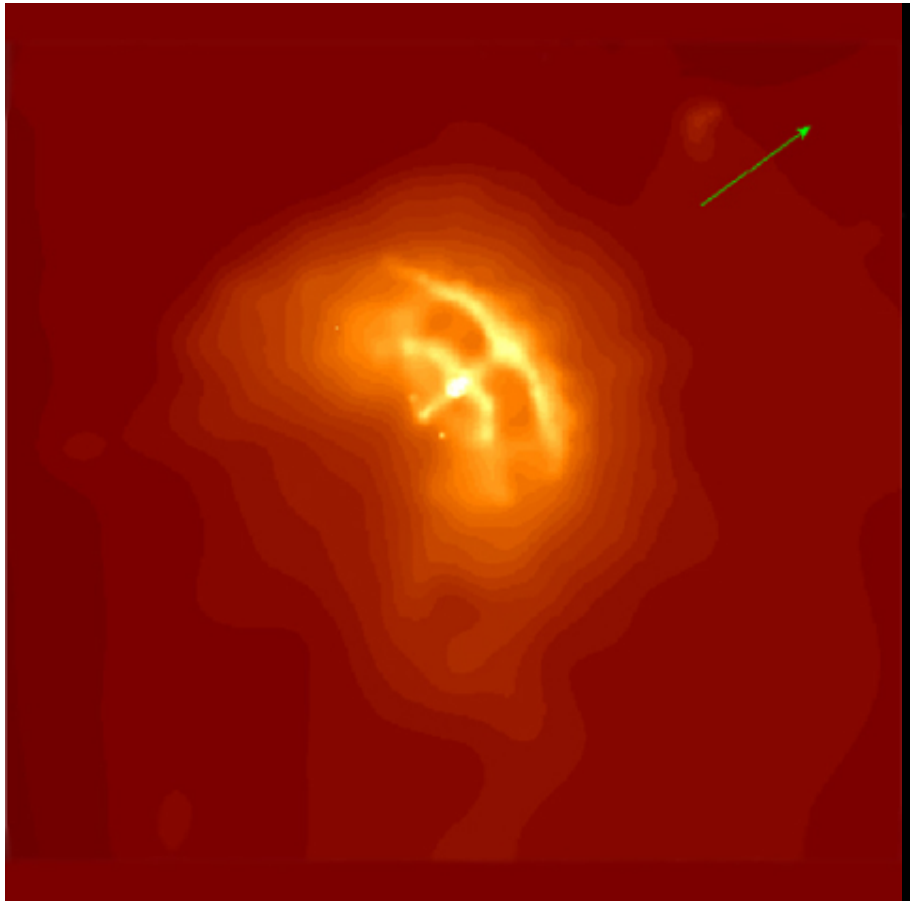
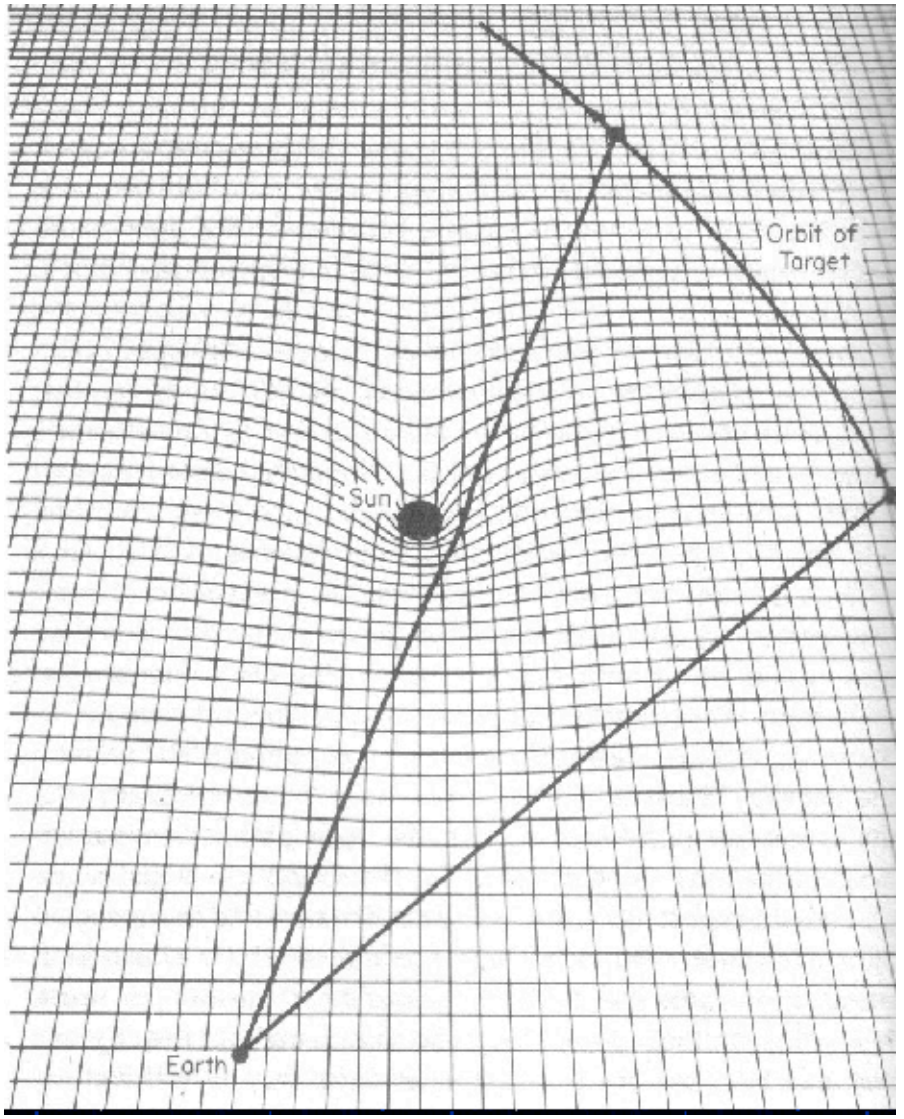
Onde gravitazionali: I fremiti dello spaziotempo

Valeria Ferrari
Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma



Le masse curvano lo spazio

Un segnale radar viene inviato a un satellite o un pianeta distante nel sistema solare e rispedito indietro sulla Terra

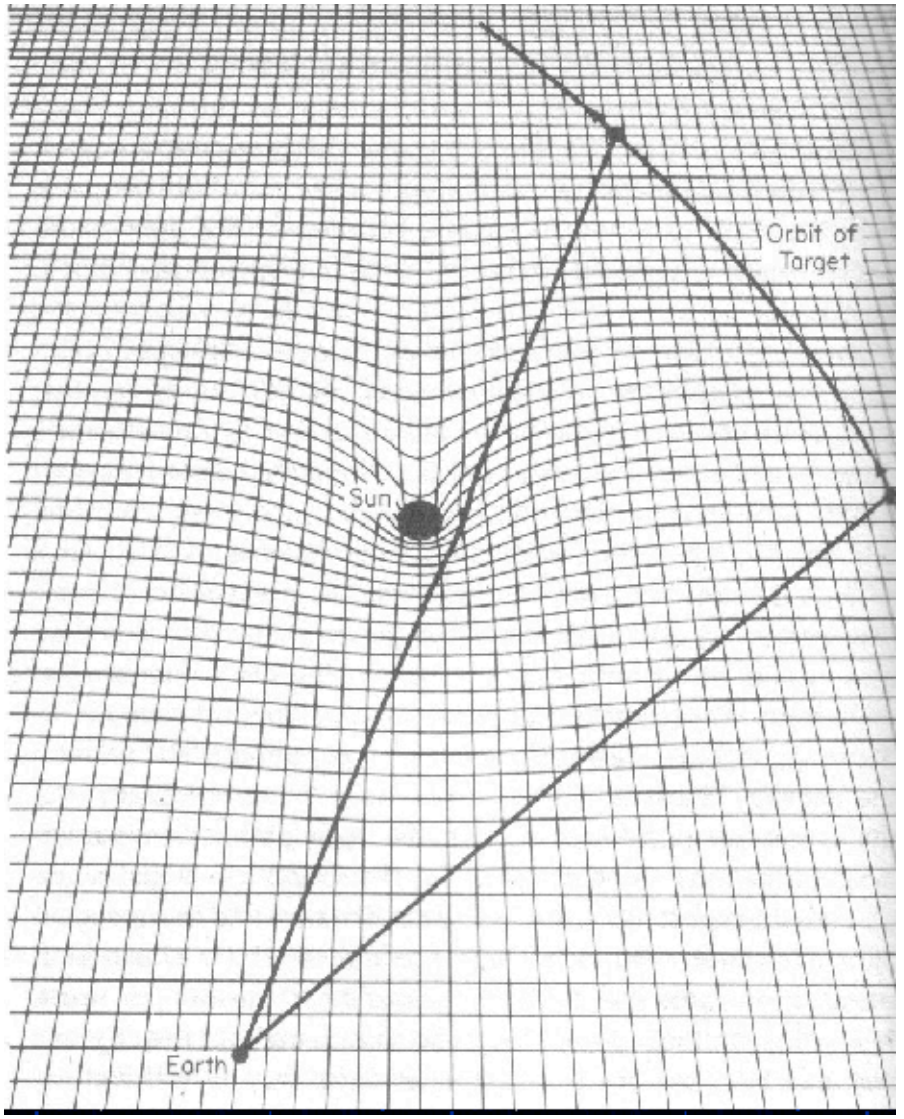


Le masse curvano lo spazio

Un segnale radar viene inviato a un satellite o un pianeta distante nel sistema solare e rispedito indietro sulla Terra

Se la luce andasse in linea retta il segnale tornerebbe indietro dopo un intervallo di tempo pari a

Δt = (spazio percorso)/(velocità della luce)



Le masse curvano lo spazio

Un segnale radar viene inviato a un satellite o un pianeta distante nel sistema solare e rispedito indietro sulla Terra

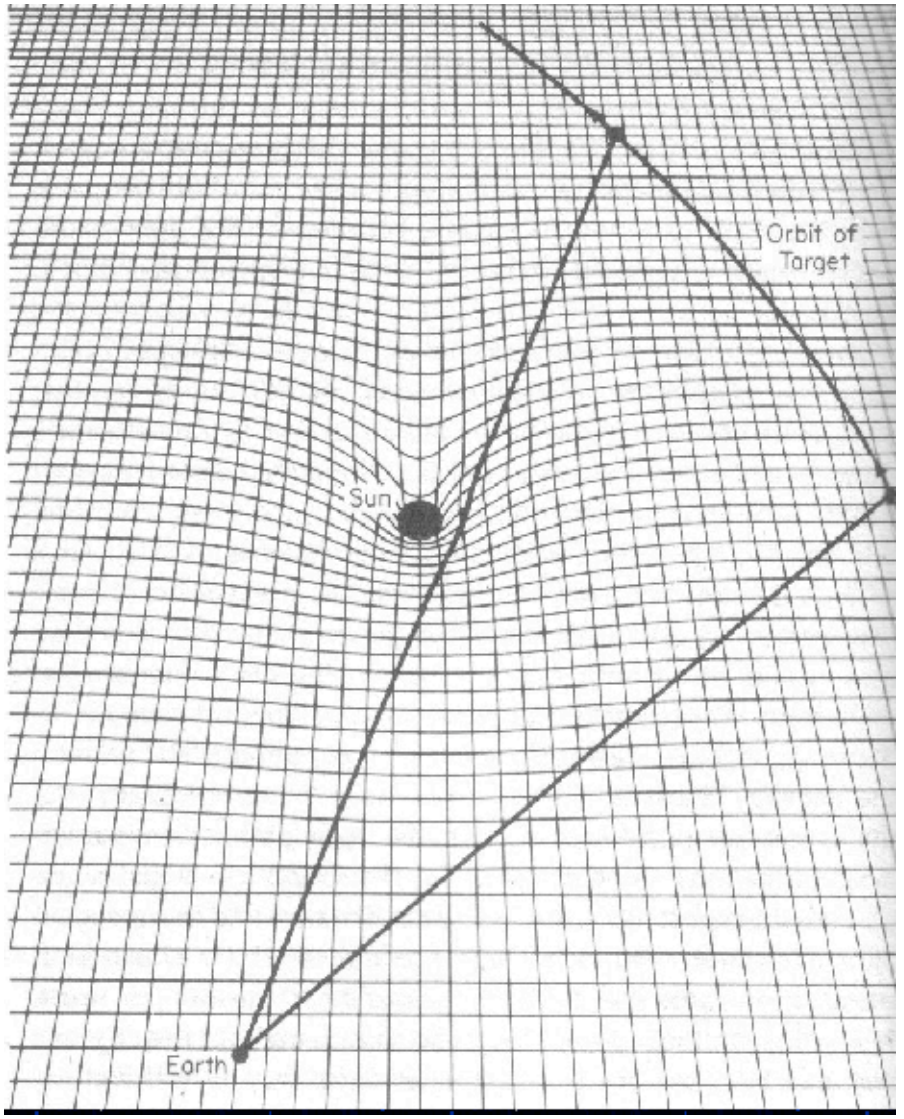
Se la luce andasse in linea retta il segnale tornerebbe indietro dopo un intervallo di tempo pari a

Δt = (spazio percorso)/(velocità della luce)

Invece i raggi che passano nelle vicinanze del Sole subiscono un ritardo

Effetto Shapiro 1964

L'effetto è dovuto al fatto che un raggio che passa vicino al Sole percorre una distanza più lunga rispetto ad uno che passa lontano a causa della curvatura dello spazio



Le masse curvano lo spazio

Un segnale radar viene inviato a un satellite o un pianeta distante nel sistema solare e rispedito indietro sulla Terra

Se la luce andasse in linea retta il segnale tornerebbe indietro dopo un intervallo di tempo pari a

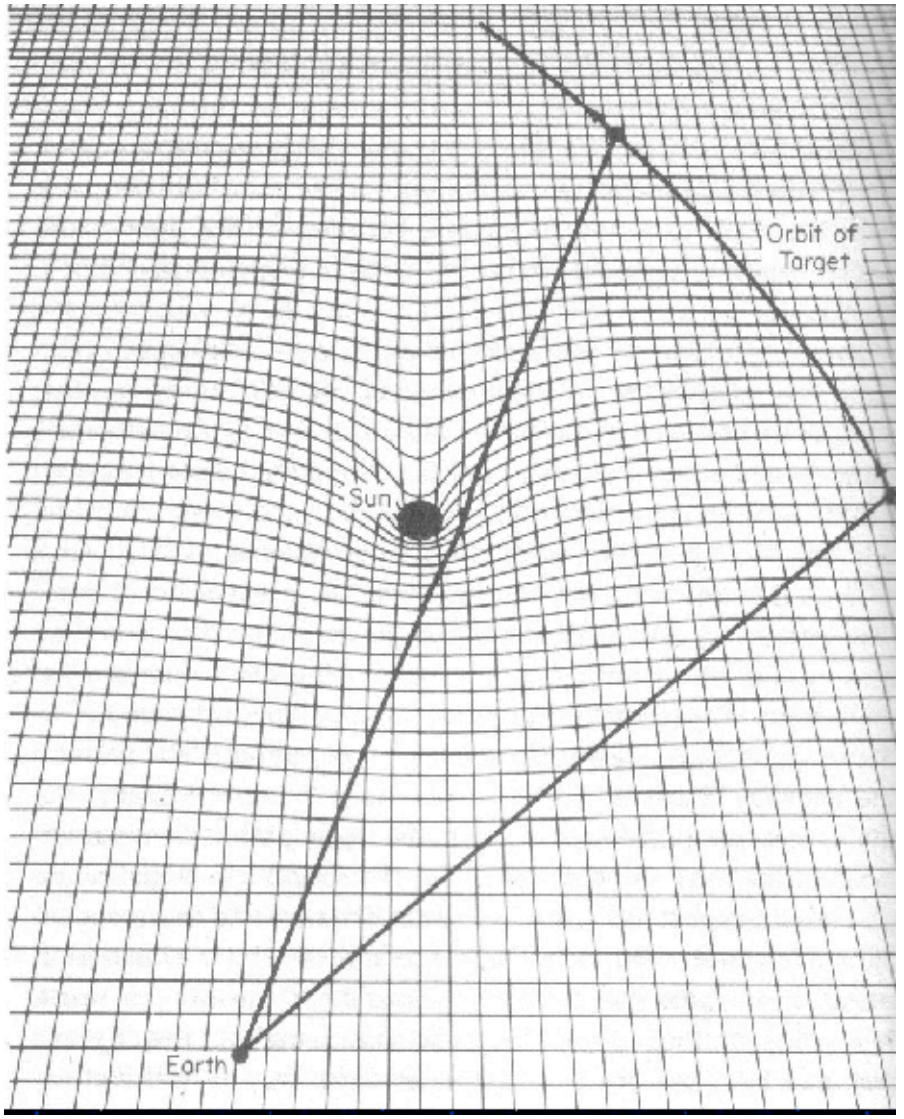
Δt = (spazio percorso)/(velocità della luce)

Invece i raggi che passano nelle vicinanze del Sole subiscono un ritardo

Effetto Shapiro 1964

L'effetto è dovuto al fatto che un raggio che passa vicino al Sole percorre una distanza più lunga rispetto ad uno che passa lontano a causa della curvatura dello spazio

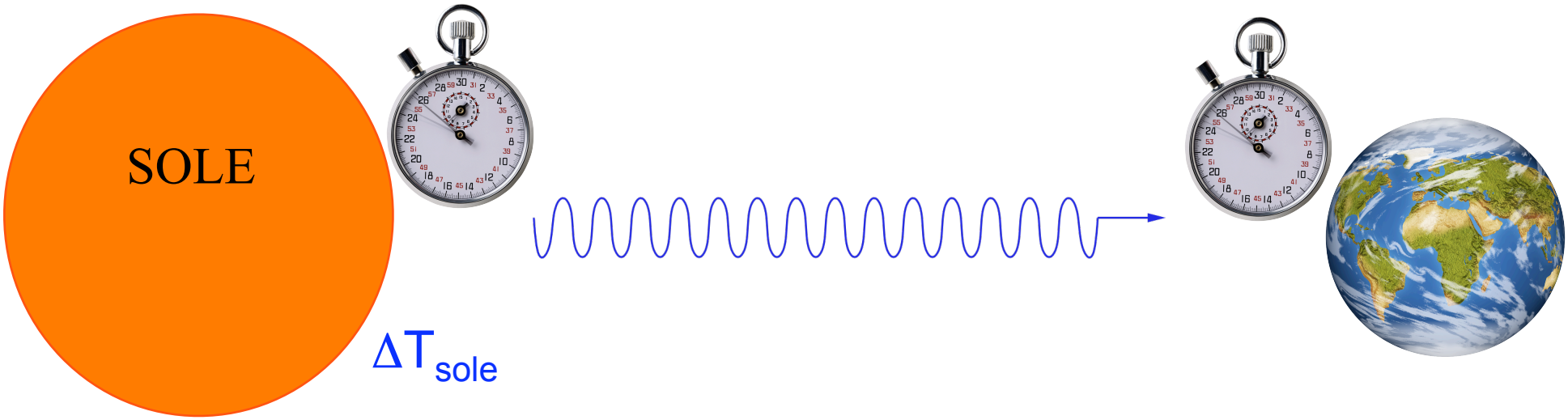
Questo effetto è stato misurato con notevole accuratezza dalla sonda Cassini



Le masse influenzano lo scorrere del tempo

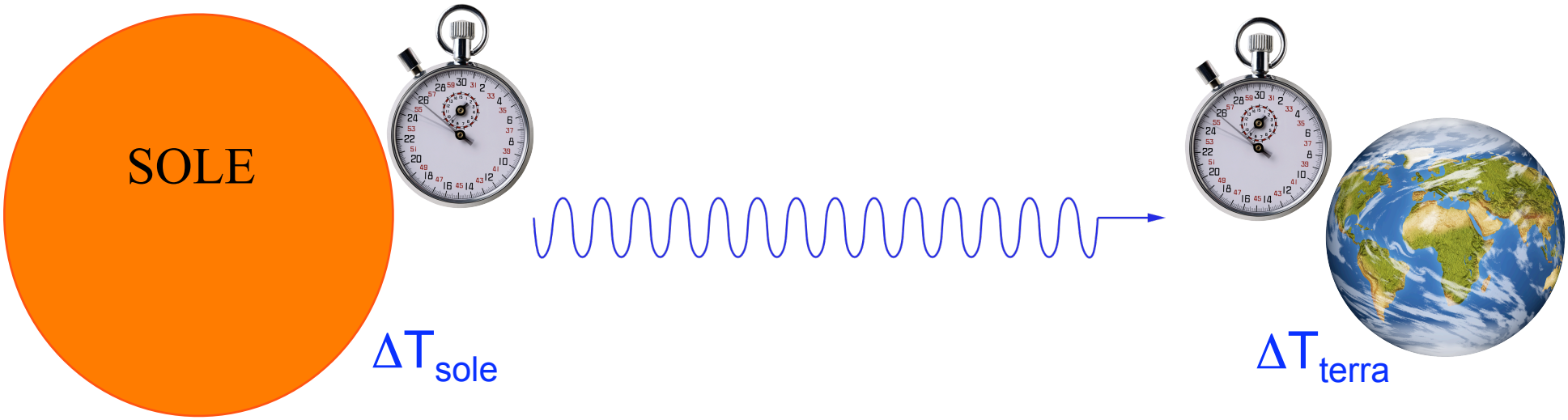
SOLE

Le masse influenzano lo scorrere del tempo



ΔT_{sole} = intervallo di tempo tra l'emissione di due segnali misurato dall'orologio sul Sole

Le masse influenzano lo scorrere del tempo

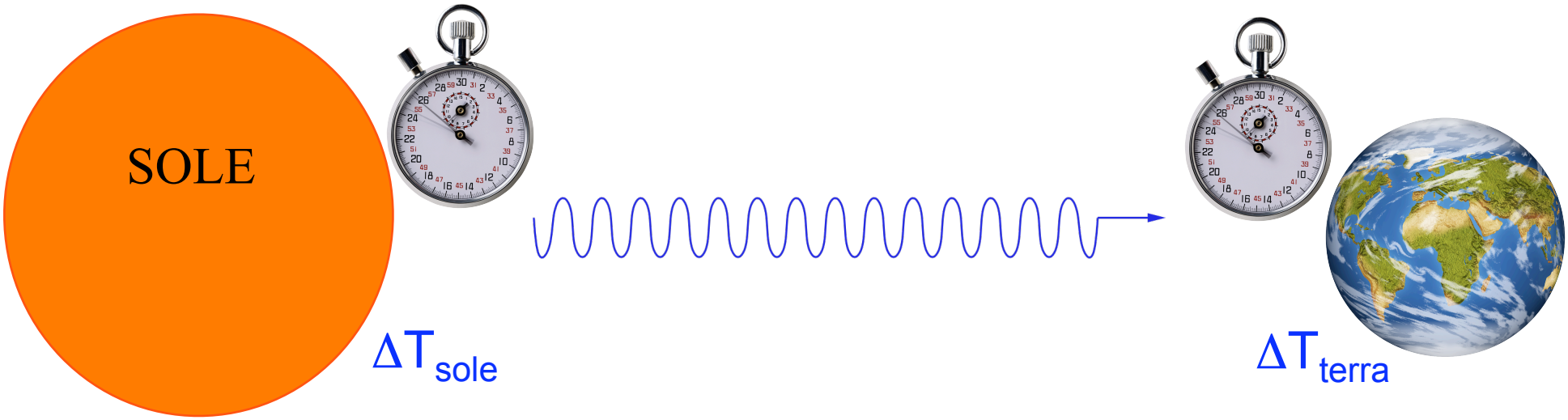


ΔT_{sole} = intervallo di tempo tra l'emissione di due segnali misurato dall'orologio sul Sole

Con l'orologio sulla Terra si misura l'intervallo tra i tempi di ricezione dei due segnali e si trova un intervallo ΔT_{terra} diverso da ΔT_{sole}

$$\Delta T_{sole} < \Delta T_{terra}$$

Le masse influenzano lo scorrere del tempo



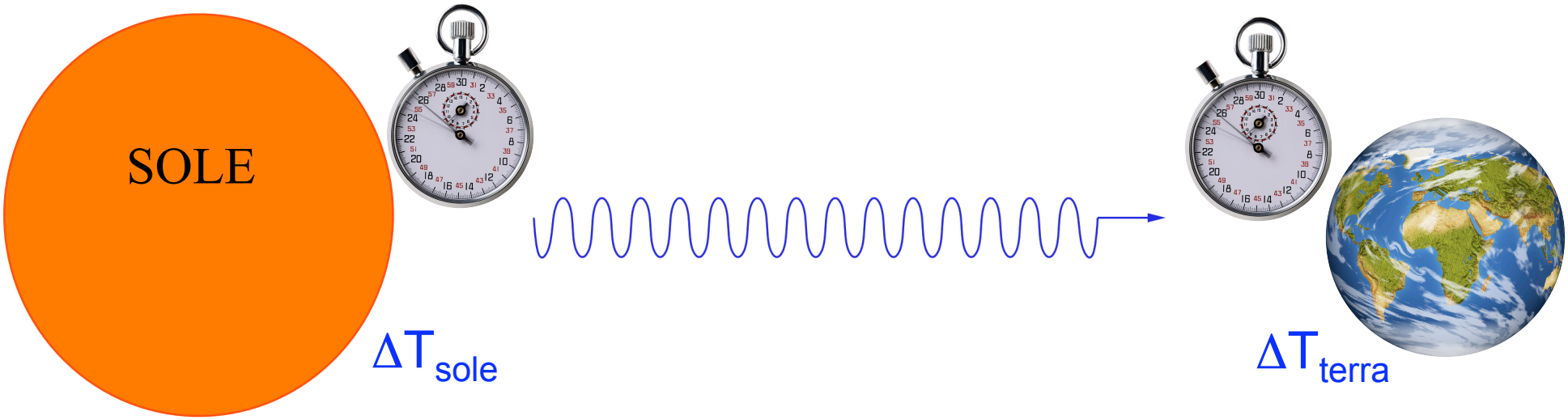
ΔT_{sole} = intervallo di tempo tra l'emissione di due segnali misurato dall'orologio sul Sole

Con l'orologio sulla Terra si misura l'intervallo tra i tempi di ricezione dei due segnali e si trova un intervallo ΔT_{terra} diverso da ΔT_{sole}

$$\Delta T_{sole} < \Delta T_{terra}$$

I corpi massivi influenzano lo scorrere del tempo

Le masse influenzano lo scorrere del tempo



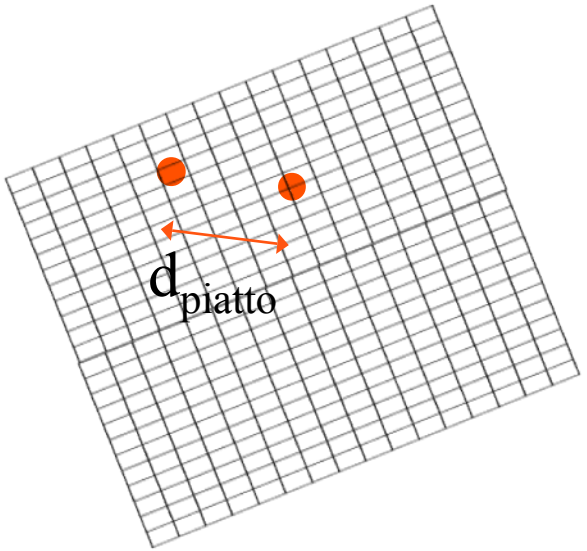
ΔT_{sole} = intervallo di tempo tra l'emissione di due segnali misurato dall'orologio sul Sole

Con l'orologio sulla Terra si misura l'intervallo tra i tempi di ricezione dei due segnali e si trova un intervallo ΔT_{terra} diverso da ΔT_{sole}

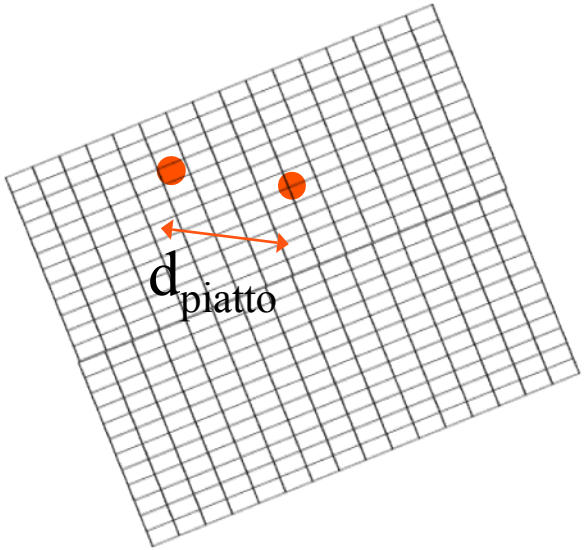
$$\Delta T_{sole} < \Delta T_{terra}$$

I corpi massivi influenzano lo scorrere del tempo

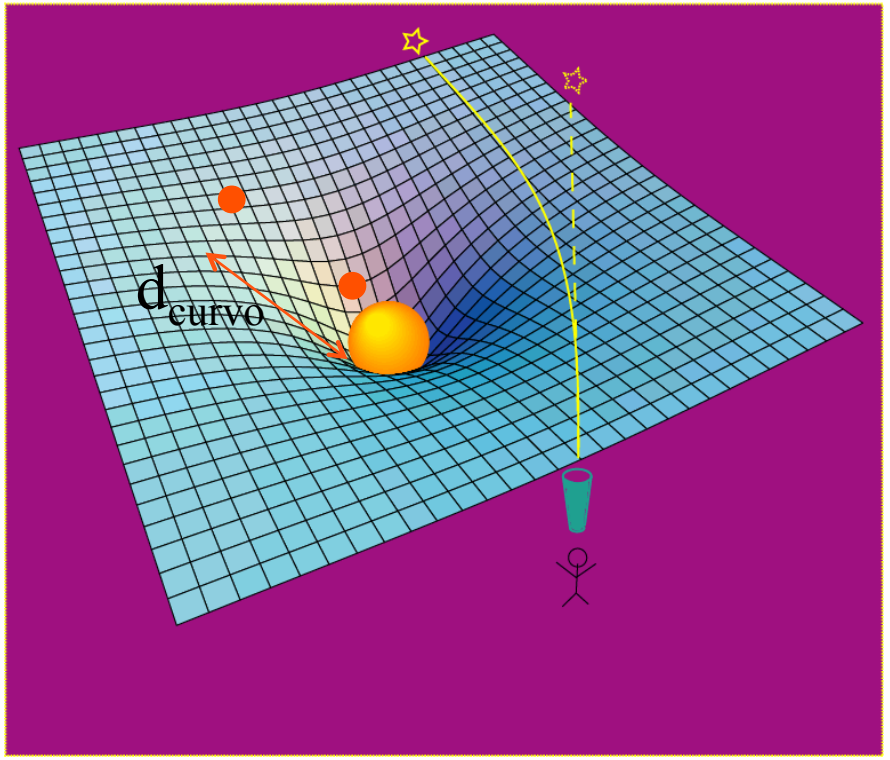
I corpi massivi curvano lo spaziotempo



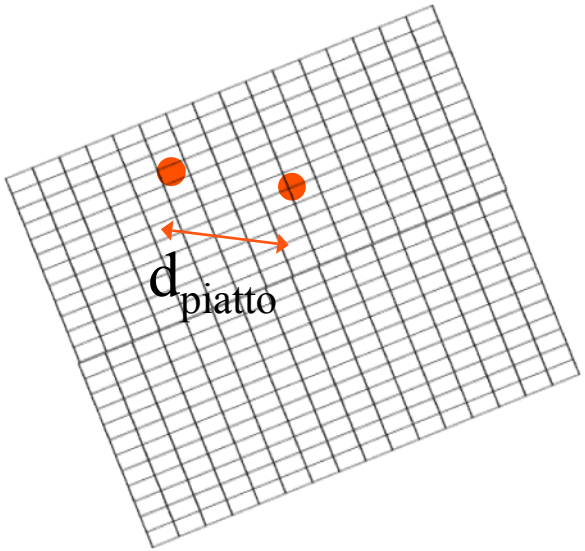
Distanza tra due punti nello spazio piatto



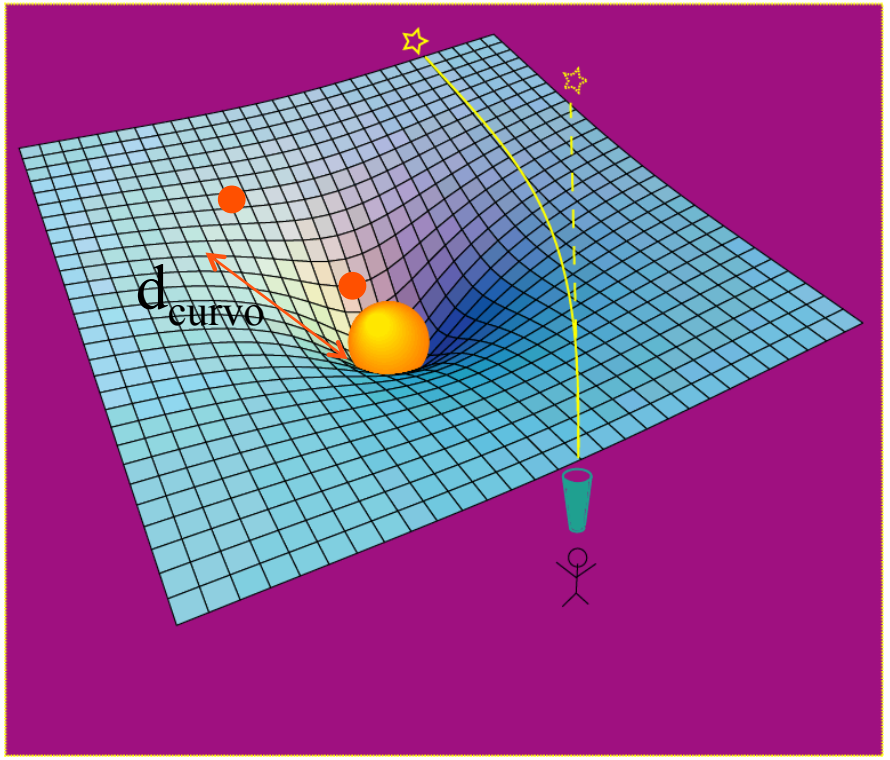
Distanza tra due punti nello spazio piatto



Spazio “curvato” dalla massa: la distanza tra i due punti varia



Distanza tra due punti nello spazio piatto



Spazio “curvato” dalla massa: la distanza tra i due punti varia

Per la Relatività Generale
campo gravitazionale ➔ curvatura dello spaziotempo

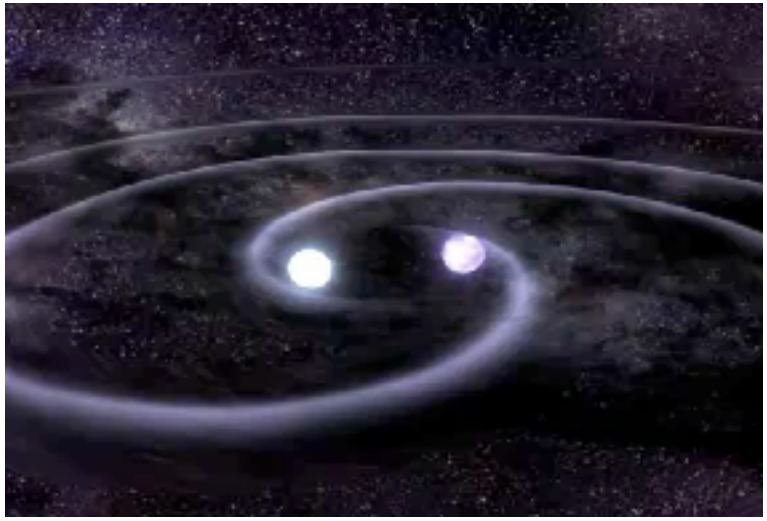
Quando le masse si movono, esplodono, interagiscono, il campo gravitazionale, e quindi la geometria dello spaziotempo, cambia: pertanto la distanza tra punti dello spazio cambia nel tempo

Quando le masse si movono, esplodono, interagiscono, il campo gravitazionale, e quindi la geometria dello spaziotempo, cambia: pertanto la distanza tra punti dello spazio cambia nel tempo

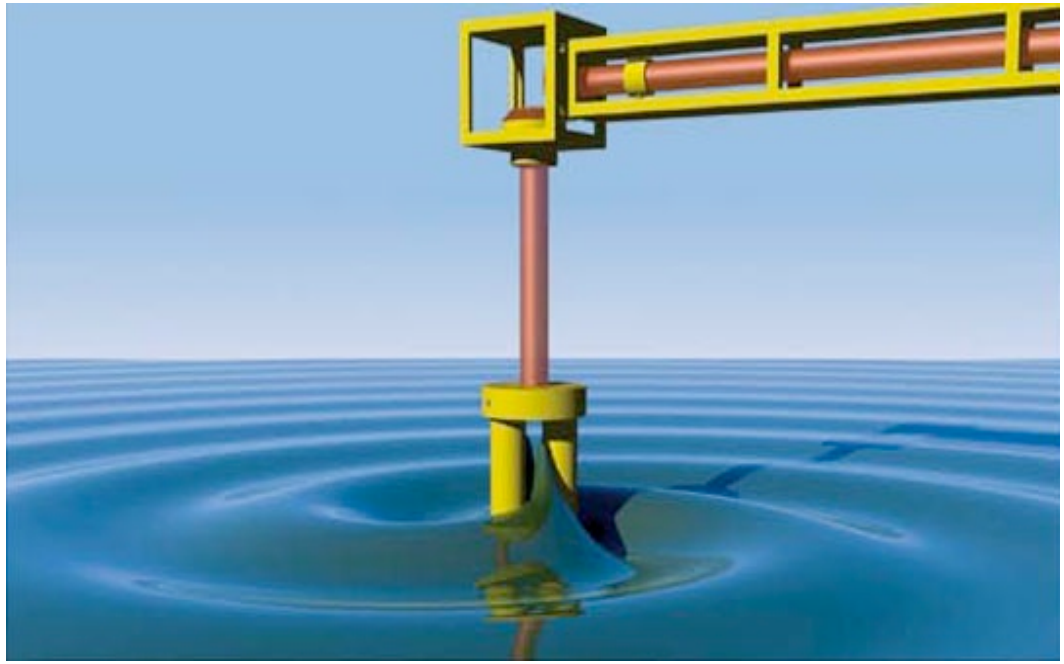
Le onde gravitazionali sono increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce

Quando le masse si movono, esplodono, interagiscono, il campo gravitazionale, e quindi la geometria dello spaziotempo, cambia: pertanto la distanza tra punti dello spazio cambia nel tempo

Le onde gravitazionali sono increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce



Sistema binario formato da due stelle di neutroni



L. Rezzolla, http://www.asimmetrie.it/modules/smartsection/item.php?itemid=22

Analogia meccanica: onde prodotte da un sistema binario

Come si stima l'ampiezza delle onde gravitazionali?

(Valutazione approssimata)

- Si calcola come la massa e l'energia sono distribuite nello spazio e come questa distribuzione varia nel tempo
- Si calcola una grandezza, detta momento di quadrupolo **Q(t)**

Come si stima l'ampiezza delle onde gravitazionali?

(Valutazione approssimata)

- Si calcola come la massa e l'energia sono distribuite nello spazio e come questa distribuzione varia nel tempo
- Si calcola una grandezza, detta momento di quadrupolo **Q(t)**

$$h = \left[\frac{2G}{c^4}\right] \times \left[\frac{1}{r}\right] \times \left[\frac{d^2}{dt^2}(Q(t))\right]$$

ampiezza dell'onda

G= costante di gravitazione universale = 6.67 $\bullet 10^{-11}$ $m^3/kg\ s^2$

c= velocità della luce = 300.000 km/s

Come si stima l'ampiezza delle onde gravitazionali?

(Valutazione approssimata)

- Si calcola come la massa e l'energia sono distribuite nello spazio e come questa distribuzione varia nel tempo
- Si calcola una grandezza, detta momento di quadrupolo **Q(t)**

$$h = \left[\frac{2G}{c^4}\right] \times \left[\frac{1}{r}\right] \times \left[\frac{d^2}{dt^2}(Q(t))\right]$$

ampiezza dell'onda

G= costante di gravitazione universale = $6.67 \cdot 10^{-11}$ $m^3/kg\ s^2$

c= velocità della luce = 300.000 km/s

$$\left[\frac{2G}{c^4}\right] = 8 \times 10^{-45}\ s^2 / kg \cdot m$$

le onde gravitazionali sono debolissime!

La Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali siano di natura quadrupolare:

Una distribuzione di cariche accelerate emette onde elettromagnetiche

La Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali siano di natura quadrupolare:

Una distribuzione di cariche accelerate emette onde elettromagnetiche

Affinchè una distribuzione di masse accelerate emetta onde gravitazionali deve avere un certo grado di asimmetria

La Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali siano di natura quadrupolare:

Una distribuzione di cariche accelerate emette onde elettromagnetiche

Affinchè una distribuzione di masse accelerate emetta onde gravitazionali deve avere un certo grado di asimmetria

Un collasso gravitazionale perfettamente sferico non emette onde gravitazionali

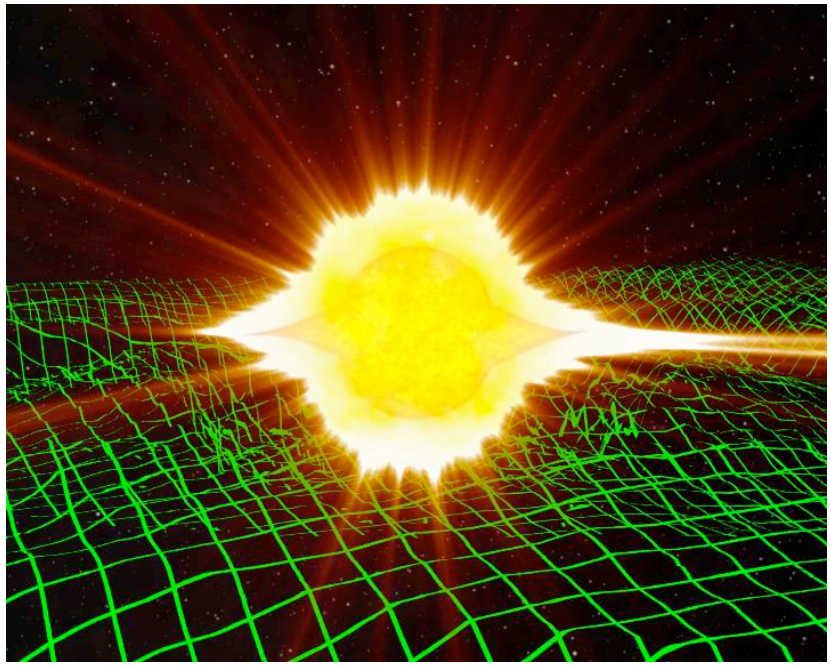
La Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali siano di natura quadrupolare:

Una distribuzione di cariche accelerate emette onde elettromagnetiche

Affinchè una distribuzione di masse accelerate emetta onde gravitazionali deve avere un certo grado di asimmetria

Un collasso gravitazionale perfettamente sferico non emette onde gravitazionali

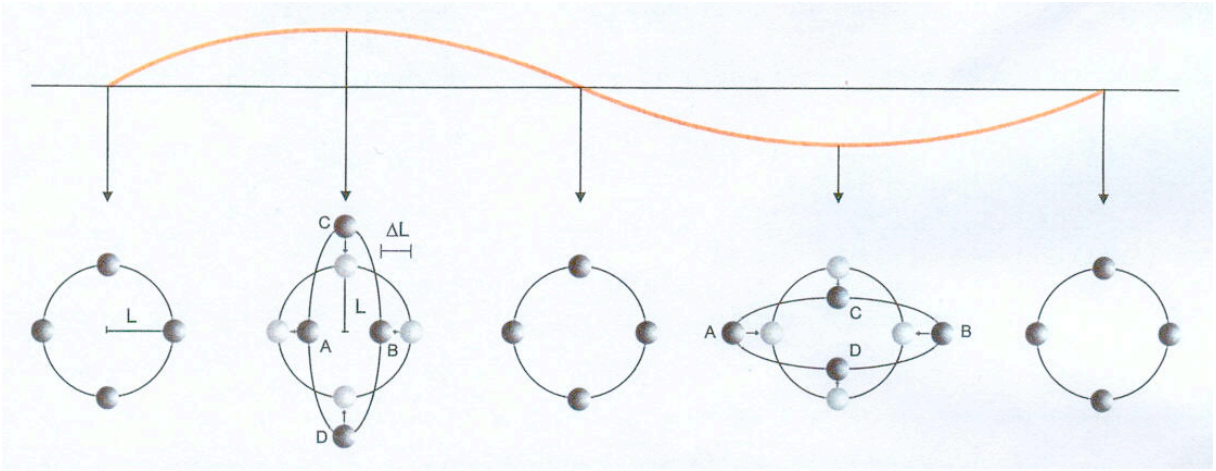
Un collasso gravitazionale non sferico oppure la coalescenza di stelle e buchi neri, si.



http://www.jodrellbank.manchester.ac.uk/

Effetto di un'onda gravitazionale

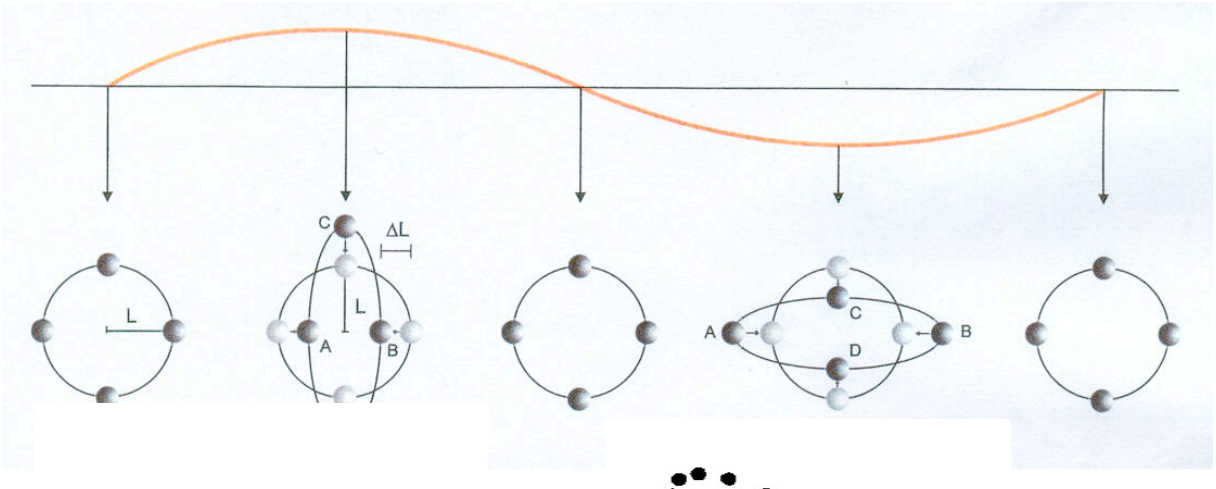
sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



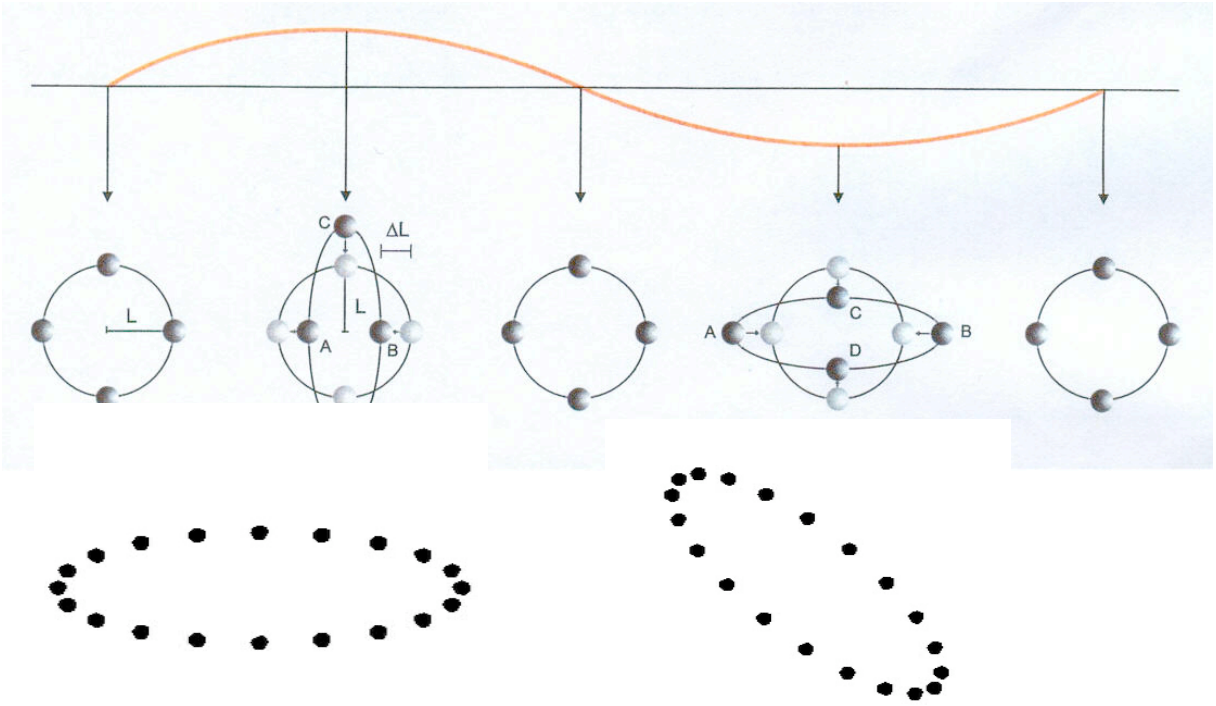
l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

$$\Delta L = h L$$

h = ampiezza dell'onda

Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

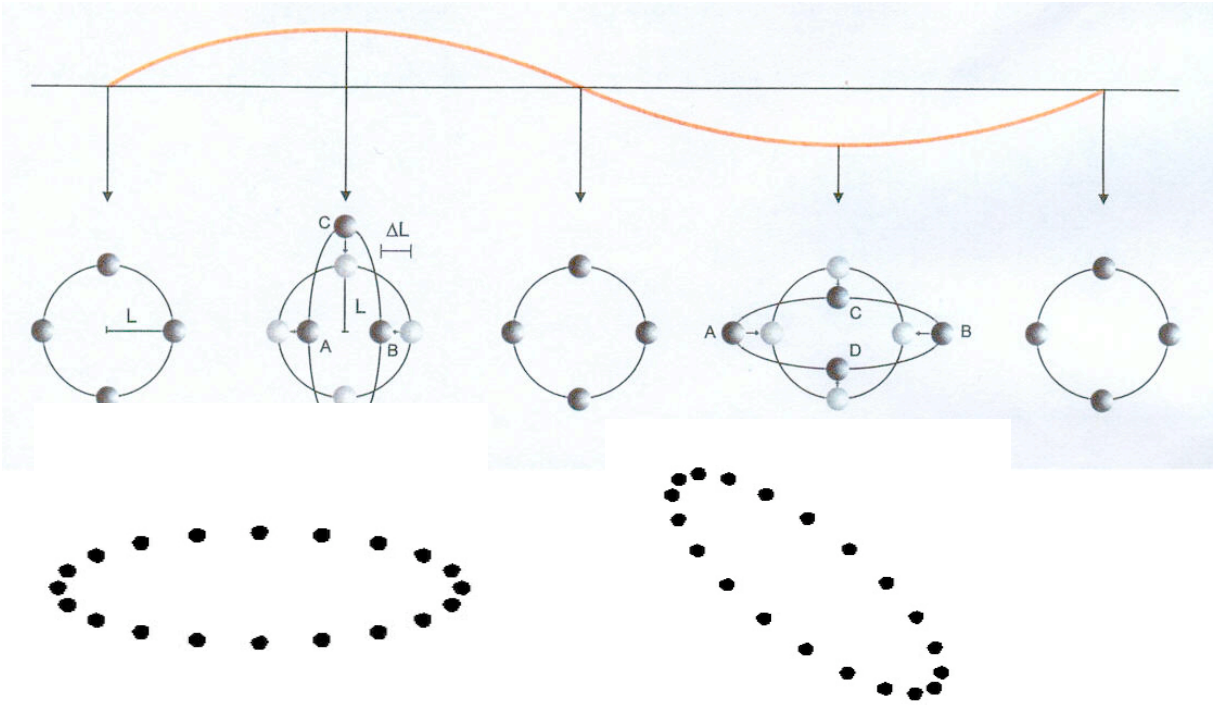
$$\Delta L = h L$$

h = ampiezza dell'onda

Una sorgente molto intensa: supernova che esplode nella Galassia → $h \approx 10^{-18}$

Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

$$\Delta L = h L$$

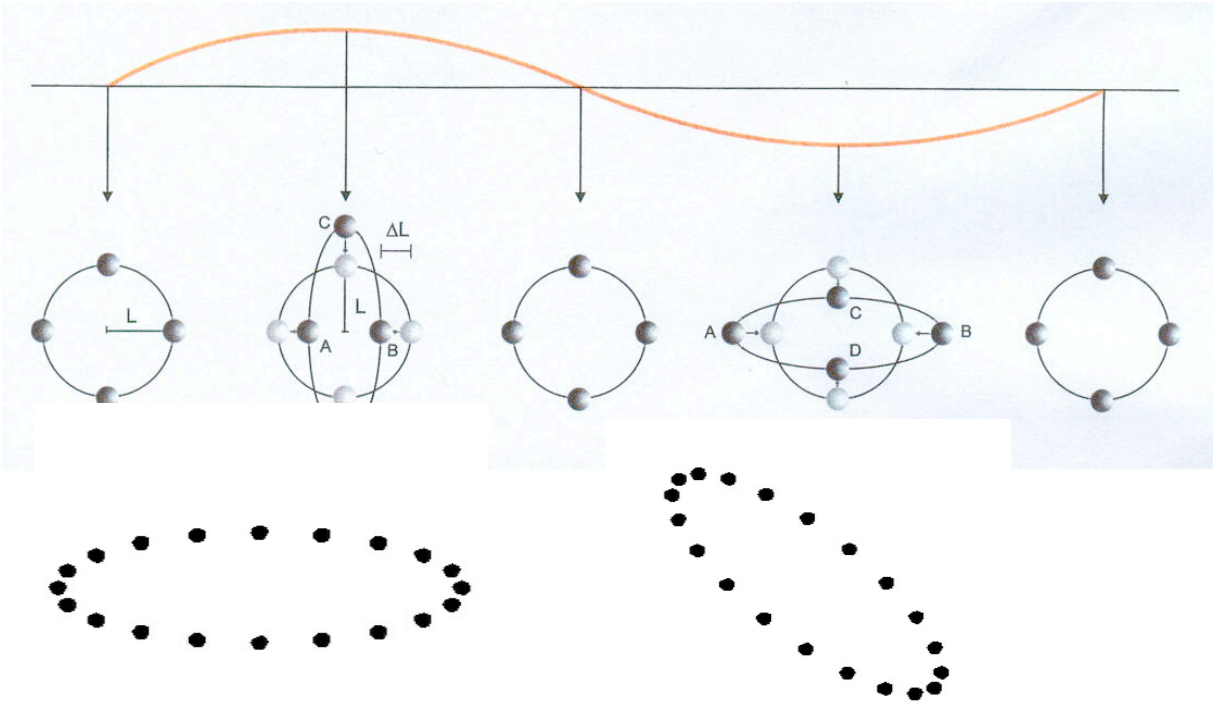
h = ampiezza dell'onda

Una sorgente molto intensa: supernova che esplode nella Galassia → $h \approx 10^{-18}$

L = 1 km : $\Delta L = h L = 10^{-18}\ 10^{3} = 10^{-15}$ m ≈ **raggio protone**

Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

$$\Delta L = h L$$

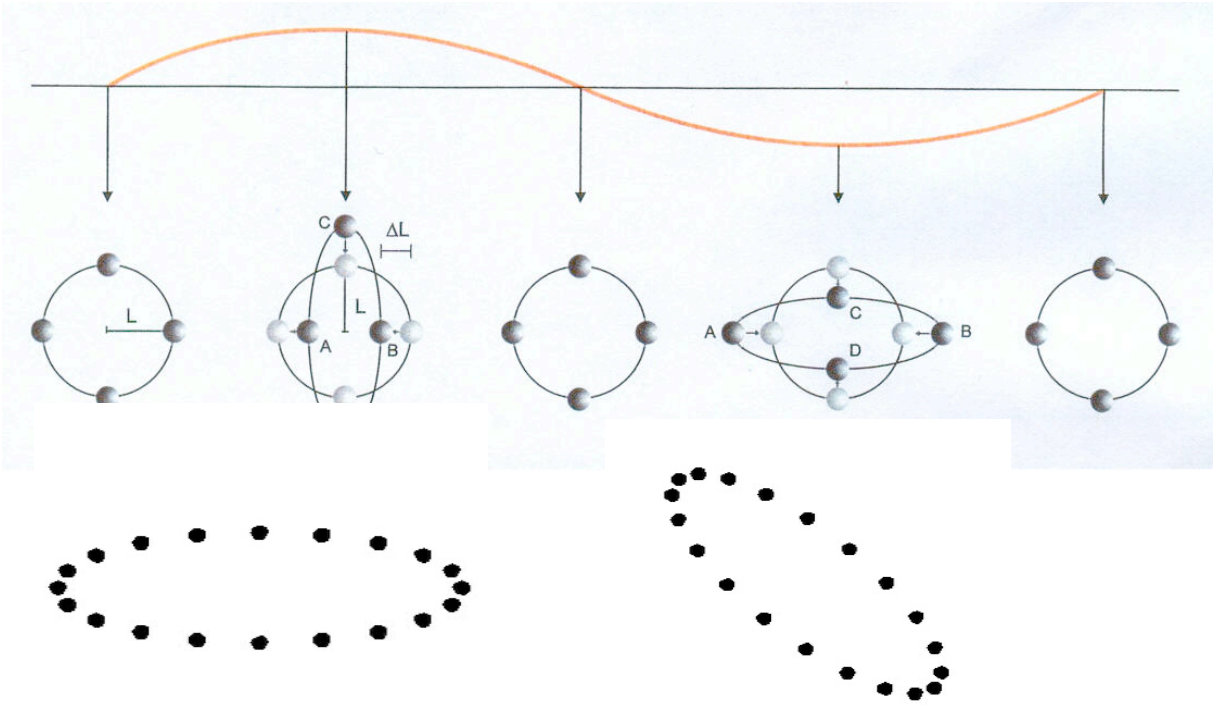
h = ampiezza dell'onda

Una sorgente molto intensa: supernova che esplode nella Galassia → $h \approx 10^{-18}$

L = 1 km : $\Delta L = h L = 10^{-18}\ 10^{3} = 10^{-15}$ m ≈ **raggio protone**

Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova: anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione: onda trasversa

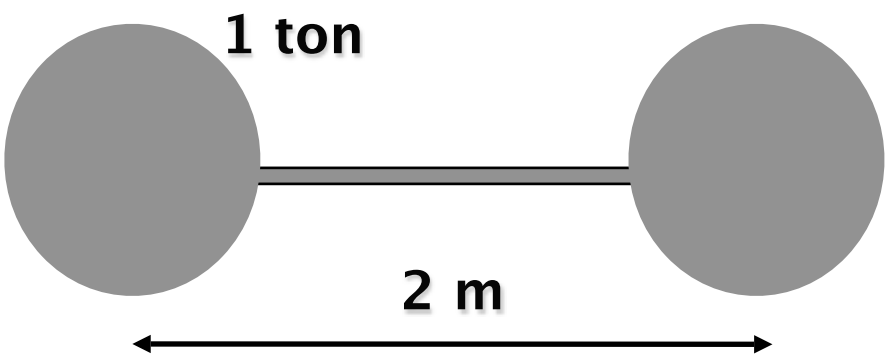
$$\Delta L = h L$$

h = ampiezza dell'onda

Una sorgente molto intensa: supernova che esplode nella Galassia → $h \approx 10^{-18}$

L = 1 km : $\Delta L = h L = 10^{-18}\ 10^{3} = 10^{-15}$ m ≈ **raggio protone**

Possiamo generare onde gravitationali con esperimenti sulla Terra?

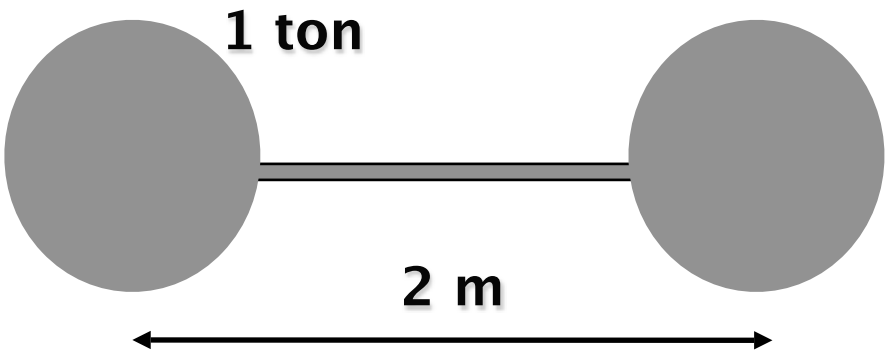


f_{rot}=1000 giri/s = 1 kHz

r=distanza dal rivelatore= 300 km

$h < 9 \times 10^{-39}$

Possiamo generare onde gravitationali con esperimenti sulla Terra?



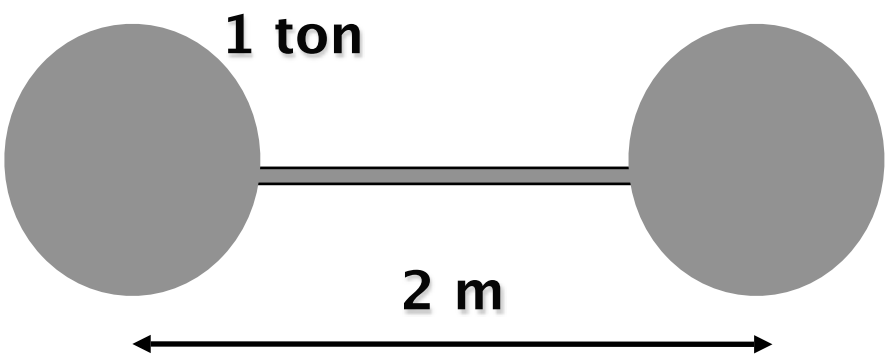
f_{rot}=1000 giri/s = 1 kHz

r=distanza dal rivelatore= 300 km

$h < 9 \times 10^{-39}$

$$\Delta L = h L$$

Possiamo generare onde gravitationali con esperimenti sulla Terra?



f_{rot}=1000 giri/s = 1 kHz

r=distanza dal rivelatore= 300 km

$h < 9 \times 10^{-39}$

$$\Delta L = h L$$

$$\Delta L = hL \sim 10^{-39} (10^{3} \text{ m}) \sim 10^{-36} \text{ m}$$

troppo deboli per essere rivelate

Siamo sicuri che le onde gravitazionali esistono?

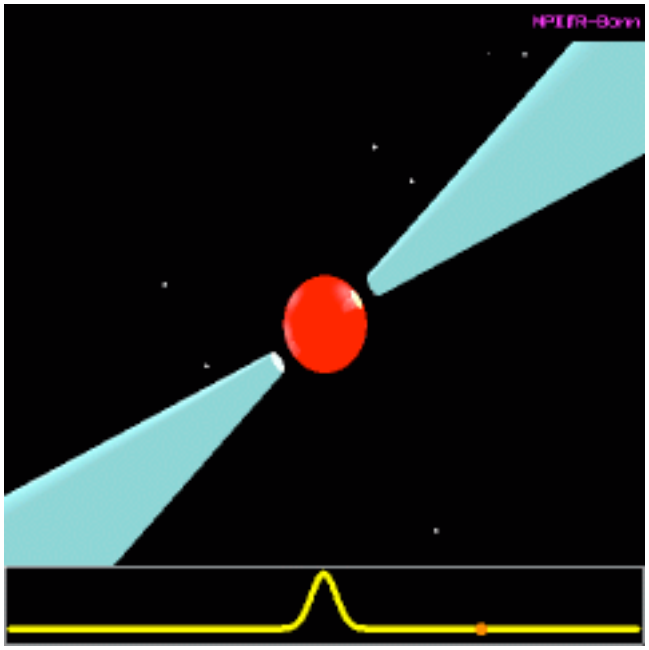
La riposta viene dalle Pulsar

Il Sole ha
$M = M_\odot \approx 2\times10^{30}$ kg
$R = R_\odot = 700.000$ km

Una stella di neutroni ha
$M = 1\text{-}2\ M_\odot$ (masse solari)
$R = 10$ km

Siamo sicuri che le onde gravitazionali esistono?

La riposta viene dalle Pulsar



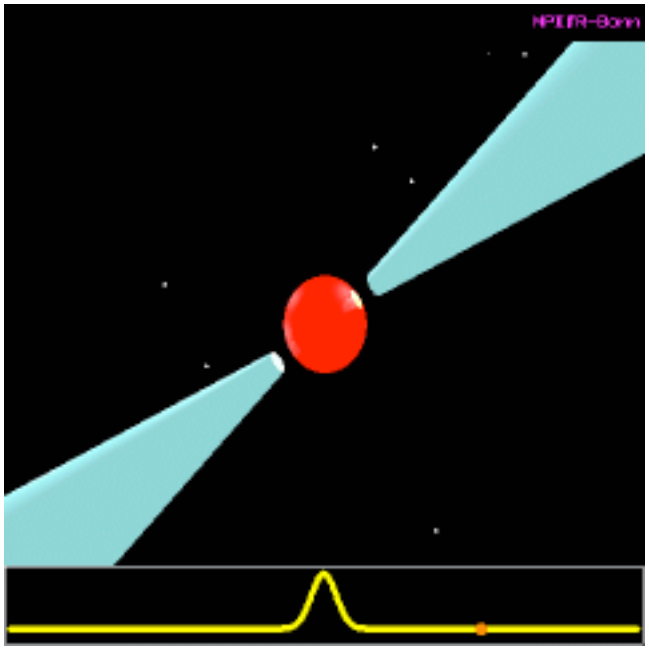
Le Pulsar (acronimo per pulsating radio sources) sono stelle di neutroni rapidamente rotanti con un campo magnetico molto elevato che emettono un fascio collimato di onde radio.

Il Sole ha
$M = M_\odot \approx 2\times10^{30}$ kg
$R = R_\odot = 700.000$ km

Una stella di neutroni ha
$M = 1\text{-}2\ M_\odot$ (masse solari)
$R = 10$ km

Siamo sicuri che le onde gravitazionali esistono?

La riposta viene dalle Pulsar



Le Pulsar (acronimo per pulsating radio sources) sono stelle di neutroni rapidamente rotanti con un campo magnetico molto elevato che emettono un fascio collimato di onde radio.

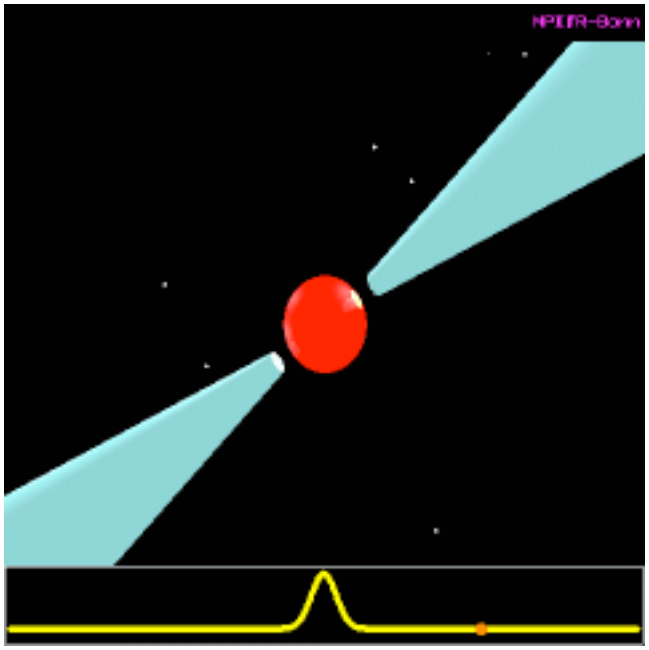
L'emissione radio, provenendo dai poli magnetici della stella, è confinato entro un piccolo cono di emissione e, se l'asse magnetico non è allineato con quello rotazionale, la stella di neutroni si comporta come una sorta di faro cosmico e un osservatore sulla Terra vedrà una sequenza di impulsi di onde radio.

Il Sole ha
$M = M_\odot \approx 2\times10^{30}$ kg
$R = R_\odot = 700.000$ km

Una stella di neutroni ha
$M = 1\text{-}2\ M_\odot$ (masse solari)
$R = 10$ km

Siamo sicuri che le onde gravitazionali esistono?

La riposta viene dalle Pulsar



Le Pulsar (acronimo per pulsating radio sources) sono stelle di neutroni rapidamente rotanti con un campo magnetico molto elevato che emettono un fascio collimato di onde radio.

L'emissione radio, provenendo dai poli magnetici della stella, è confinato entro un piccolo cono di emissione e, se l'asse magnetico non è allineato con quello rotazionale, la stella di neutroni si comporta come una sorta di faro cosmico e un osservatore sulla Terra vedrà una sequenza di impulsi di onde radio.

Il Sole ha
$M = M_\odot \approx 2\times10^{30}$ kg
$R = R_\odot = 700.000$ km

Una stella di neutroni ha
$M = 1\text{-}2\ M_\odot$ (masse solari)
$R = 10$ km

Nel 1974 fu scoperto un sistema binario formato da una stella di neutroni normale e da una pulsar

(R.A. Hulse and J.H. Taylor, *Discovery Of A Pulsar in A Binary System, Astrophys. J.* 195, L51, 1975)

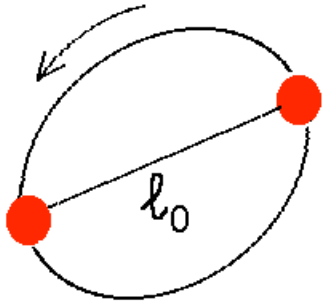
PULSAR BINARIA PSR 1913 + 16

$M_1 = M_2 \sim 1.4\ M_\odot$ $l_0 = 2\ R_\odot$

$P \sim 8h$

distanza dalla Terra ~ 5000pc

1 parsec= $3.08 \cdot 10^{10}$ km



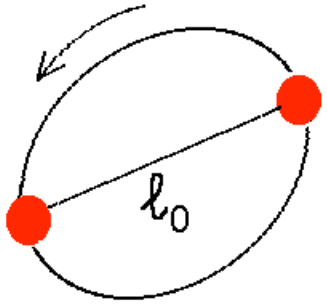
Nel 1974 fu scoperto un sistema binario formato da una stella di neutroni normale e da una pulsar

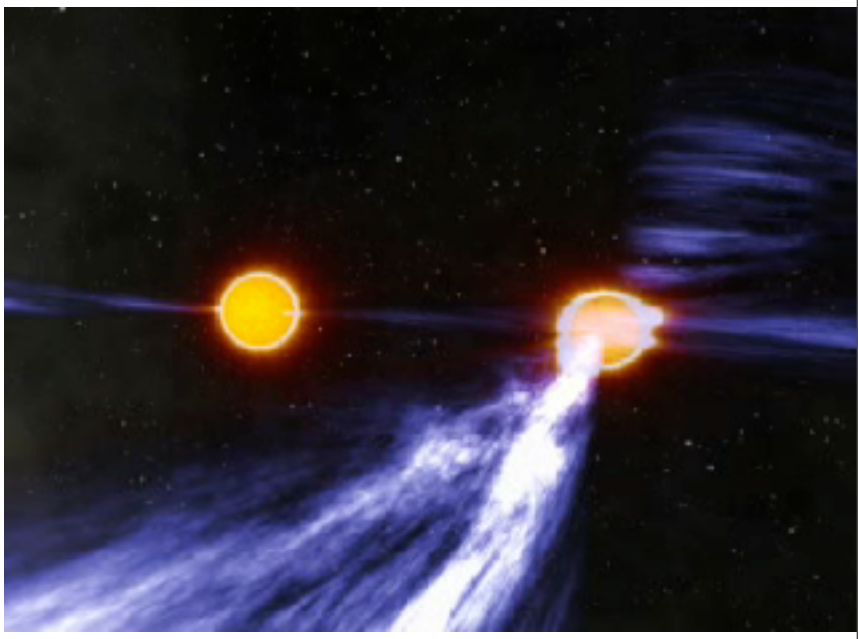
(R.A. Hulse and J.H. Taylor, *Discovery Of A Pulsar in A Binary System, Astrophys. J.* 195, L51, 1975)

PULSAR BINARIA PSR 1913 + 16

Secondo la Relatività Generale il sistema perde energia perché emette onde gravitazionali.

Dato che l'energia totale si conserva, la perdita deve essere compensata, quindi deve variare l'energia orbitale: l'orbita si contrae, la velocità orbitale aumenta, quindi il tempo impiegato a percorrere ogni orbita **(periodo orbitale)** diminuisce.





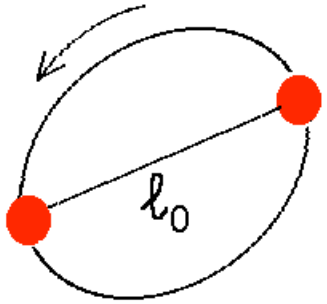
Nel 1974 fu scoperto un sistema binario formato da una stella di neutroni normale e da una pulsar

(R.A. Hulse and J.H. Taylor, *Discovery Of A Pulsar in A Binary System, Astrophys. J.* 195, L51, 1975)

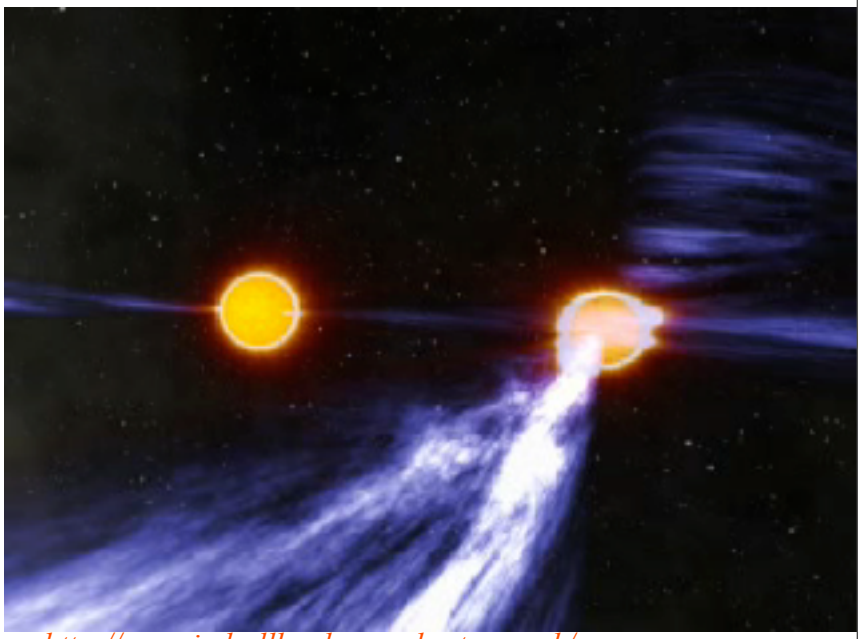
PULSAR BINARIA PSR 1913 + 16

Secondo la Relatività Generale il sistema perde energia perché emette onde gravitazionali.

Dato che l'energia totale si conserva, la perdita deve essere compensata, quindi deve variare l'energia orbitale: l'orbita si contrae, la velocità orbitale aumenta, quindi il tempo impiegato a percorrere ogni orbita **(periodo orbitale)** diminuisce.



IDEA di Hulse e Taylor: misuriamo come varia il periodo orbitale e vediamo se varia proprio come predetto dalla Relatività Generale. Se è così avremo mostrato che le onde gravitazionali esistono!



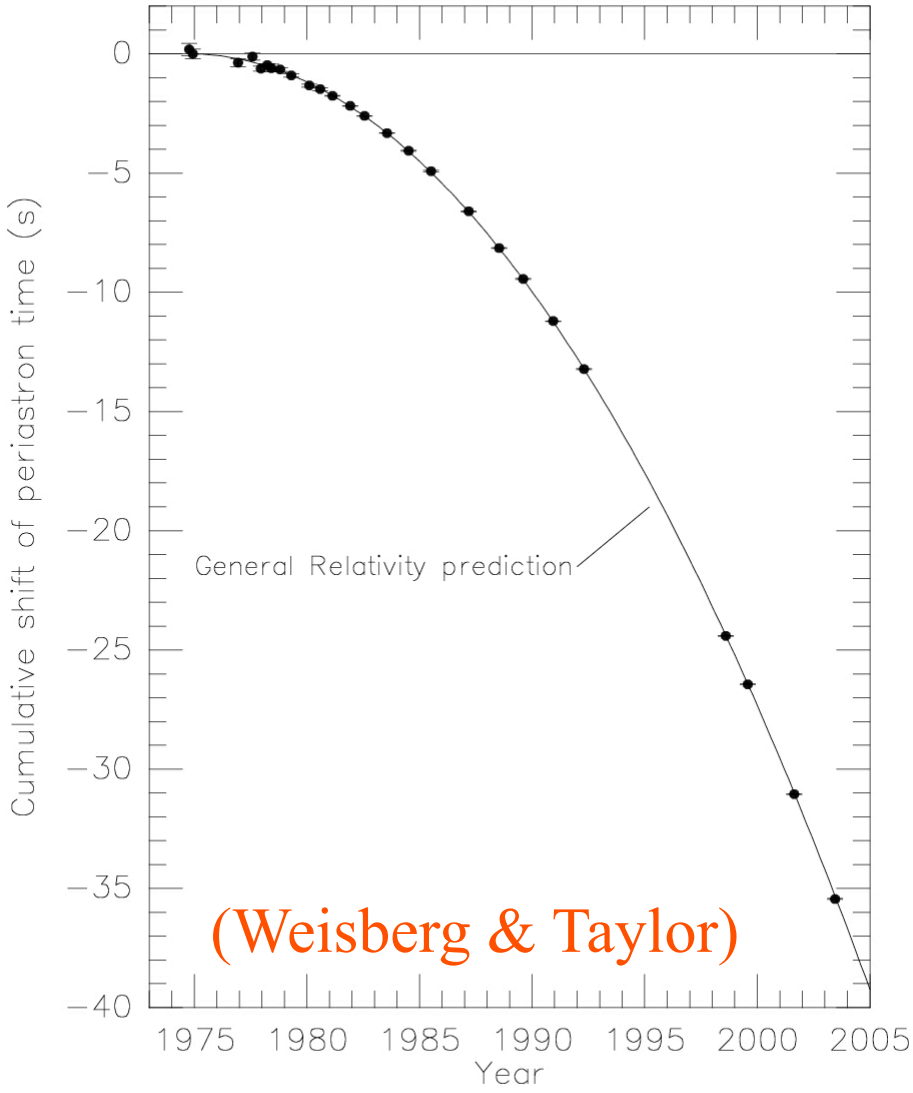
http://www.jodrellbank.manchester.ac.uk/

la misura è durata anni perché le variazioni del periodo sono piccolissime

il periodo orbitale diminuisce di
0.0000765 secondi all'anno
il semiasse maggiore varia di
3.5 metri all'anno
in accordo perfetto con la teoria!

la misura è durata anni perché le variazioni del periodo sono piccolissime

il periodo orbitale diminuisce di
0.0000765 secondi all'anno
il semiasse maggiore varia di
3.5 metri all'anno
in accordo perfetto con la teoria!



la misura è durata anni perché le variazioni del periodo sono piccolissime

il periodo orbitale diminuisce di
0.0000765 secondi all'anno
il semiasse maggiore varia di
3.5 metri all'anno
in accordo perfetto con la teoria!

Prima evidenza indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali

la misura è durata anni perché le variazioni del periodo sono piccolissime

il periodo orbitale diminuisce di
0.0000765 secondi all'anno
il semiasse maggiore varia di
3.5 metri all'anno
in accordo perfetto con la teoria!

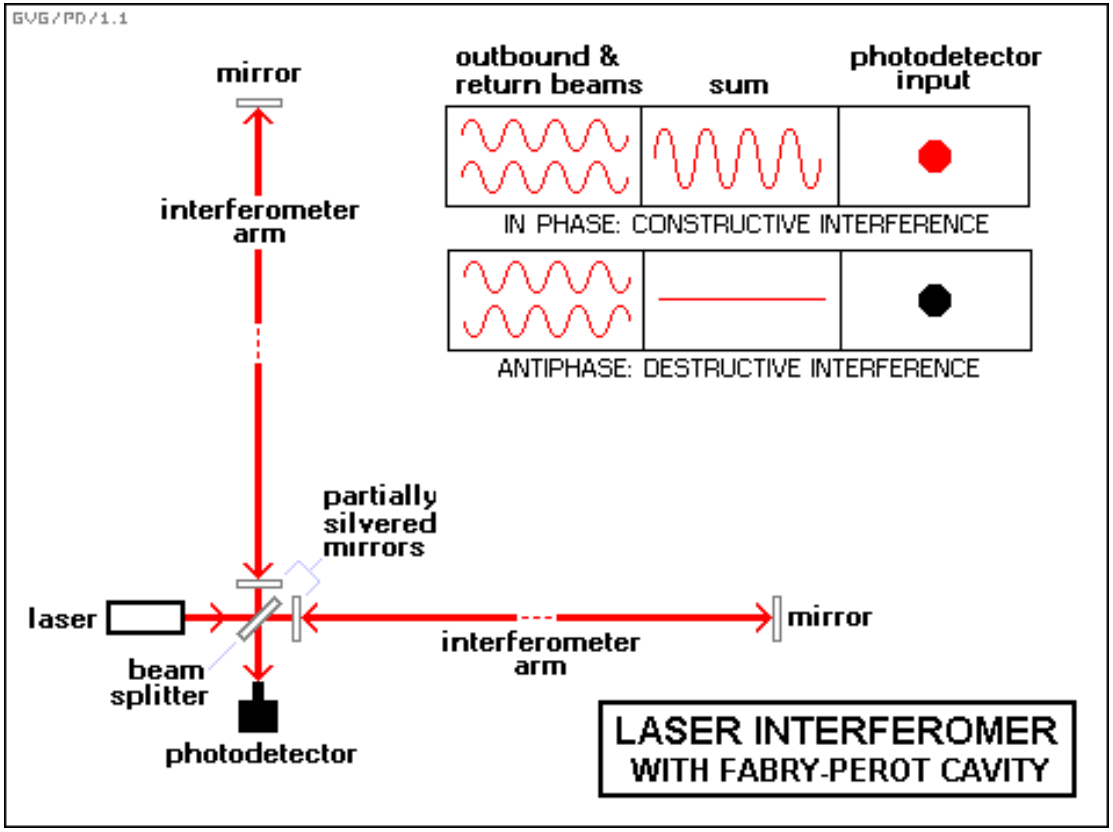
Prima evidenza indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali

Per questo risultato Hulse e Taylor hanno ricevuto il premio Nobel nel 1993

Quella di Hulse e Taylor è una prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali

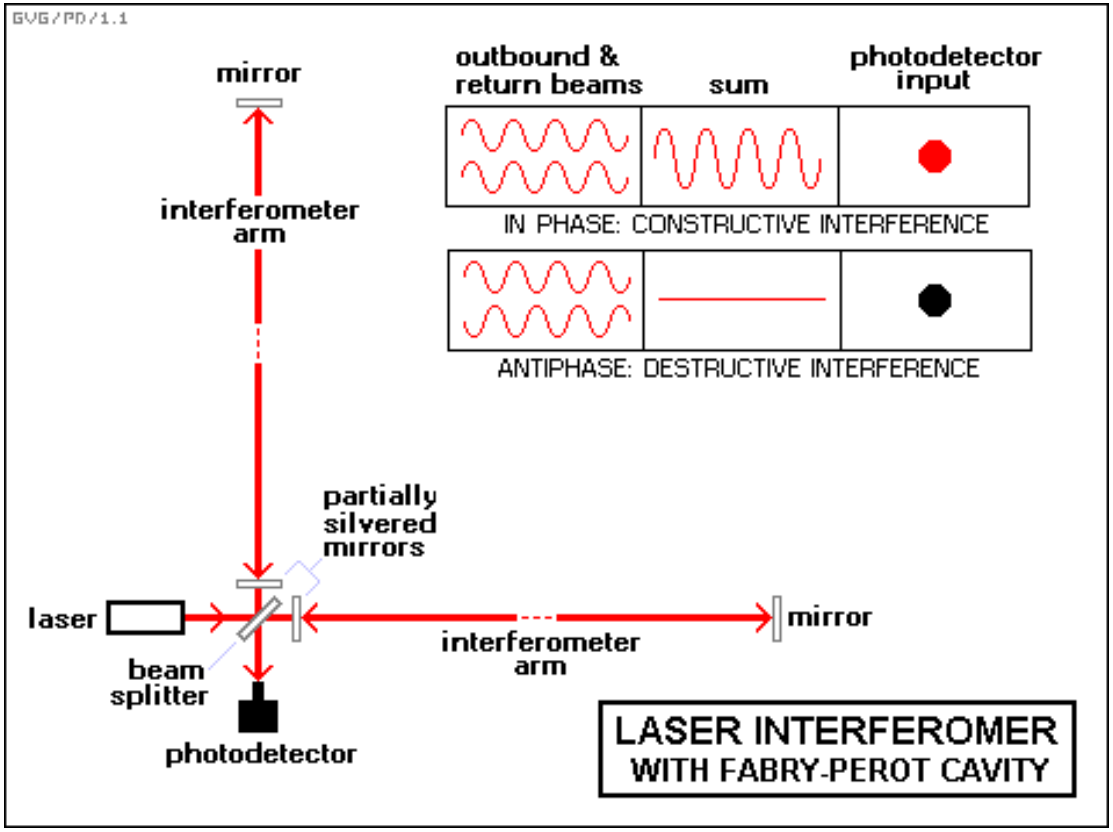
Possiamo rivelarle direttamente?

Antenne gravitazionali: i rivelatori Interferometrici



Antenne gravitazionali: i rivelatori Interferometrici

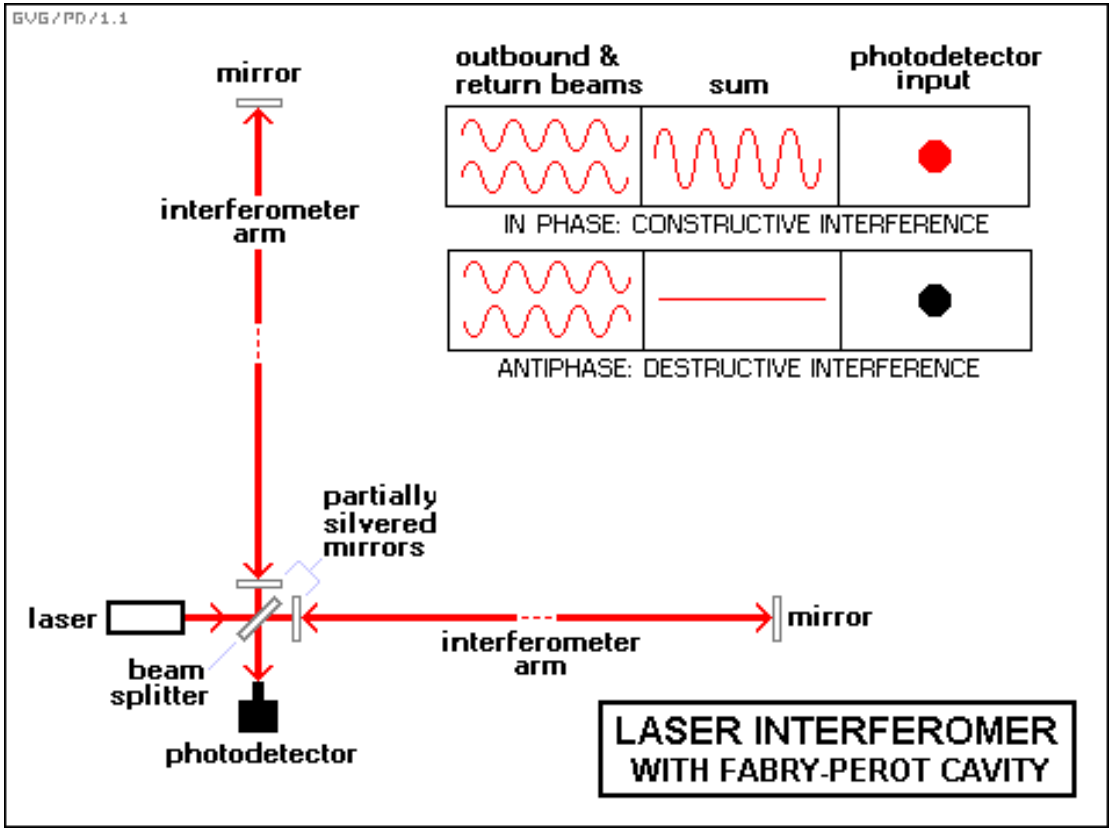
Un'onda gravitazionale fa variare la distanza tra gli specchi: quindi i raggi laser percorrono un cammino di lunghezza diversa rispetto a quando l'onda non c'è, e i segnali luminosi si "sfasano"



Antenne gravitazionali: i rivelatori Interferometrici

Un'onda gravitazionale fa variare la distanza tra gli specchi: quindi i raggi laser percorrono un cammino di lunghezza diversa rispetto a quando l'onda non c'è, e i segnali luminosi si "sfasano"

Misurando come variano le frange di interferenza si può dire se è passata un'onda gravitazionale



Esperimento italo-francese Virgo

Cascina, Pisa

Prime antenne gravitazionali: le barre risonanti

Joseph Weber con la prima antenna risonante

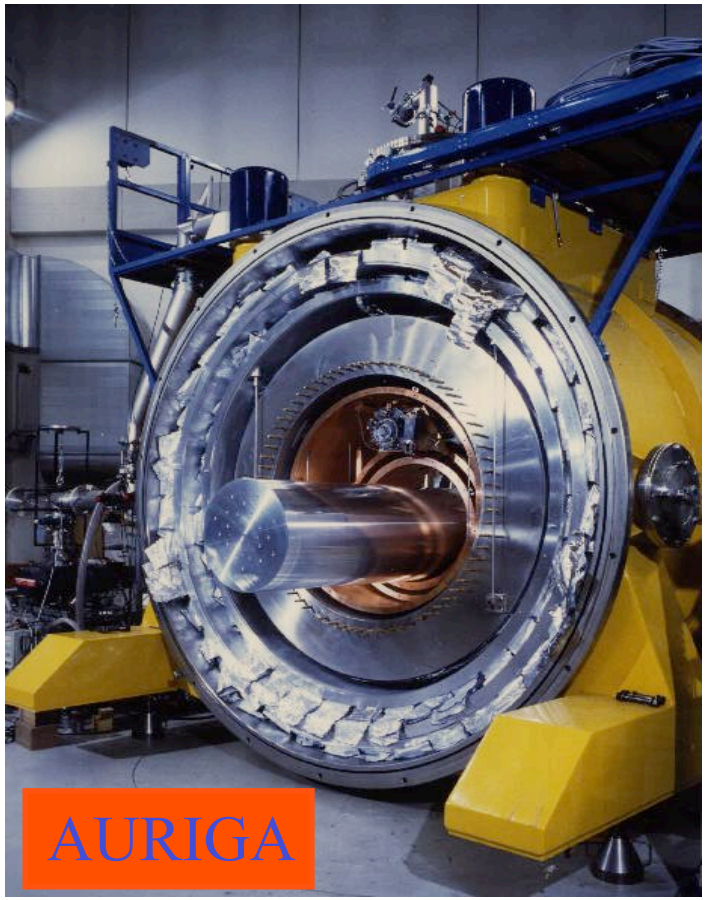
JOSEPH WEBER WITH
GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR

Prime antenne gravitazionali: le barre risonanti

Oggi:

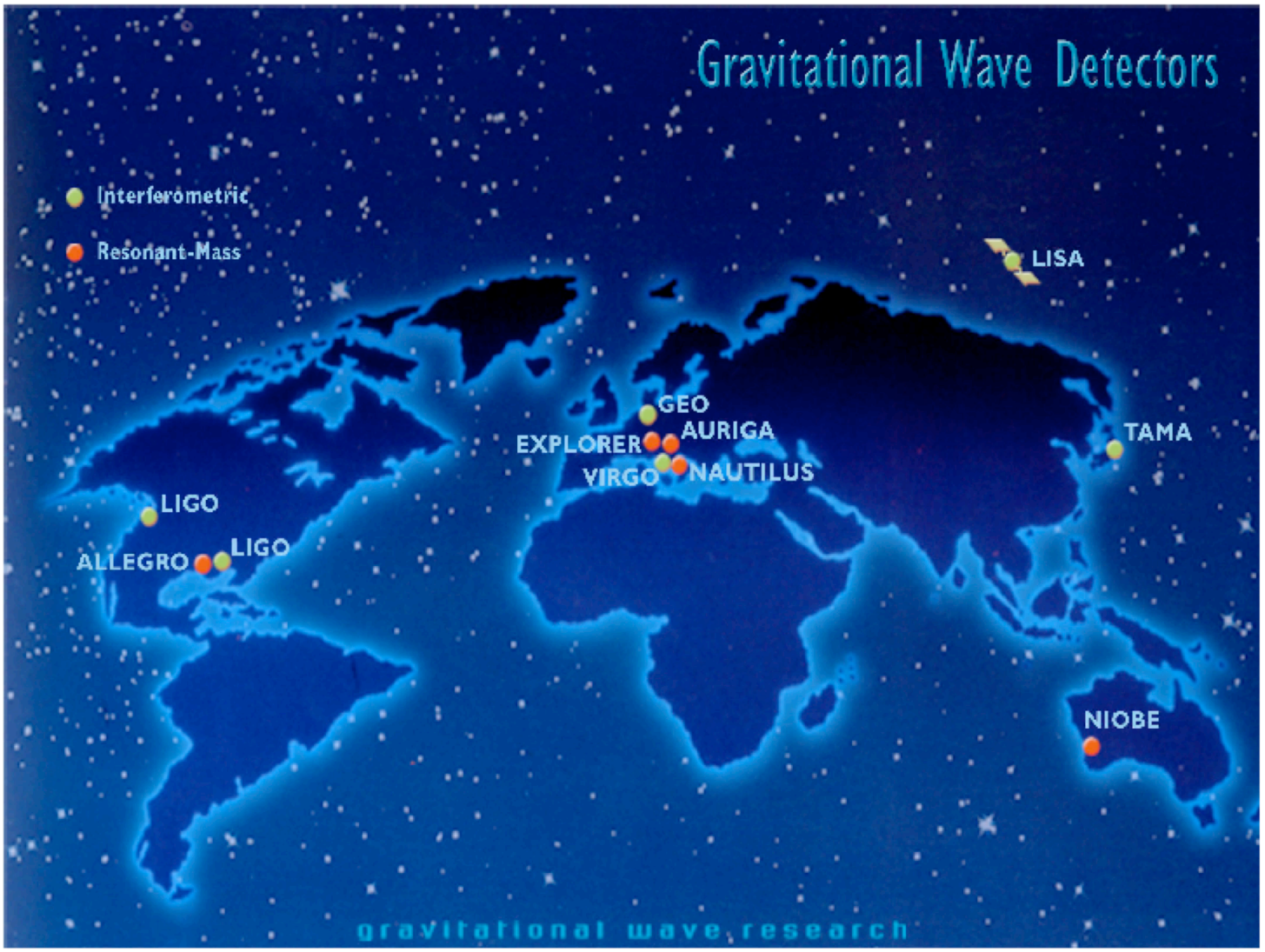
- antenne *criogeniche*:

  - ✓ ALLEGRO (US),
  - ✓ AURIGA (Italia),
  - ✓ EXPLORER (CERN),
  - ✓ NAUTILUS (Italia),
  - ✓ NIOBE (Australia)



- Hanno banda stretta e sono meno sensibili delle antenne interferometriche
- utili comunque per cercare segnali in coincidenza

Nel mondo esiste una rete di antenne gravitazionali



Cosa vogliamo rivelare con le antenne gravitazionali

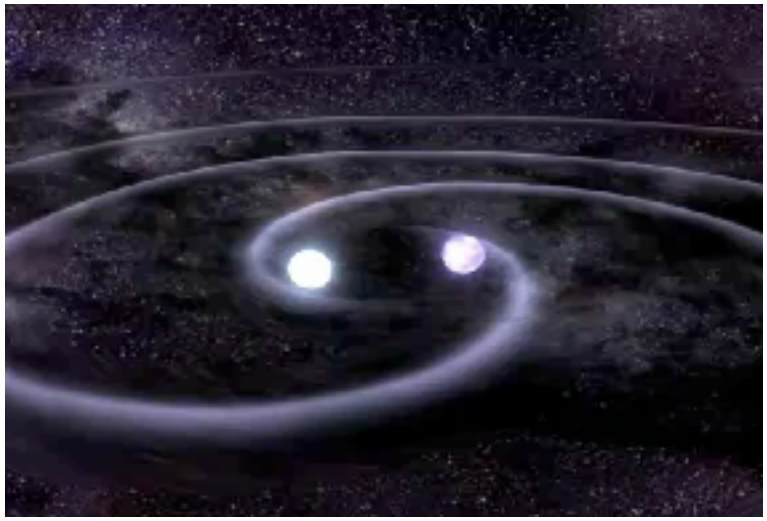
Coalescenza di sistemi binari formati
da stelle e buchi neri

a causa della perdita di energia per emissione di onde gravitazionali:

http://www.nasa.gov/mov/116648main_CollidingWdwarves.mov

Cosa vogliamo rivelare con le antenne gravitazionali

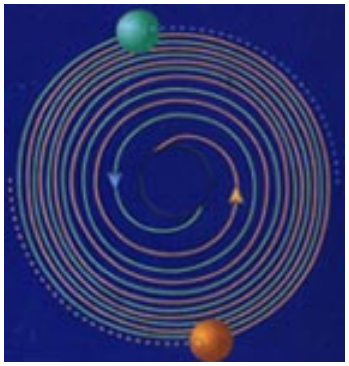
Coalescenza di sistemi binari formati da stelle e buchi neri



http://www.nasa.gov/mov/116648main_CollidingWdwarves.mov

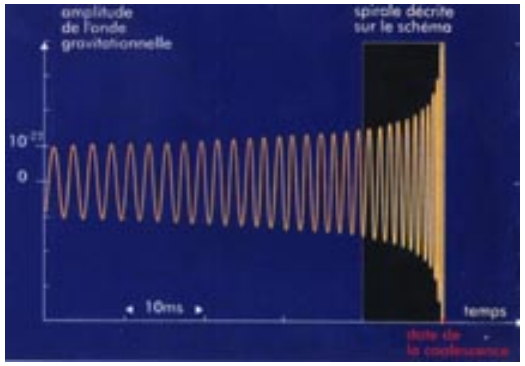
a causa della perdita di energia per emissione di onde gravitazionali:

Il raggio dell'orbita diminuisce



la velocità orbitale aumenta

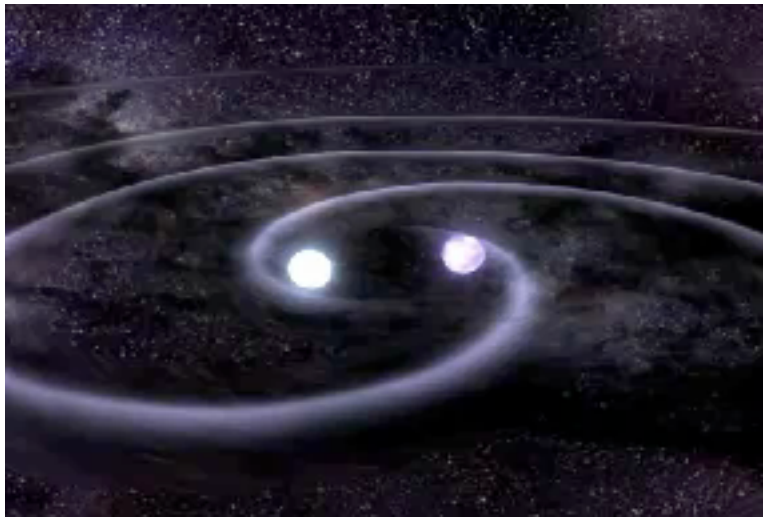
L'ampiezza del segnale e la frequenza aumentano



chirp

Cosa vogliamo rivelare con le antenne gravitazionali

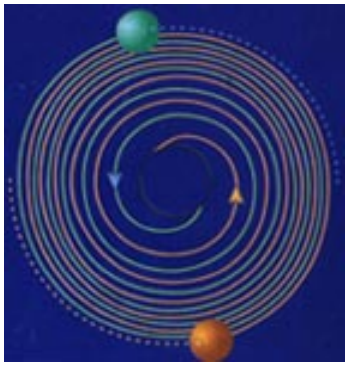
Coalescenza di sistemi binari formati da stelle e buchi neri



http://www.nasa.gov/mov/116648main_CollidingWdwarves.mov

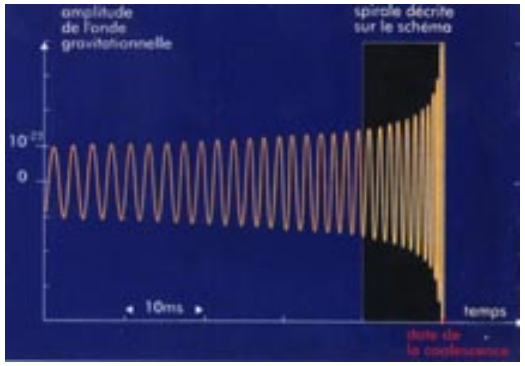
a causa della perdita di energia per emissione di onde gravitazionali:

Il raggio dell'orbita diminuisce



la velocità orbitale aumenta

L'ampiezza del segnale e la frequenza aumentano



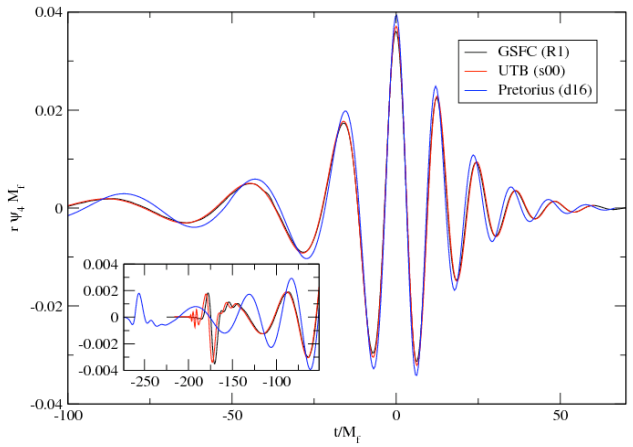
chirp

Conoscere le forme d'onda emesse è importante per poterle rivelare

Le forme d'onda si ricavano risolvendo le equazioni di Einstein e dell'idrodinamica sui calcolatori supperpotenti

Conoscere le forme d'onda emesse è importante per poterle rivelare

buco nero- buco nero



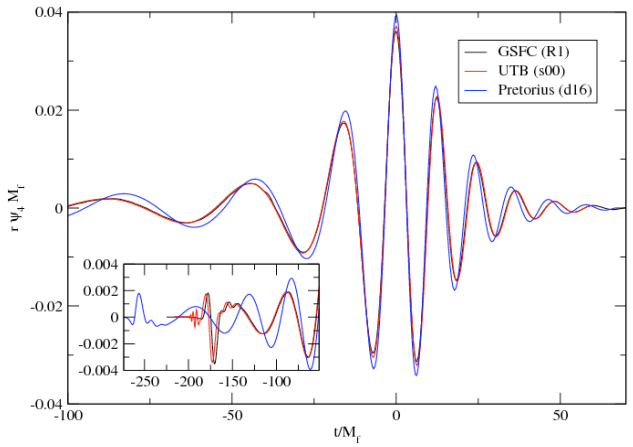
Baker J.G., Campanelli M., Pretorius F. and Zlochower Y., Class. Quant. Grav., 24, S25 (2007)

Le forme d'onda si ricavano risolvendo le equazioni di Einstein e dell'idrodinamica sui calcolatori supperpotenti

Conoscere le forme d'onda emesse è importante per poterle rivelare

Le forme d'onda si ricavano risolvendo le equazioni di Einstein e dell'idrodinamica sui calcolatori supperpotenti

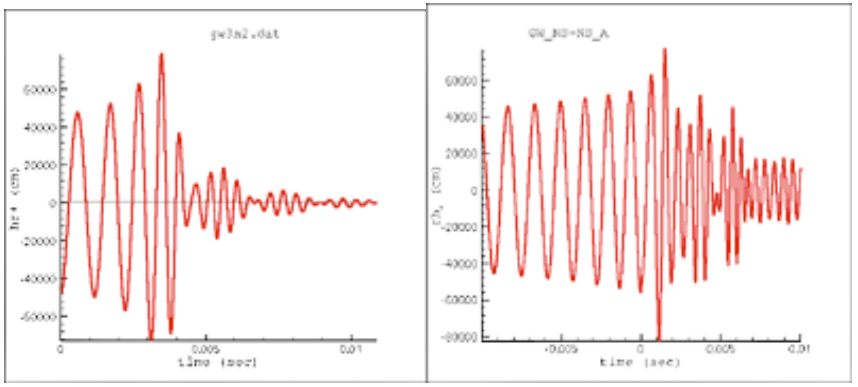
buco nero- buco nero



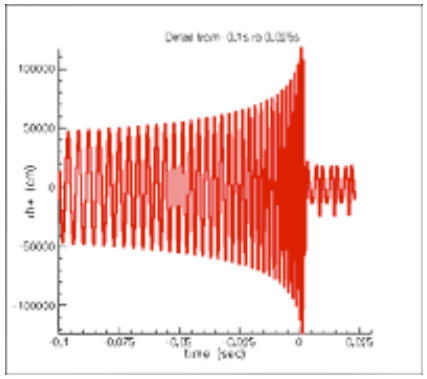
Baker J.G., Campanelli M., Pretorius F. and Zlochower Y., Class. Quant. Grav., 24, S25 (2007)

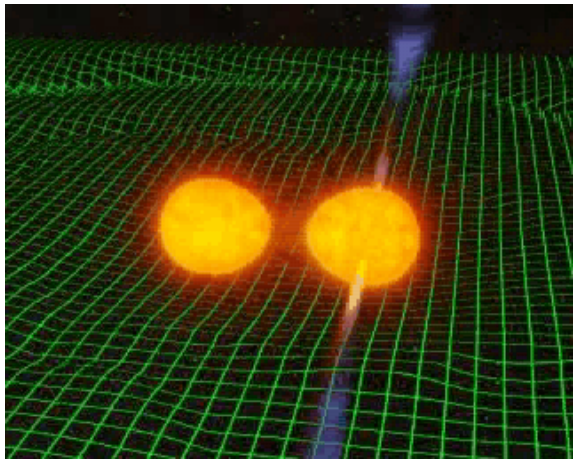
Dalla forma d'onda possiamo capire quale sorgente ha emesso il segnale

stella di neutroni - stella di neutroni



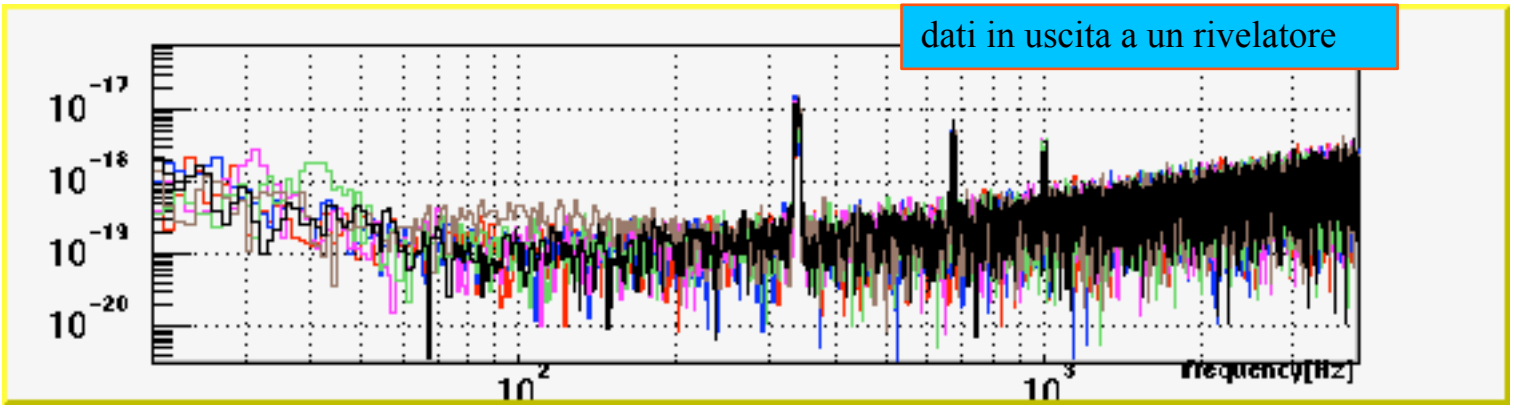
buco nero - stella di neutroni





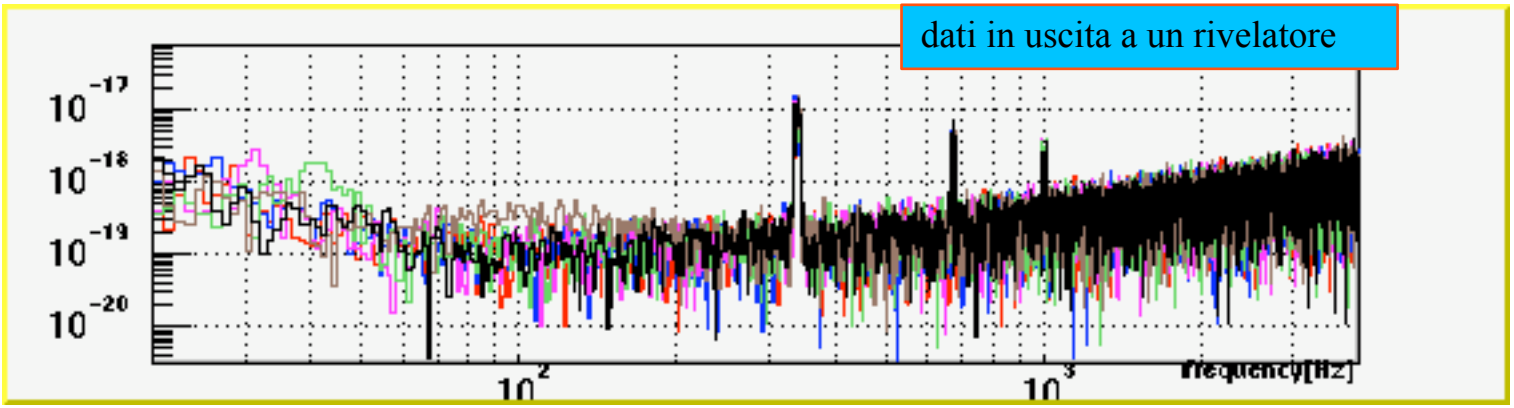
http://astrogravs.nasa.gov/docs/catalog.html#nsns

I segnali gravitazionali sono piccolissimi e sono immersi nel rumore



Per rivelare un segnale gravitazionale sommerso dal rumore del rivelatore sono necessarie sofisticate tecniche di analisi dati

I segnali gravitazionali sono piccolissimi e sono immersi nel rumore



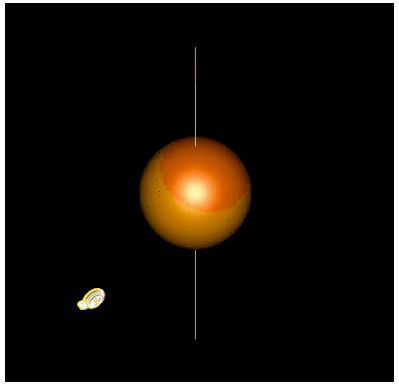
Per rivelare un segnale gravitazionale sommerso dal rumore del rivelatore sono necessarie sofisticate tecniche di analisi dati

Per costruire i filtri numerici che consentono di estrarre i segnali dal rumore, è indispensabile conoscere le forme d'onda.
Quindi gli studi teorici e le simulazioni sono fondamentali

Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri

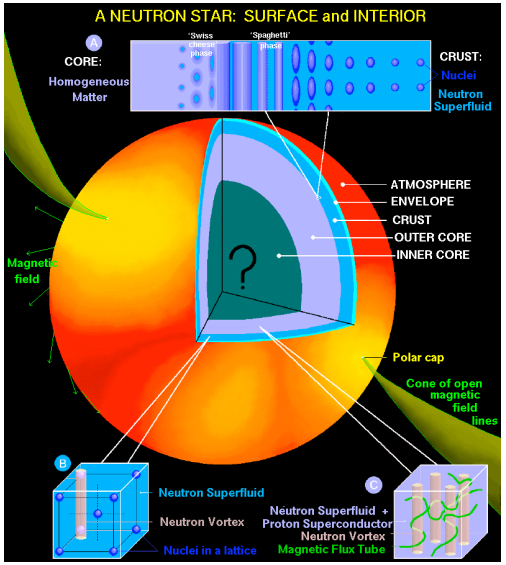
stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri

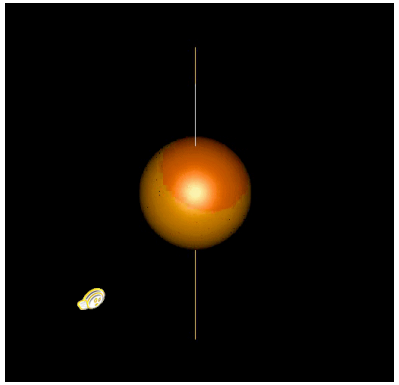


stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

oscillazioni di stelle di neutroni: le frequenze dipendono dal tipo di materia nel nucleo. Se oscilla un buco nero, dalle frequenze risaliamo alla massa e alla velocità angolare

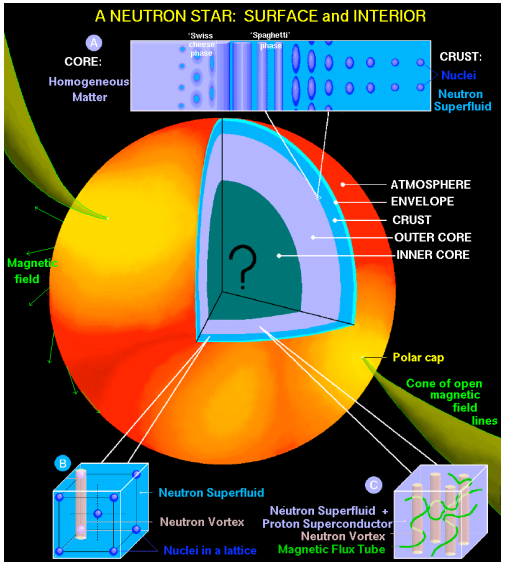


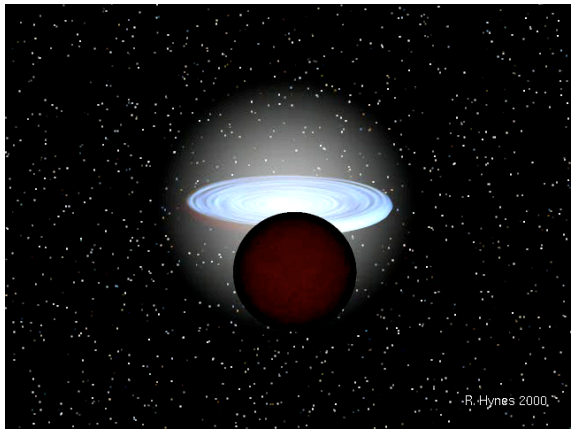
Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri



stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

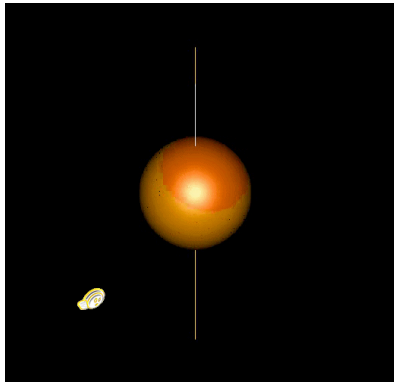
oscillazioni di stelle di neutroni: le frequenze dipendono dal tipo di materia nel nucleo. Se oscilla un buco nero, dalle frequenze risaliamo alla massa e alla velocità angolare





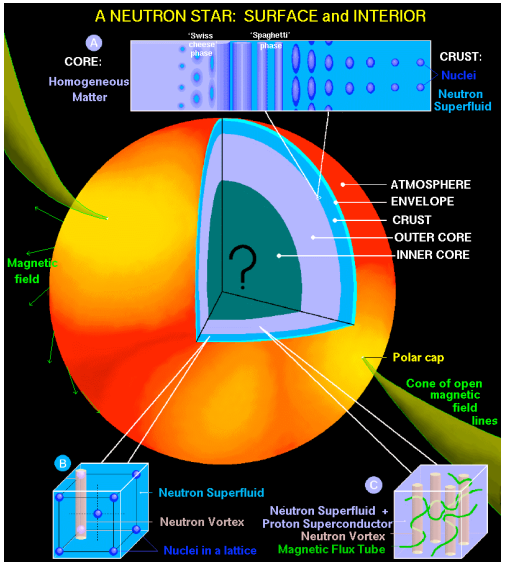
accrezione di stelle di neutroni da stelle compagne LMXB (low Mass X-ray Binaries)

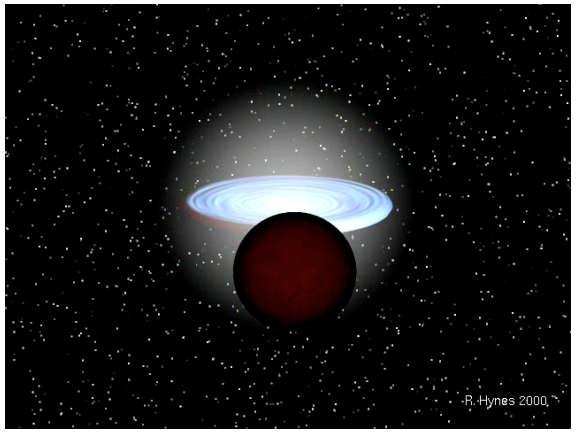
Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri



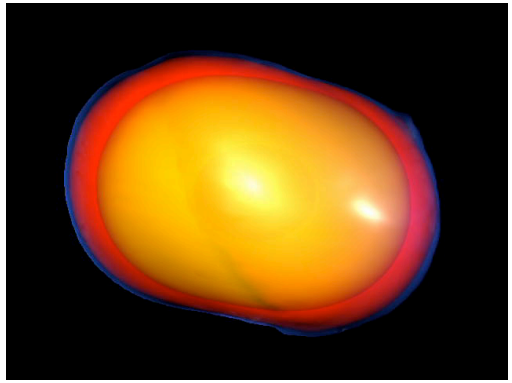
stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

oscillazioni di stelle di neutroni: le frequenze dipendono dal tipo di materia nel nucleo. Se oscilla un buco nero, dalle frequenze risaliamo alla massa e alla velocità angolare



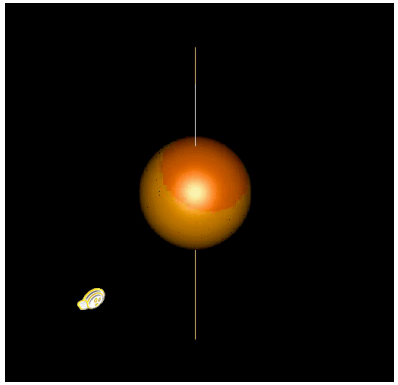


accrezione di stelle di neutroni da stelle compagne LMXB (low Mass X-ray Binaries)



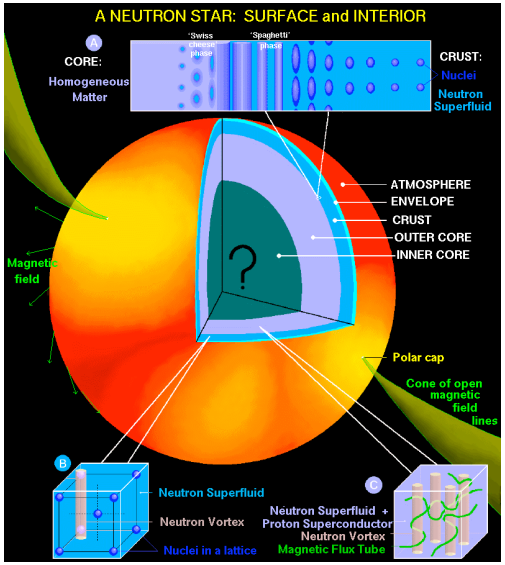
instabilità
di stelle di neutroni

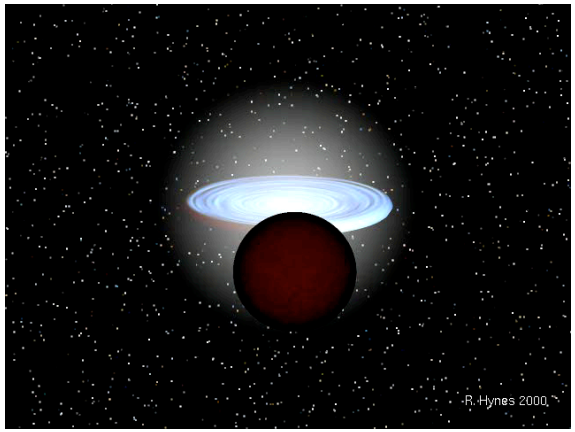
Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri



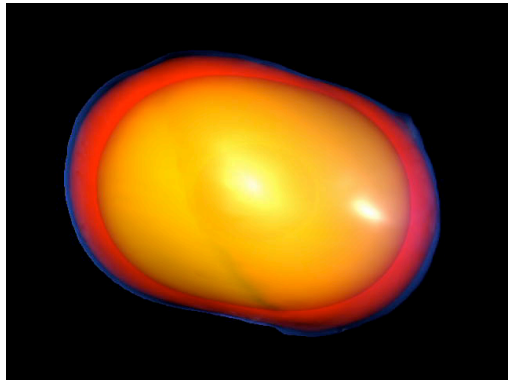
stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

oscillazioni di stelle di neutroni: le frequenze dipendono dal tipo di materia nel nucleo. Se oscilla un buco nero, dalle frequenze risaliamo alla massa e alla velocità angolare





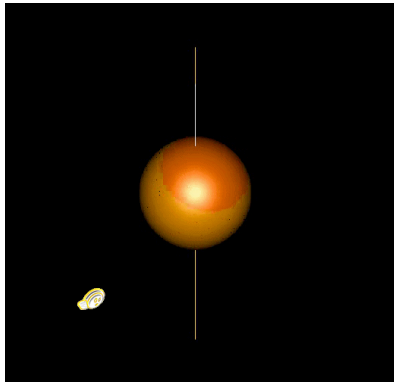
accrezione di stelle di neutroni da stelle compagne LMXB (low Mass X-ray Binaries)



instabilità
di stelle di neutroni

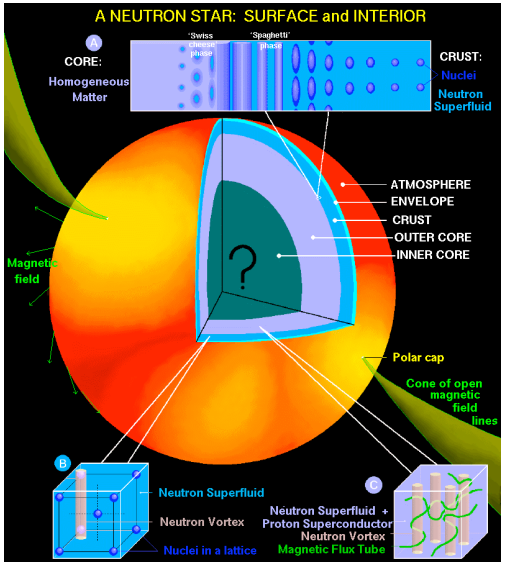
Collasso gravitazionale che segue all'esplosione di una Supernova

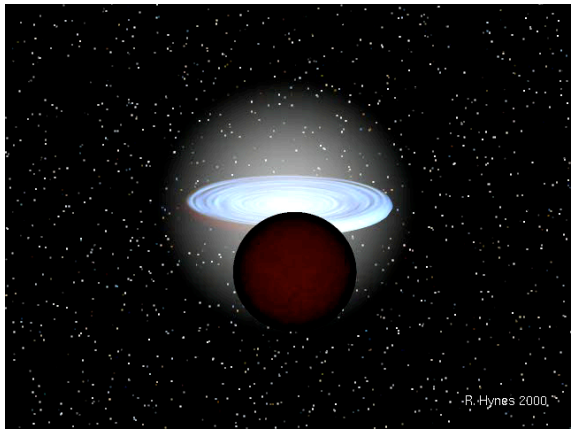
Altre sorgenti che si vogliono rivelare con gli interferometri terrestri



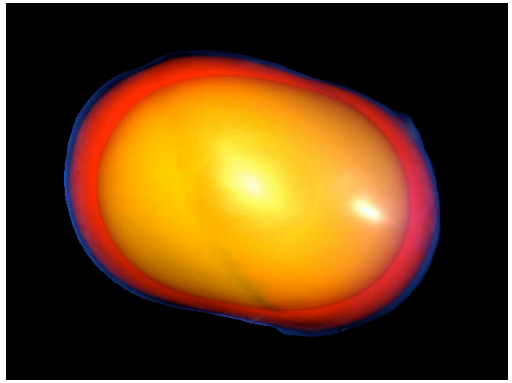
stelle di neutroni rotanti: quanto emettono dipende dal grado di asimmetria

oscillazioni di stelle di neutroni: le frequenze dipendono dal tipo di materia nel nucleo. Se oscilla un buco nero, dalle frequenze risaliamo alla massa e alla velocità angolare





accrezione di stelle di neutroni da stelle compagne LMXB (low Mass X-ray Binaries)



instabilità
di stelle di neutroni

Collasso gravitazionale che segue all'esplosione di una Supernova

con le antenne interferometriche si rivelano i segnali
"ad alta frequenza" $10\ \text{Hz} < \nu < 2\text{-}3\ \text{kHz}$

quelli a bassa frequenza non possono essere rivelati sulla Terra perché i rumori a bassa frequenza (i rumori ambientali e atmosferici (il vento, etc) li maschererebbero completamente

Occorre andare nello spazio

IL FUTURO: LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

progetto ESA-NASA
lancio previsto **~2016** (?)
3 spacecraft in orbita eliocetrica **20°** dietro la Terra
struttura a triangolo equilatero **$L=5\times10^{6}$ km** : sensibile a **$\sim10^{-4}$ Hz < v < 1 Hz**

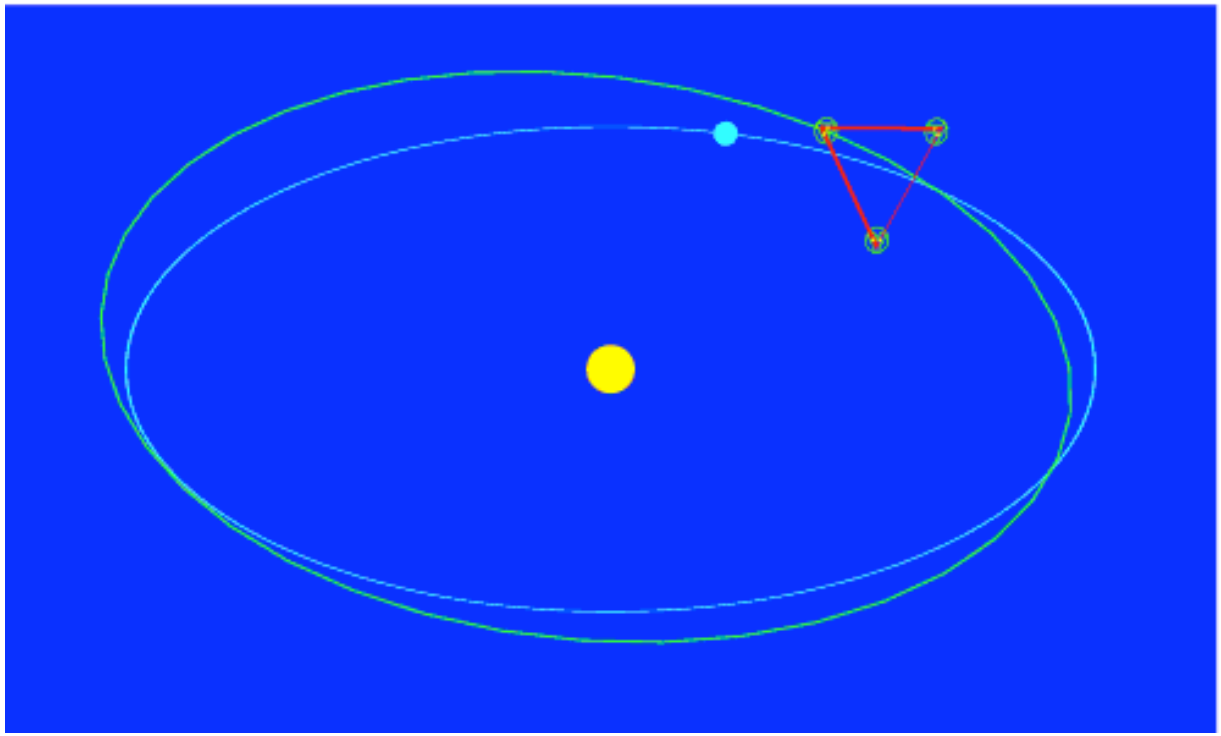
Sfruttando la modulazione orbitale del segnale, si può risalire alla posizione della sorgente nel cielo

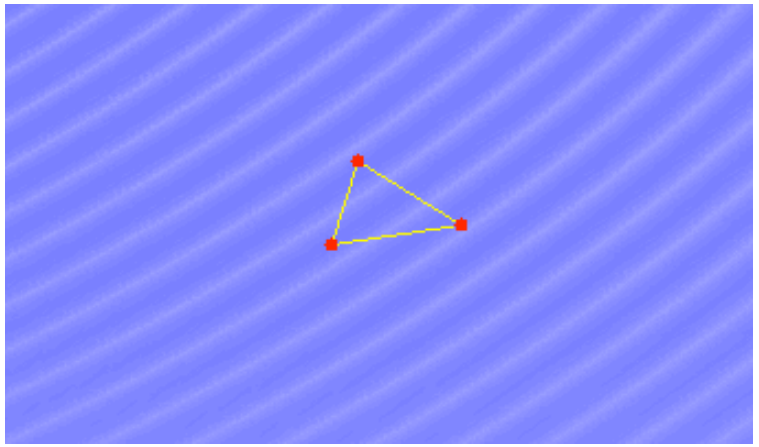
nello spazio c'è meno rumore!

IL FUTURO: LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

progetto ESA-NASA
lancio previsto **~2016** (?)
3 spacecraft in orbita eliocetrica **20°** dietro la Terra
struttura a triangolo equilatero **L=5x10^6 km** : sensibile a **~10^{-4} Hz < v < 1 Hz**

Sfruttando la modulazione orbitale del segnale, si può risalire alla posizione della sorgente nel cielo



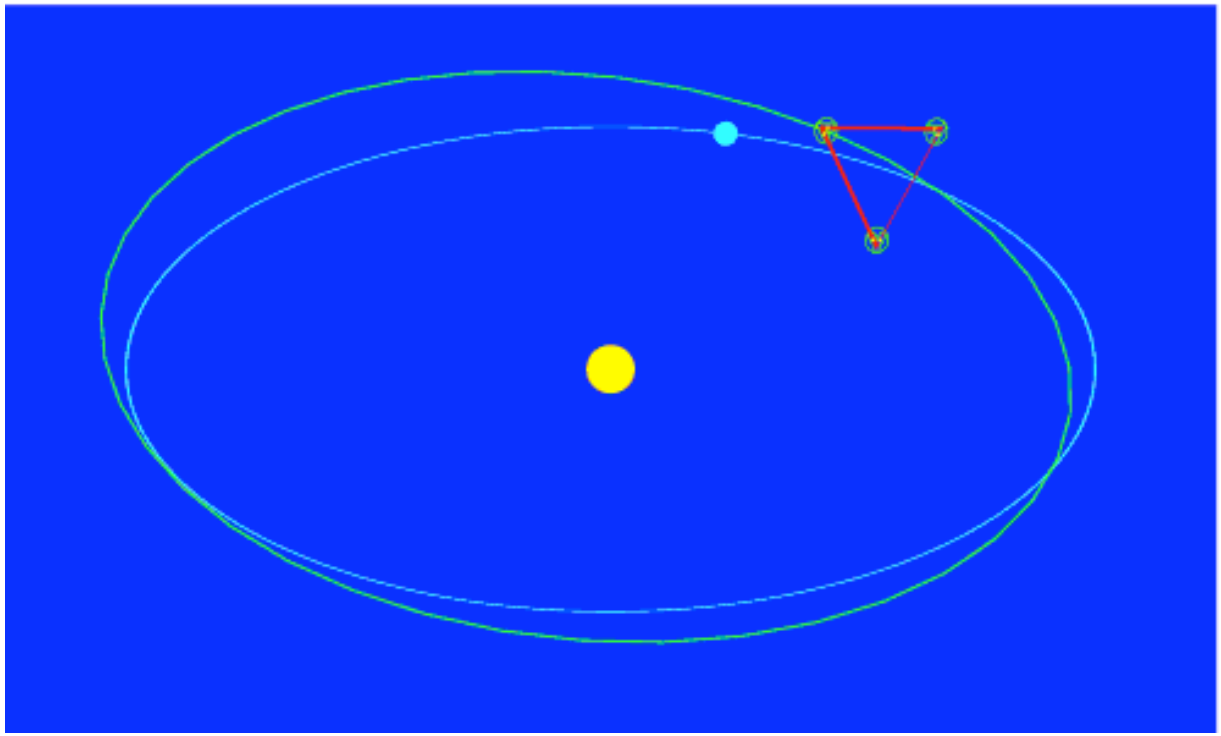


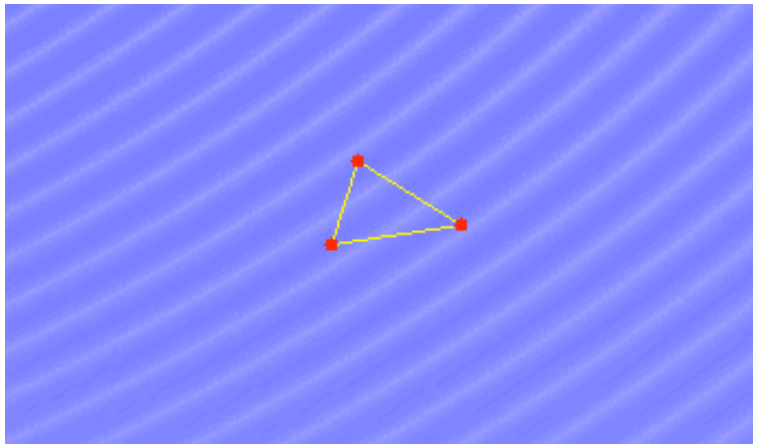
nello spazio c'è meno rumore!

IL FUTURO: LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

progetto ESA-NASA
lancio previsto **~2016** (?)
3 spacecraft in orbita eliocetrica **20°** dietro la Terra
struttura a triangolo equilatero **L=5x10^6 km** : sensibile a **~10^{-4} Hz < v < 1 Hz**

Sfruttando la modulazione orbitale del segnale, si può risalire alla posizione della sorgente nel cielo





nello spazio c'è meno rumore!

Quali segnali si vogliono rivelare con LISA

stelle e buchi neri che
interagiscono con
(o cadono nel) buco nero
la centro della Galassia

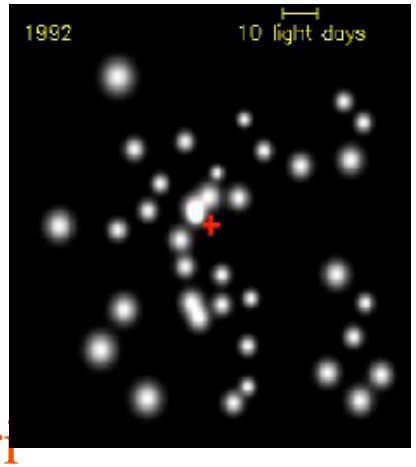
M_{BH}= 3,7 milioni di masse solari

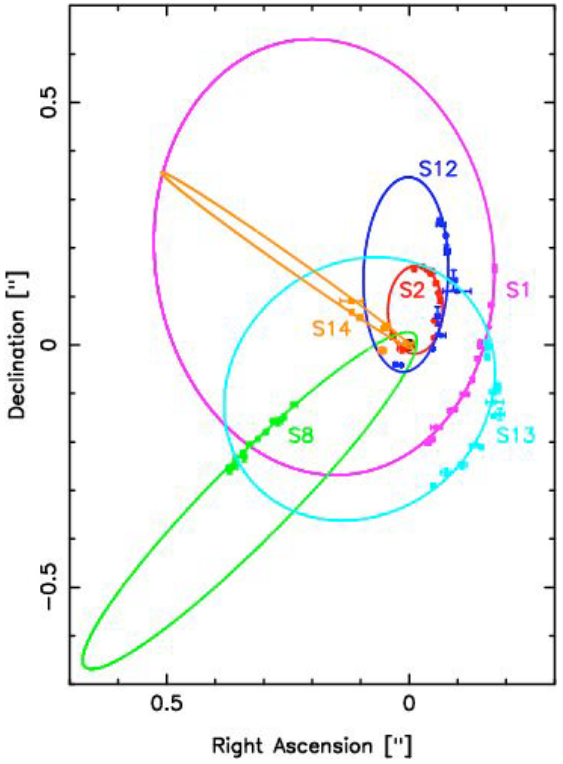
-sistemi binari formati da stelle di neutroni e nane bianche
con periodi orbitali < 10 minuti

- coalescenza di buchi neri fino a distanze di 3 Gpc

Quali segnali si vogliono rivelare con LISA

stelle e buchi neri che
interagiscono con
(o cadono nel) buco nero
la centro della Galassia





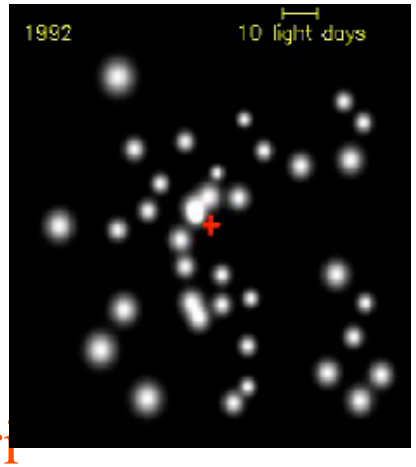
M_{BH}= 3,7 milioni di masse solari

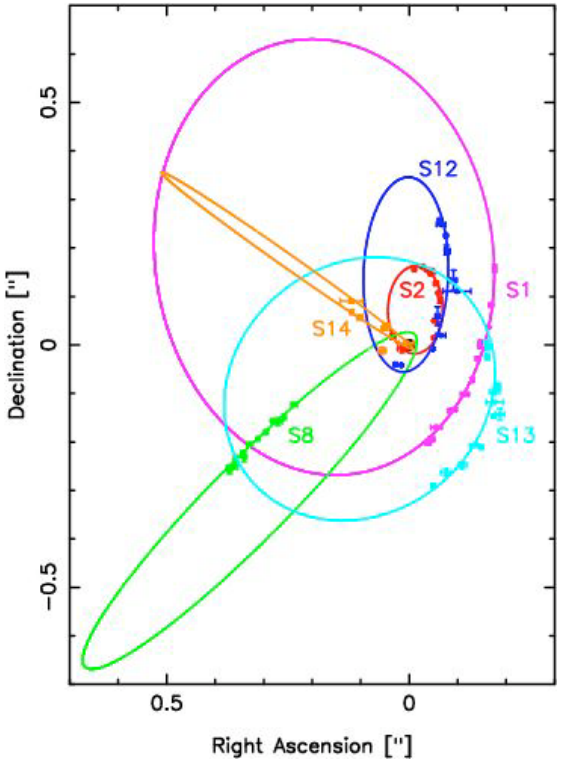
-sistemi binari formati da stelle di neutroni e nane bianche
con periodi orbitali < 10 minuti

- coalescenza di buchi neri fino a distanze di 3 Gpc

Quali segnali si vogliono rivelare con LISA

stelle e buchi neri che
interagiscono con
(o cadono nel) buco nero
la centro della Galassia





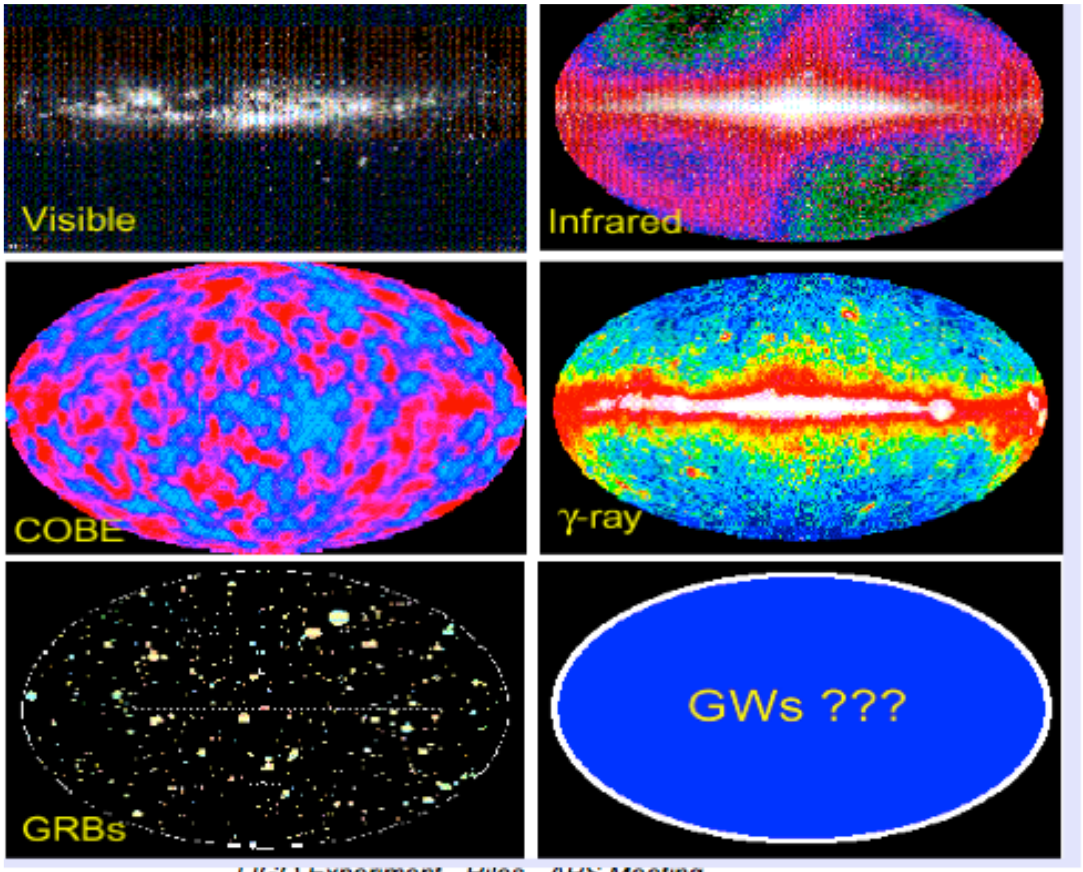
M_{BH}= 3,7 milioni di masse solari

-sistemi binari formati da stelle di neutroni e nane bianche
con periodi orbitali < 10 minuti

- coalescenza di buchi neri fino a distanze di 3 Gpc

deve esistere un fondo di onde gravitazionali dovuto sia alle sorgenti astrofisiche che si sono formate durante la storia dell'universo, sia a quello che è accaduto durante le prime fasi della vita dell'universo subito dopo il **Big Bang**

Mappa del cielo a varie lunghezze d'onda

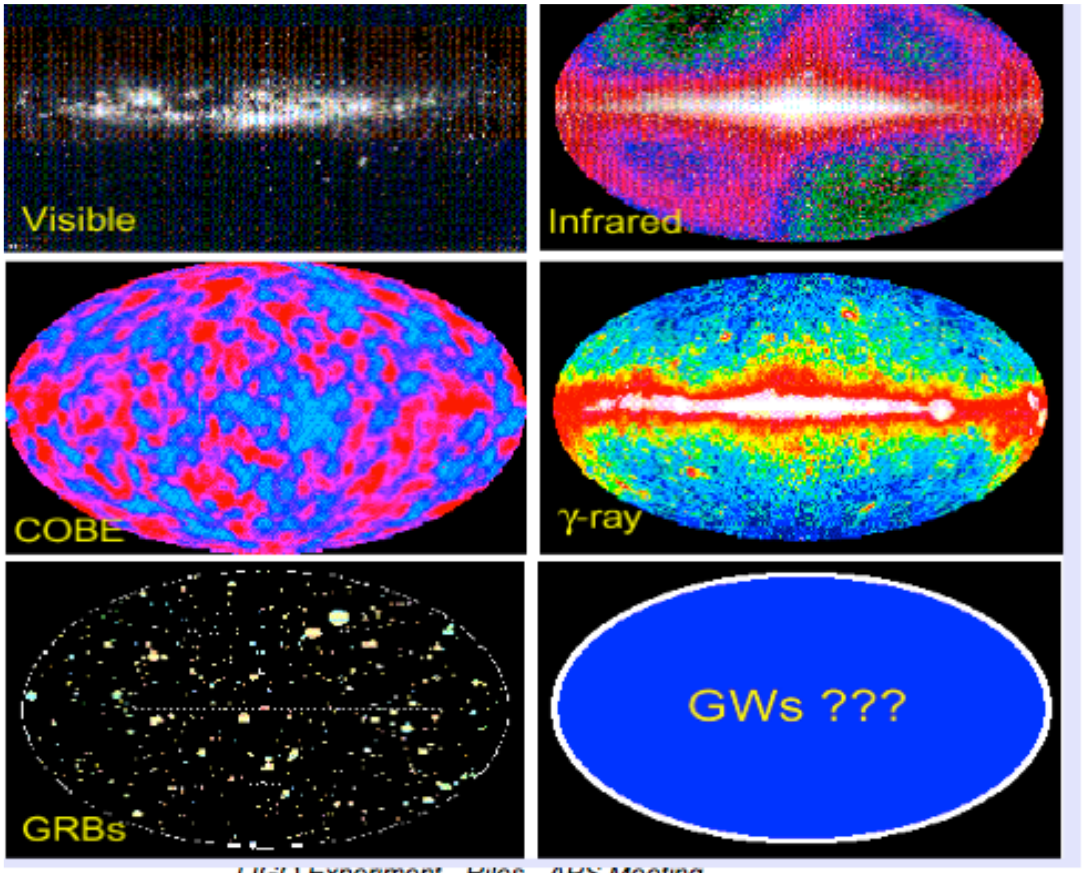


LIGO Experiment - Riles - APS Meeting

deve esistere un fondo di onde gravitazionali dovuto sia alle sorgenti astrofisiche che si sono formate durante la storia dell'universo, sia a quello che è accaduto durante le prime fasi della vita dell'universo subito dopo il **Big Bang**

le onde gravitazionali interagiscono con la materia molto meno delle onde elettromagnetiche

Mappa del cielo a varie lunghezze d'onda



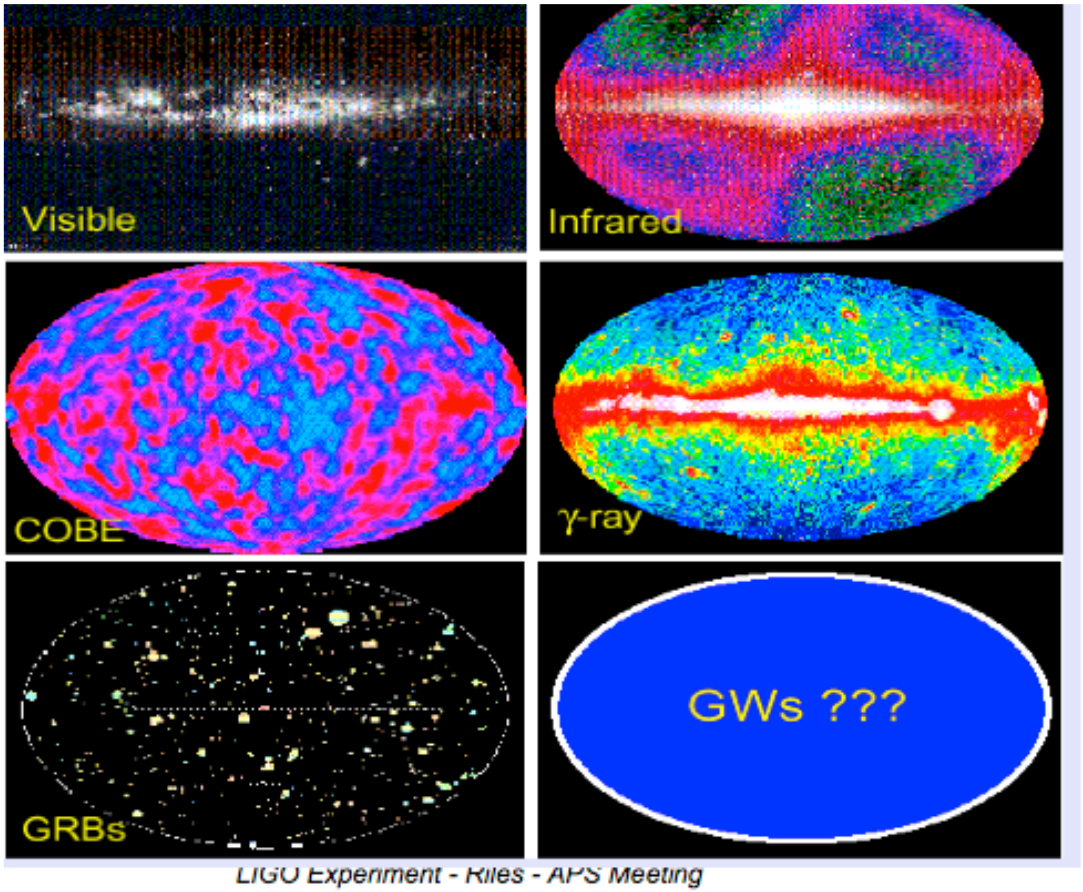
LIGO Experiment - Riles - APS Meeting

deve esistere un fondo di onde gravitazionali dovuto sia alle sorgenti astrofisiche che si sono formate durante la storia dell'universo, sia a quello che è accaduto durante le prime fasi della vita dell'universo subito dopo il **Big Bang**

le onde gravitazionali interagiscono con la materia molto meno delle onde elettromagnetiche

fondo cosmico di microonde: la foto dell'universo si riferisce a ~ 300.000 anni dopo il Big Bang, quando la materia si disaccoppia dalla radiazione

Mappa del cielo a varie lunghezze d'onda



LIGO Experiment - Riles - APS Meeting

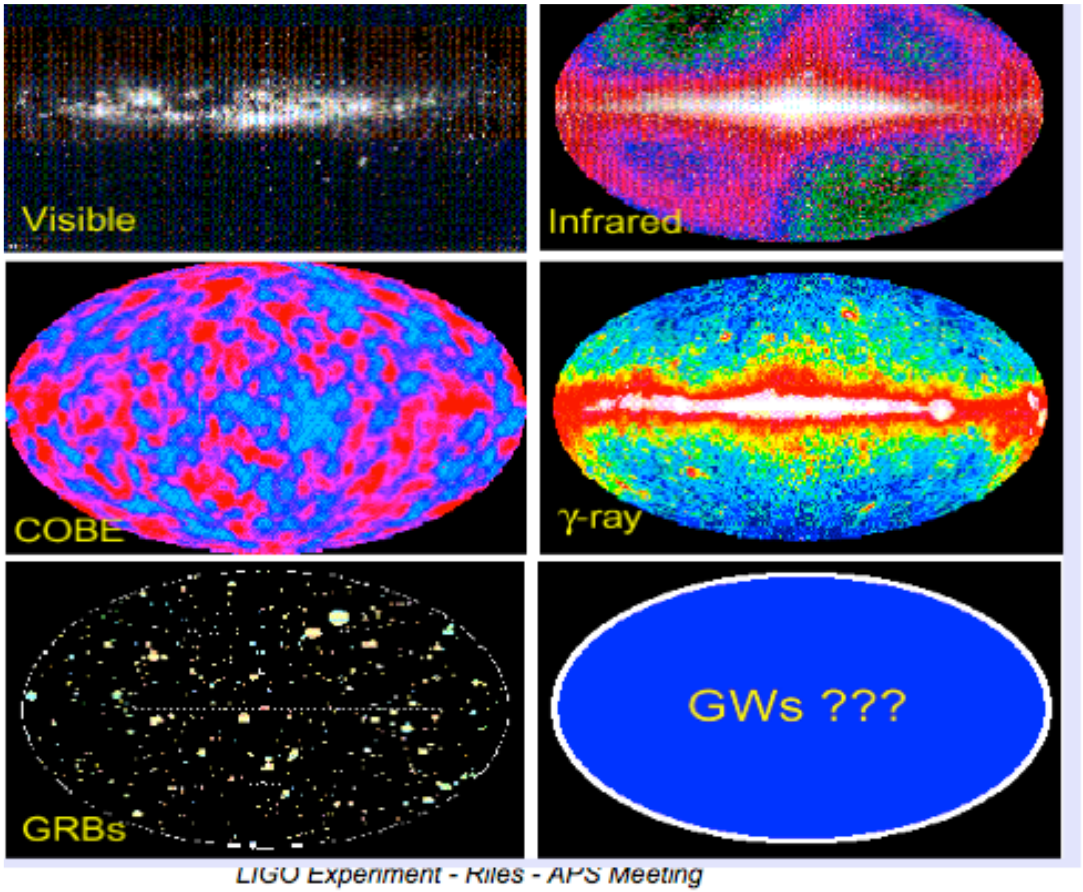
deve esistere un fondo di onde gravitazionali dovuto sia alle sorgenti astrofisiche che si sono formate durante la storia dell'universo, sia a quello che è accaduto durante le prime fasi della vita dell'universo subito dopo il **Big Bang**

le onde gravitazionali interagiscono con la materia molto meno delle onde elettromagnetiche

fondo cosmico di microonde: la foto dell'universo si riferisce a ~ 300.000 anni dopo il Big Bang, quando la materia si disaccoppia dalla radiazione

il fondo cosmico di onde gravitazionali fornirebbe una fotografia dello stato dell'Universo ~ 10^{-43} s dopo Big Bang

Mappa del cielo a varie lunghezze d'onda



LIGO Experiment - Riles - APS Meeting

Molte buone ragioni per cercare di rivelare le onde gravitazionali

Molte buone ragioni per cercare di rivelare le onde gravitazionali

§ Ci permetteranno di verificare la teoria della Relatività Generale in regime di campo forte

Molte buone ragioni per cercare di rivelare le onde gravitazionali

§ Ci permetteranno di verificare la teoria della Relatività Generale in regime di campo forte

§ Le onde gravitazionali daranno informazioni sull'equazione di stato della materia a densità supranucleari, irraggiungibili in esperimenti in laboratorio, attraverso lo studio delle frequenze di oscillazione ed emissione delle stelle di neutroni

Molte buone ragioni per cercare di rivelare le onde gravitazionali

§ Ci permetteranno di verificare la teoria della Relatività Generale in regime di campo forte

§ Le onde gravitazionali daranno informazioni sull'equazione di stato della materia a densità supranucleari, irraggiungibili in esperimenti in laboratorio, attraverso lo studio delle frequenze di oscillazione ed emissione delle stelle di neutroni

§ La rivelazione del background stocastico di origine cosmologico ci darebbe informazioni sulle fasi iniziali dell'universo primordiale che sono inaccessibili alle osservazioni elettromagnetiche.

Molte buone ragioni per cercare di rivelare le onde gravitazionali

§ Ci permetteranno di verificare la teoria della Relatività Generale in regime di campo forte

§ Le onde gravitazionali daranno informazioni sull'equazione di stato della materia a densità supranucleari, irraggiungibili in esperimenti in laboratorio, attraverso lo studio delle frequenze di oscillazione ed emissione delle stelle di neutroni

§ La rivelazione del background stocastico di origine cosmologico ci darebbe informazioni sulle fasi iniziali dell'universo primordiale che sono inaccessibili alle osservazioni elettromagnetiche.

§ le onde gravitazionali permetteranno di scoprire sorgenti sconosciute, che sfuggono all'osservazione perché troppo deboli elettromagneticamente, e “illumineranno” regioni dell'universo inaccessibili a ogni altro tipo di osservazione.