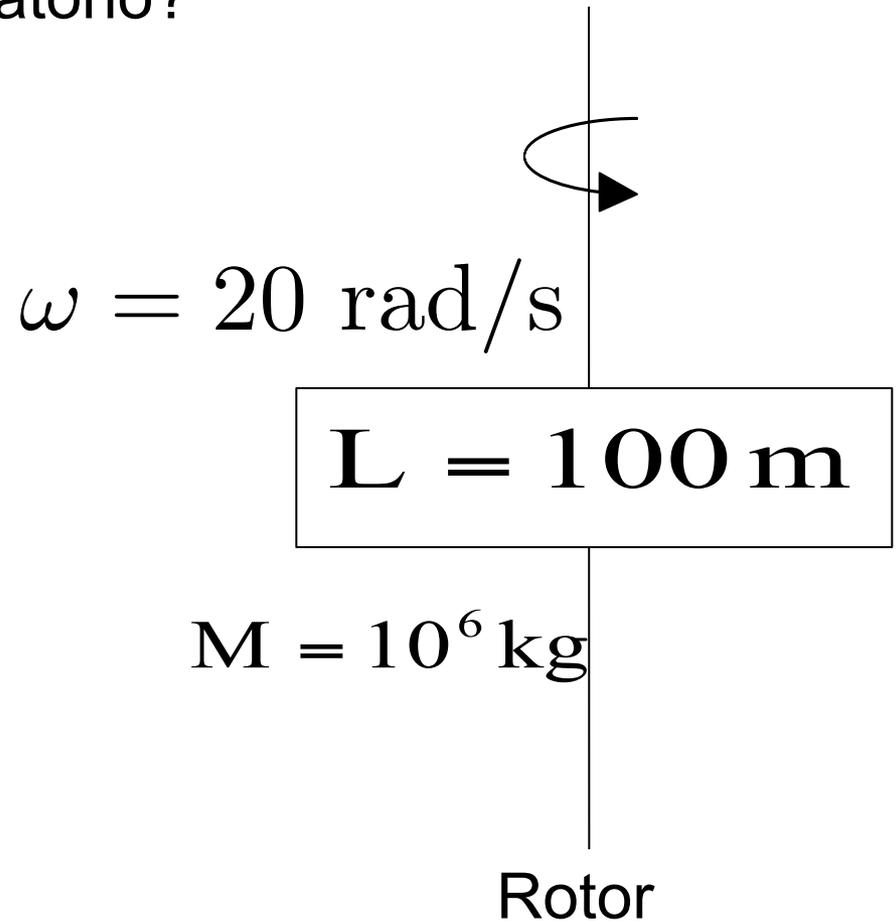
$$\text{Usando: } h \sim \frac{G}{c^4} \frac{E_{\text{cinética}}^{\text{não simétrica}}}{r}$$

Para o rotor ao lado \Rightarrow

$$h \sim 10^{-45} \frac{ML^2\omega^2}{r}$$

Para $r > \lambda_{\text{OG}} (\approx 50.000 \text{ km})$

$$\Rightarrow h < 10^{-40} \quad !!!$$



Fontes astrofísicas e cosmológicas

■ Impulsivas:

- Formação de estrelas de nêutrons e buracos negros em supernovas
- Coalescência de estrelas compactas, etc.

■ Periódicas:

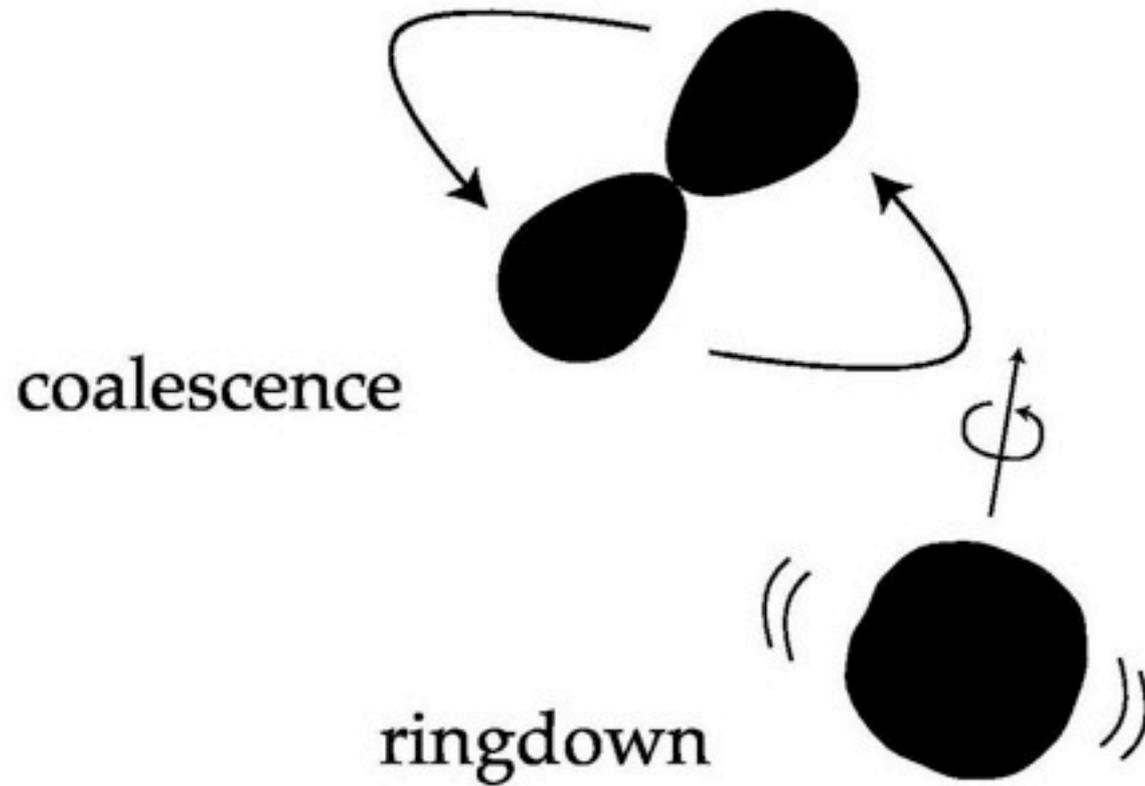
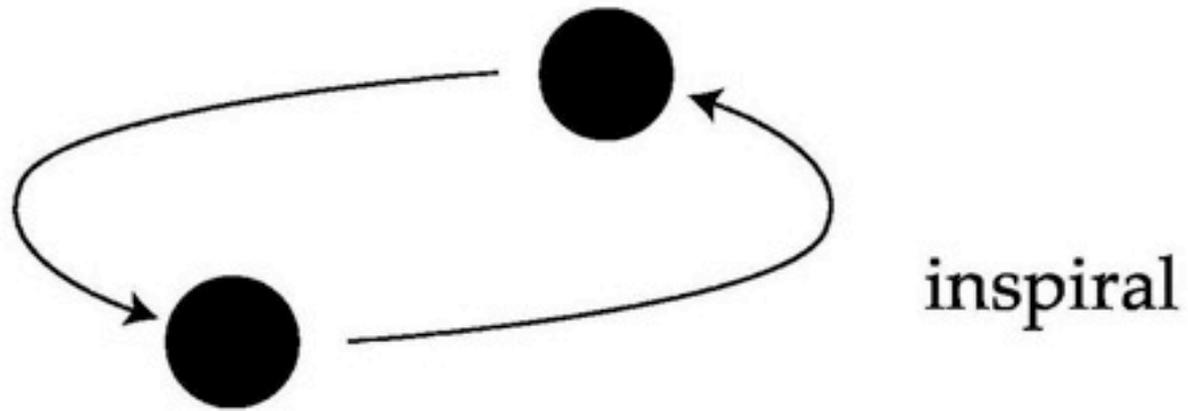
- Sistemas binários
- Estrelas de nêutron em rotação, etc.

■ “Chirp” (gorjeio)

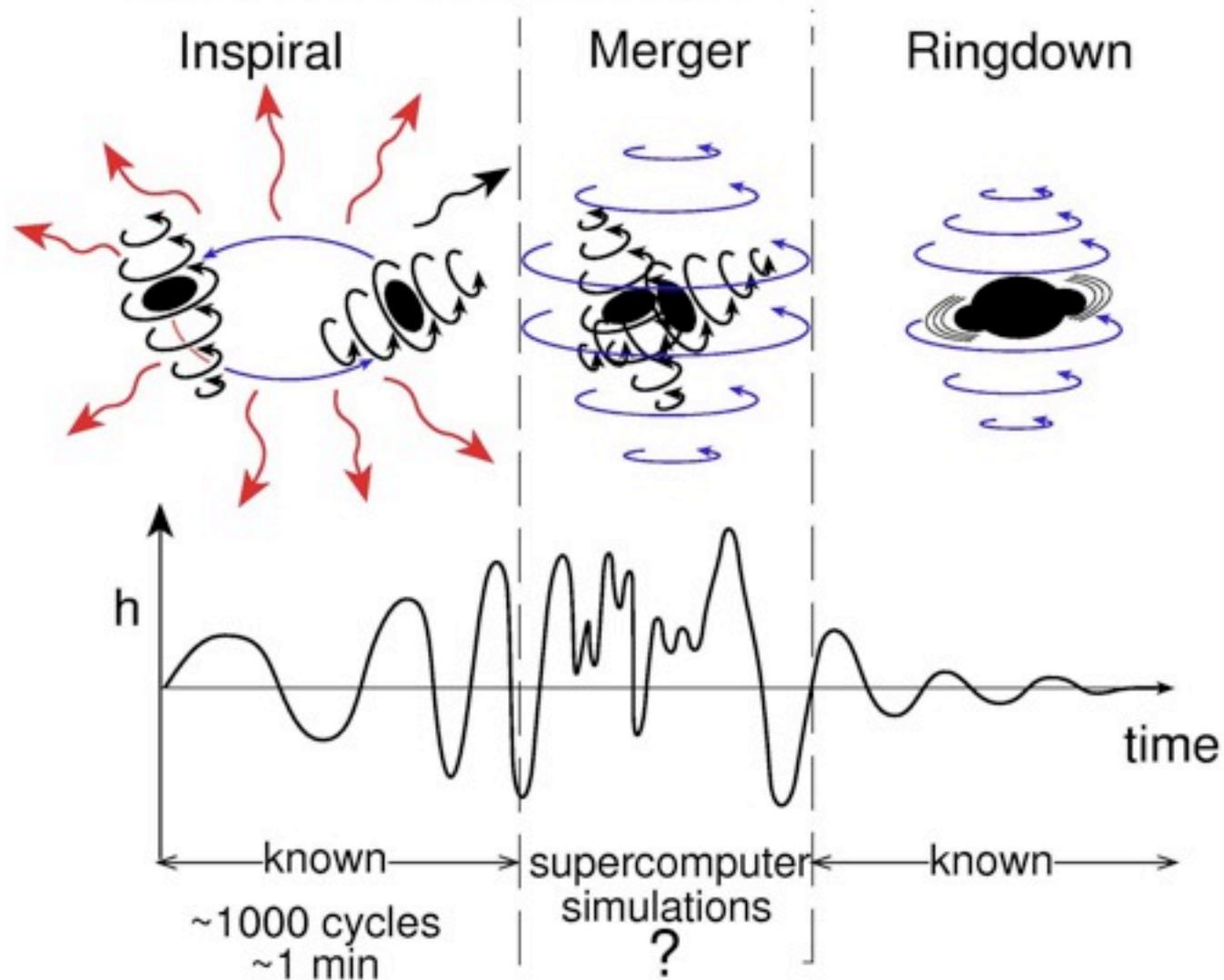
- Estágios finais da espiralação de sistemas binários compactos

■ Estocásticas

- Efeito integrado de muitas fontes periódicas na Galáxia
- População de fontes cosmológicas impulsivas: buracos negros, etc.
- Processos cosmológicos no Universo primordial



- Merger Science: nonlinear dynamics of spacetime curvature



- Sistemas de estrelas compactas estão entre as prováveis primeiras fontes de OGs a serem detectadas.
- Há a possibilidade dos detectores LIGO e VIRGO “iniciais” detectarem tais fontes. A taxa é incerta, talvez 1 por ano @ < 100 Mpc.
- Com os detectores “avançados” podemos ter até algumas fontes detectadas por semana para fontes @ 1Gpc.

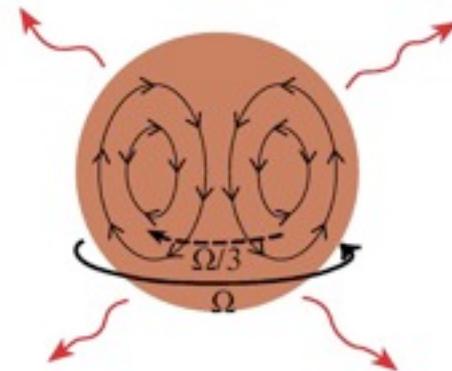
- Supernovas:

formação de estrelas de nêutrons e de buracos negros.

- O quanto se espera detectar ?

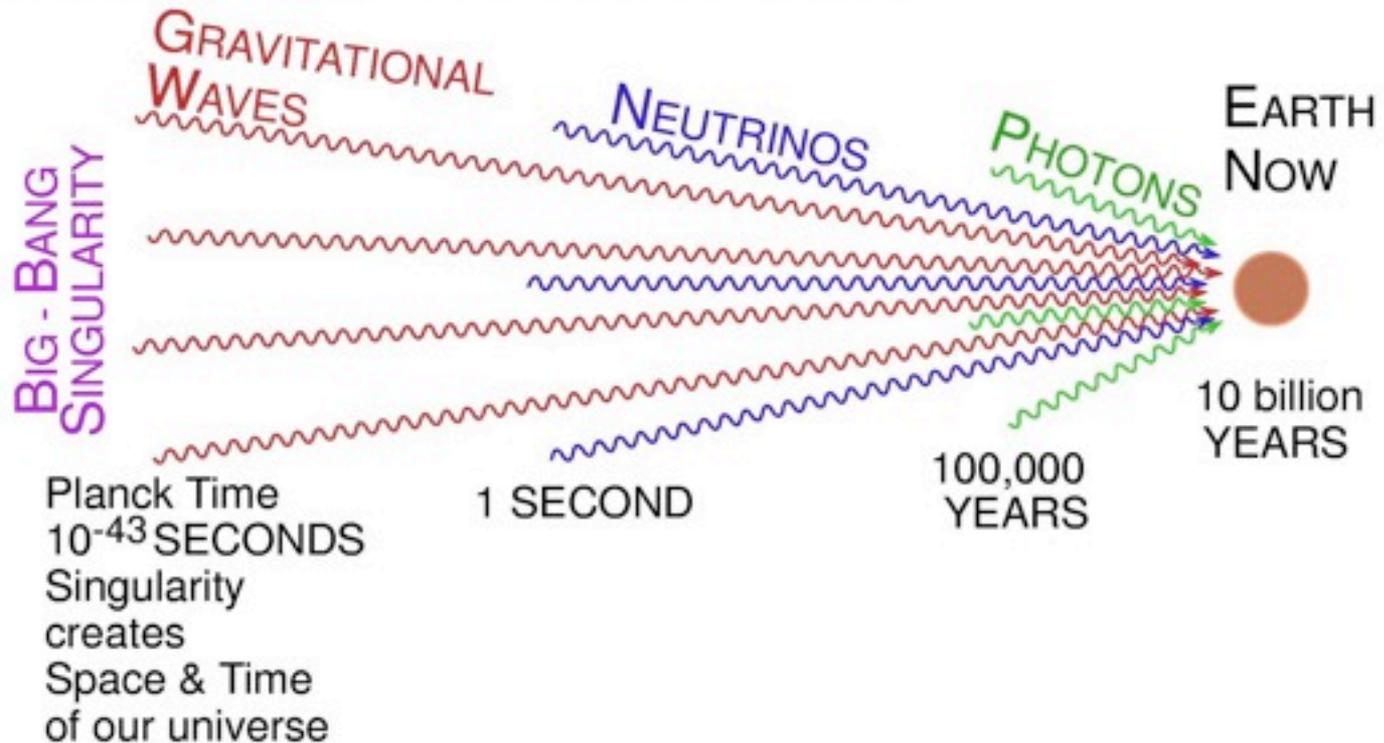
Resposta difícil, pois a eficiência de produção de OGs é muito incerta. Algumas fontes ano com detectores avançados é no entanto um número verossímil.

Se as estrelas de nêutrons recém nascidas têm spin $< 10\text{ms}$ \Rightarrow instabilidade “modo r”.





● Big-Bang Birth of Universe



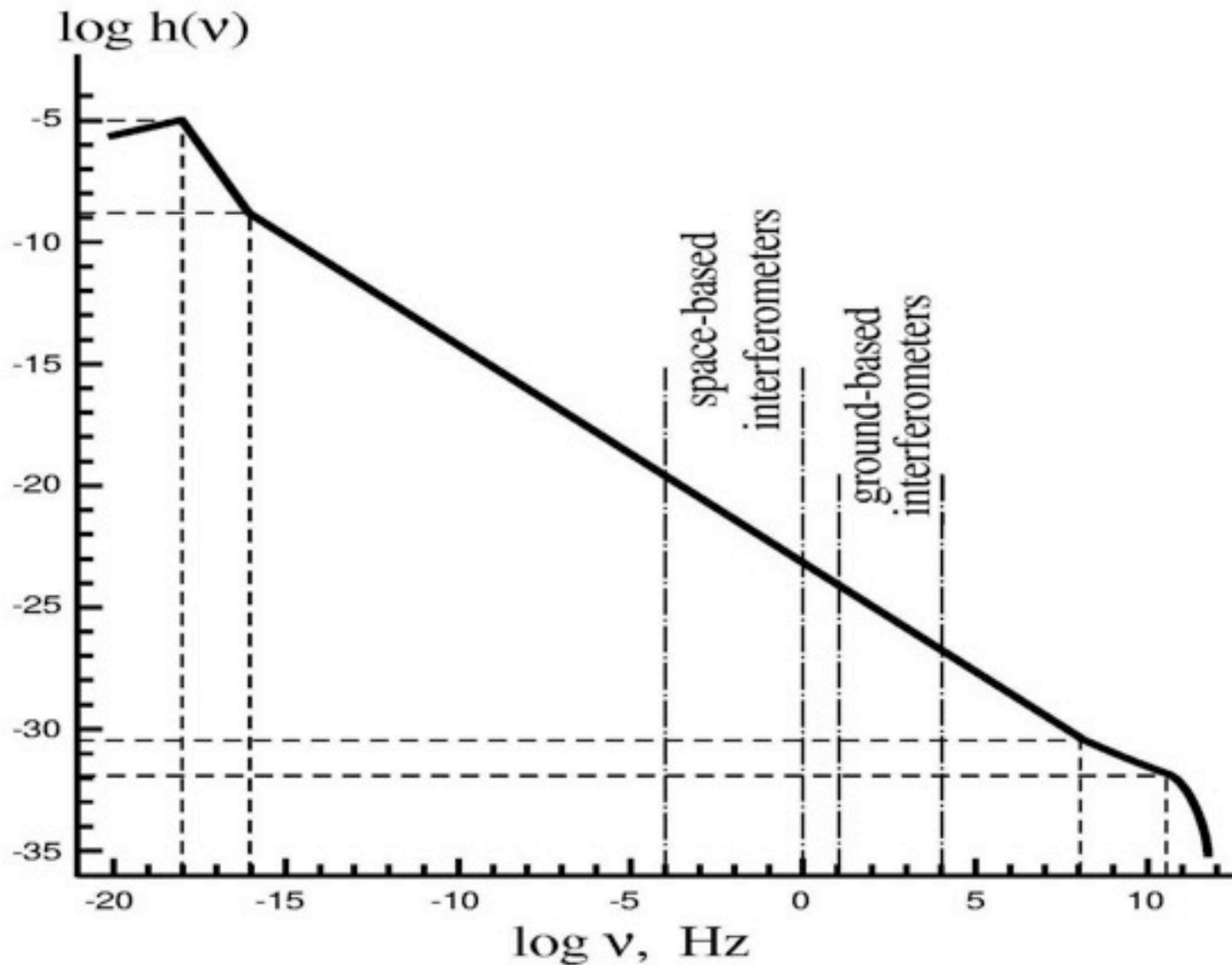
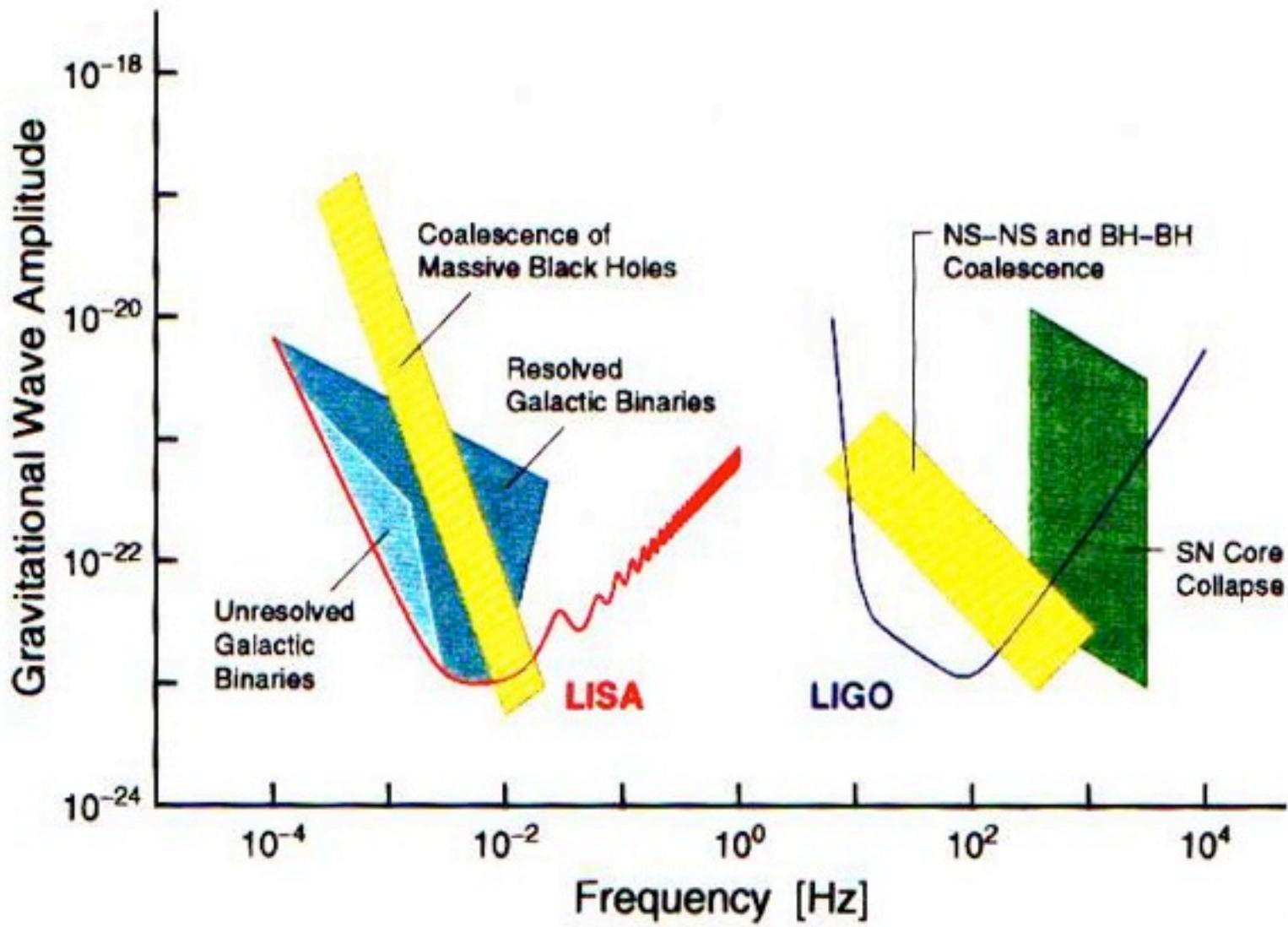


FIG. 5. Expected spectrum $h(\nu)$ for the case $\beta = -1.9$



Que astrofísica podemos fazer com as OGs?

- Sistemas binários: Massas, velocidades de rotação, localizações, etc.
- Estrelas de nêutrons: Equação de estado, velocidade de rotação, raio e massa.
- Buracos negros: Massa, raio e velocidade de rotação.
- Época de formação das primeiras estrelas.
- Determinação dos parâmetros cosmológicos
- etc.

Um pouco sobre detectores de OGs

- J. Weber (1960) pioneiro:
detector tipo barra @ temperatura ambiente
(detector de massa resonante)
- Detectores tipo barra em operação:
Nautilus (Itália)
Auriga (Itália)
Explorer (Itália/Suíça)
Allegro (EUA)
Niobe (Austrália)
- Obs.: nenhum detector de OGs é apontável
⇒ recebem OGs de todas as direções

- frequência detectável: $\approx 1\text{kHz}$ com banda de $\approx 100\text{ Hz}$
- sensibilidade: $h > 10^{-20}$

- Detectores esféricos:
 - Schenberg (Brasil)
 - MiniGrail (Holanda)
 - Sfera (Itália)

- Podem ser 10x mais sensíveis que as barras.
- Um só detector determina a direção da fonte
- frequência detectável: $\approx 3,0 - 3,4\text{ kHz}$
- sensibilidade: $h > 10^{-21}$

- Para se obter detectores de banda larga e mais sensíveis
⇒ detectores interferométricos

- **Interferômetros Terrestres:**

TAMA300 (Japão)

GEO600 (Alemanha/Inglaterra)

VIRGO (Itália/França)

LIGOs (EUA)

AIGO (Austrália)

Freqüência: 10 - 10kHz

sensibilidade: $h > 10^{-23}$

- **Interferômetro Espacial:**

LISA (ESA/NASA, ~ 2010)

Freqüência: 10^{-4} - 1 Hz

Sensibilidade: $h > 10^{-23}$

AURIGA



Schenberg

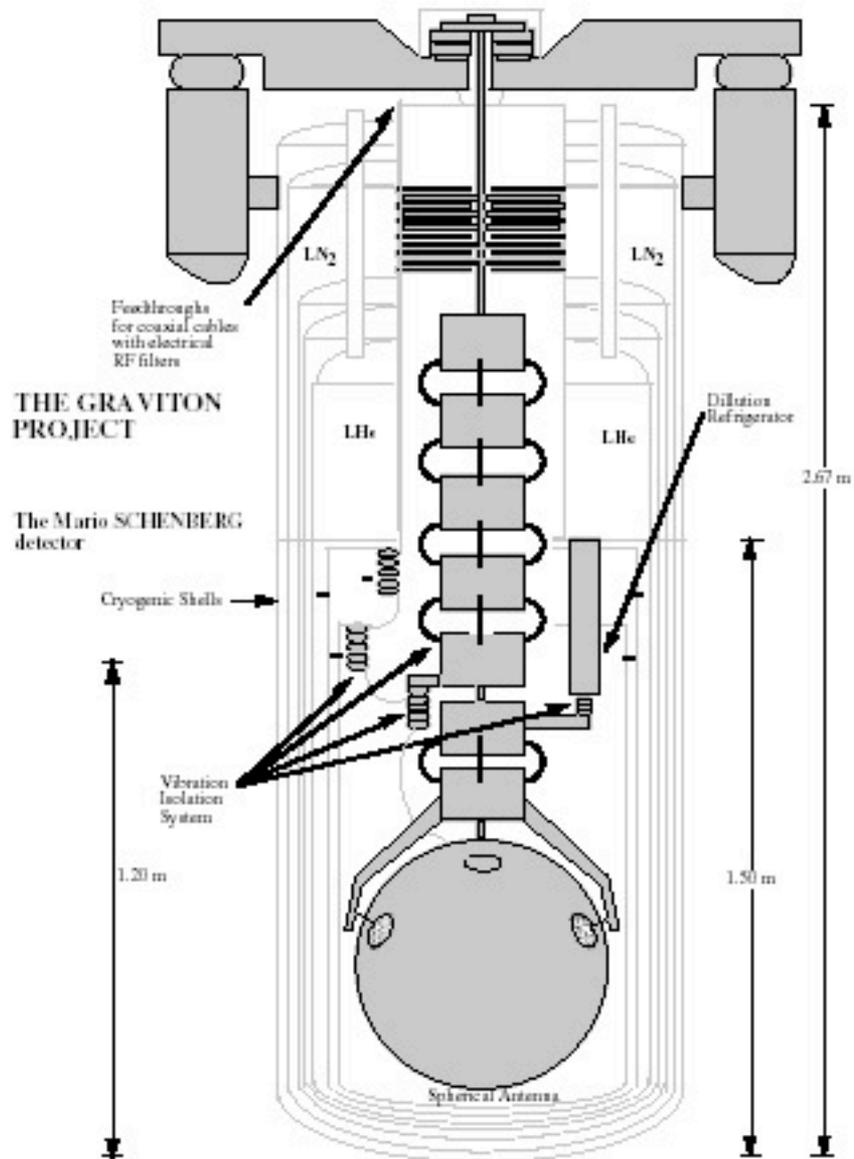
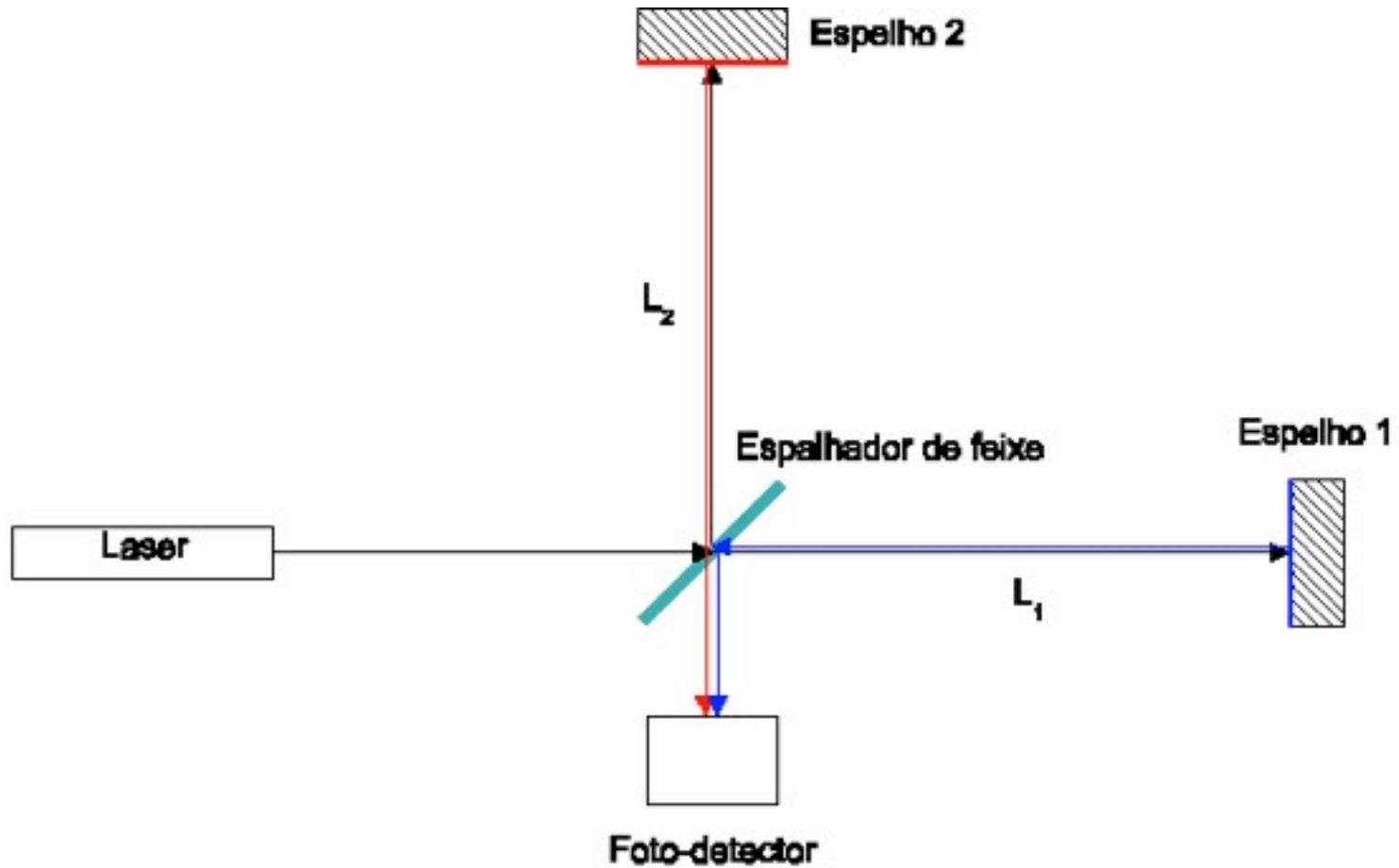


Figure 1. Schematic view of the Mario Schenberg detector.

minigrail



Interferômetro

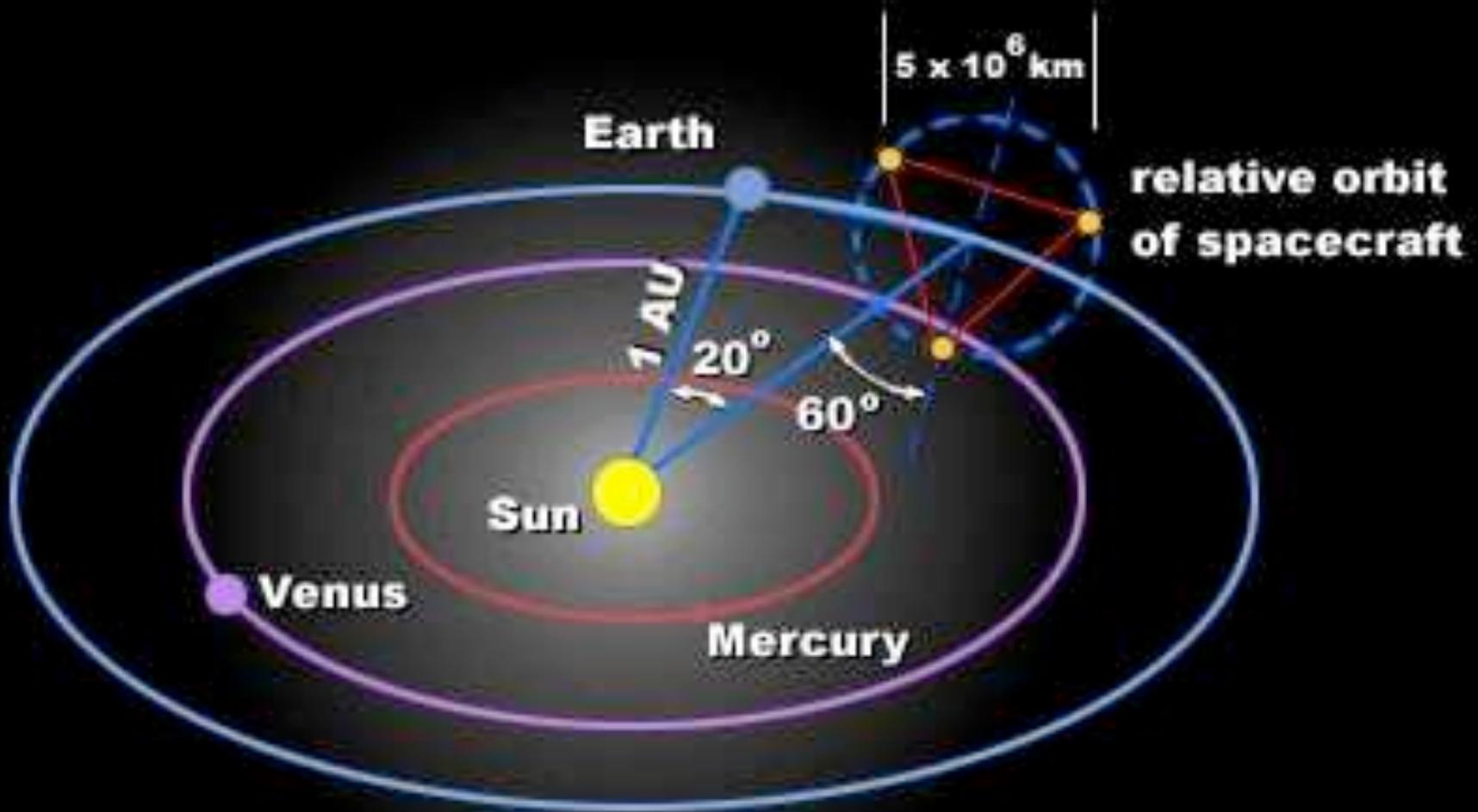


VIRGO

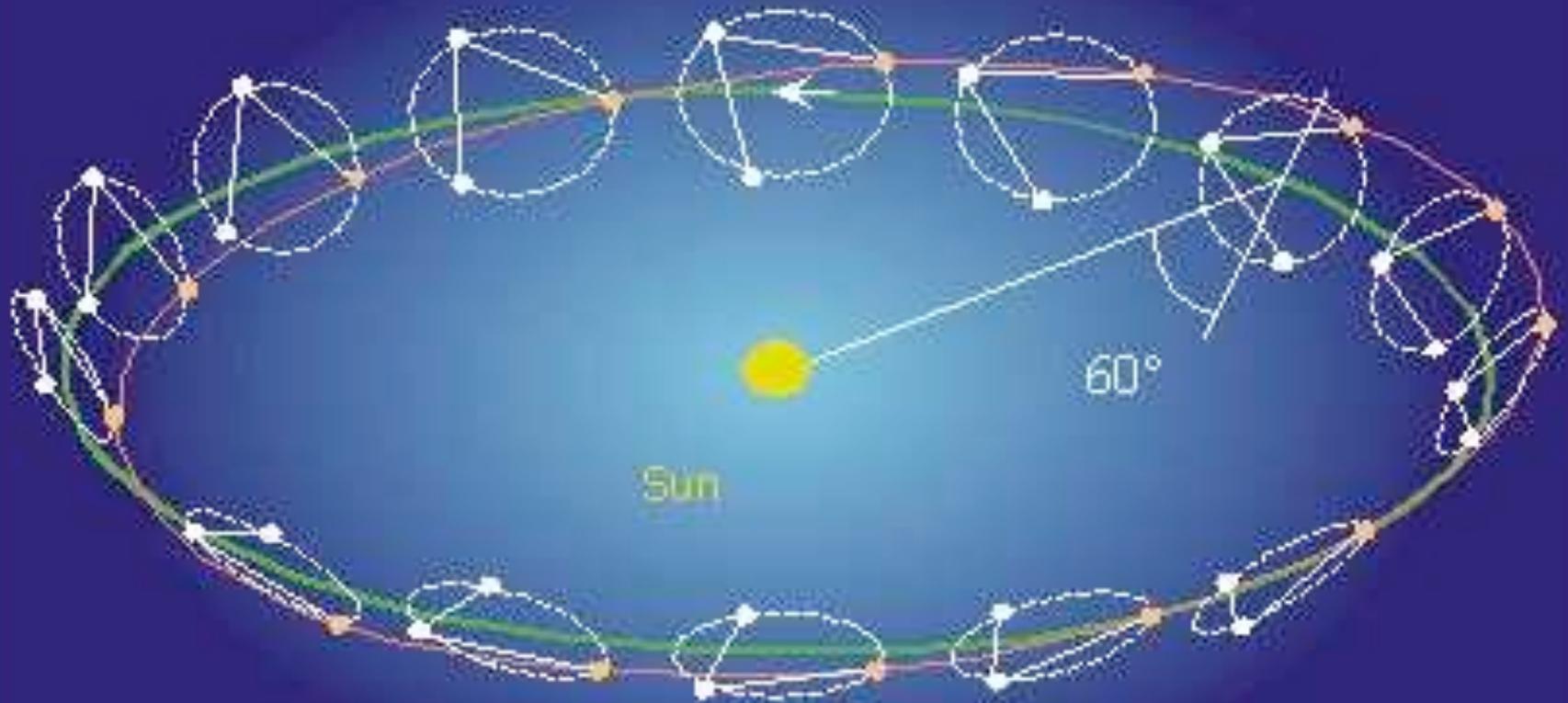
Cascina (Itália)



LISA



LISA











... podemos dizer que conhecemos
todas as fontes de OGS?

... podemos dizer que conhecemos
todas as fontes de OGs?

... podemos dizer que conhecemos
todas as fontes de OGs?

... podemos ter muitas surpresas ...