

RELATIVITAT I COSMOLOGIA: ÚLTIMS 25 ANYS

**Enric Verdaguer
Universitat de Barcelona**

**XXV ANYS DE TROBADES
CIENTÍFIQUES DE LA MEDITERRÀNIA**
Maó, 3-4 octubre 2009

PLA

1. Breu **història**
2. **Aplicacions** de la relativitat general:
GPS
cosmologia
3. **Proves** de la relativitat general:
desplaçament al roig
avanç del periheli
desviament de la llum
retard en l'eco de radar
precessió de giròscops
ones gravitatòries

PLA

4. **Model cosmològic** concordant:
problema de la constant cosmològica:
coincidència i tuning
5. Termodinàmica de **forats negres**:
problema de l'entropia
paradoxa de la informació

GÈNESI (1887-1922)

1887: ex. **Michelson-Morley**: vel llum indep sri (**rel especial**)

1907: Einstein introdueix el **Principi d'Equivalència** (la idea més feliç de la meva vida) i prediu (**1911**) una **desviació dels raigs de llum** pel Sol de **0.875"**

1915: **Teoria de la Relativitat General** en forma final. Teoria Relativista de la **Gravitació** i també Teoria de l'**Espai-Temps**.

- **Matèria corba l'espaitemps: Equacions d'Einstein**
- **Partícules "lliures"** segueixen **geodèsiques** de l'espaitemps

Proposa tres proves:

- **Avanç en el periheli de mercuri: 43"/segle**
- **Desviació dels raigs de llum pel Sol de 1.75"**
- **Desplaçament al roig freq. llum: $\frac{dfreq}{freq} = \frac{gh}{c^2}$**

GÈNESI (1887-1922)

1916: **Schwarzschild**, solucions equacions d'Einstein amb **simetria esfèrica** (camp gravitatori a l'exterior d'estrelles, planetes, etc i descripció de forats negres)

1919: **Eddington**: expedicions per comprovar **desviació raigs de llum** pel Sol, acord amb Einstein i popularitat.

1922: **Friedmann**: model cosmològic del **Big Bang**: univers en expansió. **Lemaitre (1927)**. **Hubble (1929)** expansió univ.

RENAIXEMENT (1960-1980)

1960: Pound-Rebka, comproven **desplaçament al roig** gravitacional en un **10%**. **Mathews-Sandage** descobreixen **quasar** (font de radioones) lluny **velocitat** recessió **$c/3$** i **compacte** (com Júpiter brilla **100xgalàxia**)

1965: Penzias-Wilson (N1978): **rad còsmica de fons** **3 °K**

1967: Jocelyn Bell-Hewish (N74): descob. **púlsars** (estrelles de neutrons, compactes predites per **Landau** el **1930, N62**)

RENAIXEMENT (1960-1980)

1971: fons radiació raigs-X. Cygnus X-1 (possible Forat Negre de 8 M solars)

1974: Hawking: radiació quàntica de Forats Negres. Termodinàmica de FN.

1978: Walsh: quàsar doble (lent gravitacional)

1980: Hulse-Taylor (N93): 1974 púlsar binari B1913+16. 2 estr de neutrons de 1.4 Ms, període 8 h, evidència radiació gravitacional d'acord amb RG

EINA I TESTS GRAV FORTA (1980-)

1981: Guth: etapa **inflacionària** univers després del Big Bang

1992: Smooth(N06): COBE **anisotropies a la rad còsmica de fons** (J. Mather). Boomerang (2000). WMAP (2002): **1/100.000. Formació d'estructura** còsmica explicada

1999: Supernoves: Perlmutter, evidència **const cosmològica**

- Cosmologia de **precisió**, model concordant
- Aparició **5a força**, 1986 (nous tests principi equivalència, etc)
- Tests de llei **$1/r^2$** a escales submil·limètriques
- Tests **gravetat forta**: ones gravit, cosmol, hor. forats negres
- Teoria **cordes**: gravetat teoria efectiva, dimensions extremes grans i petites, gravetat modificada, **Branes**, nous camps.

GRAVITACIÓ NEWTONIANA I POST

Galileo: tots els cossos cauen amb la mateixa acceleració

Newton: força gravitacional entre dos cossos

$$m_i \vec{a} = G \frac{M_g m_g}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Principi d'equivalència feble:

1922 Eötvös: $1/10^{(8)}$

1972 Braginsky: $1/10^{(12)}$

2001 Eöt-Wash: $3/10^{(13)}$

quan relativista?
vel escapament

$$\epsilon \equiv \frac{GM}{Rc^2} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

Gravetat feble: $\epsilon \ll 1$ teor postNew, $\epsilon \sim 10^{-5}$ sistema solar

Gravetat forta: $\epsilon \sim 0.5$ FN, $\epsilon \sim 0.2$ EN, $\epsilon \sim 1$ cosmologia

GRAVITACIÓ REL: NEWTON I EINSTEIN

NEWTON: Sol crea **camp gravitatori**
(força gravitacional)

La força **accelera** la terra i produeix
una el.lipse en el pla equatorial

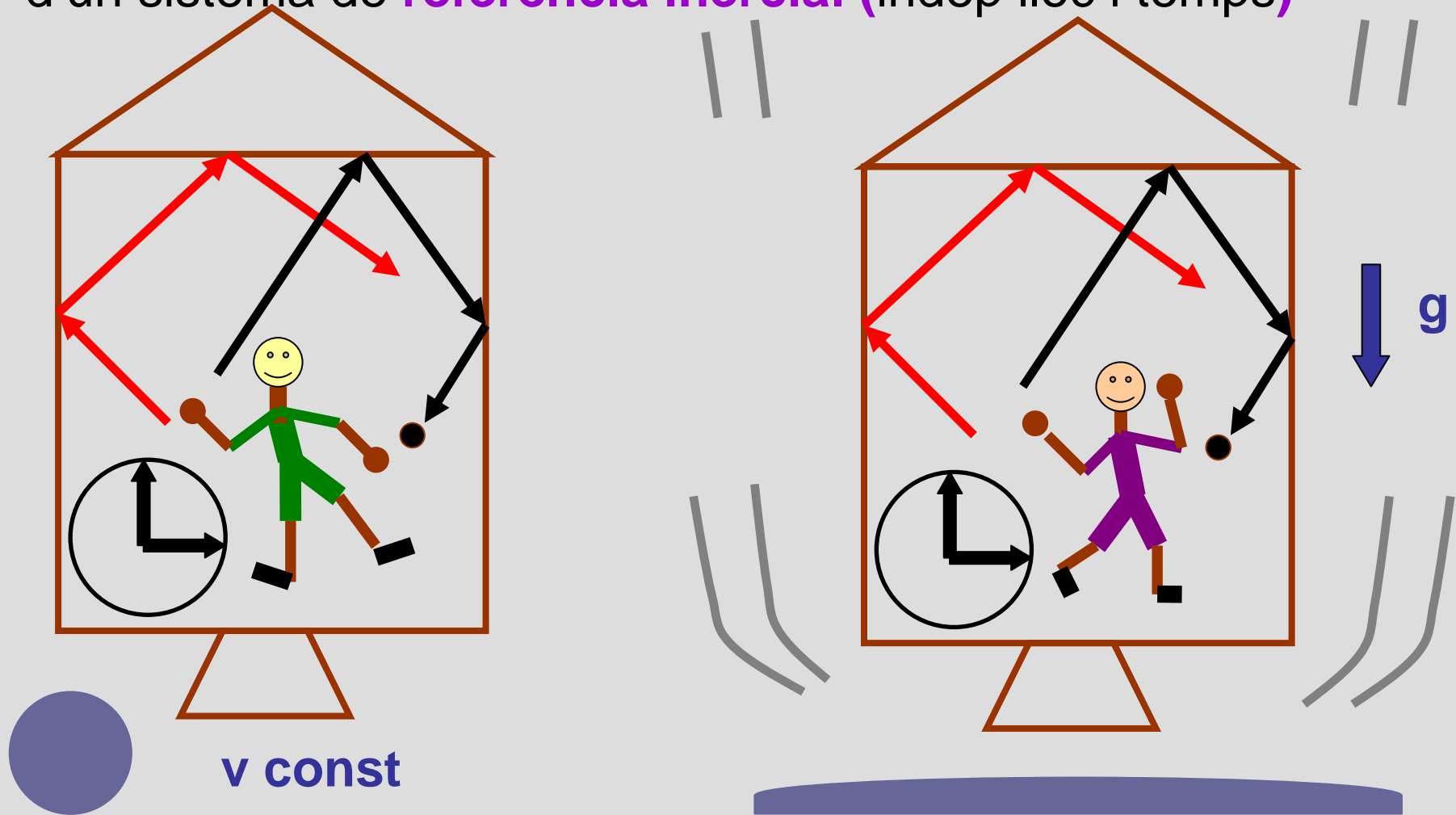
EINSTEIN: Sol **corba l'espai-temps.**
Terra segueix trajectòria **geodèsica**
("recta") en aquesta geometria
(caiguda lliure)

RELOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS

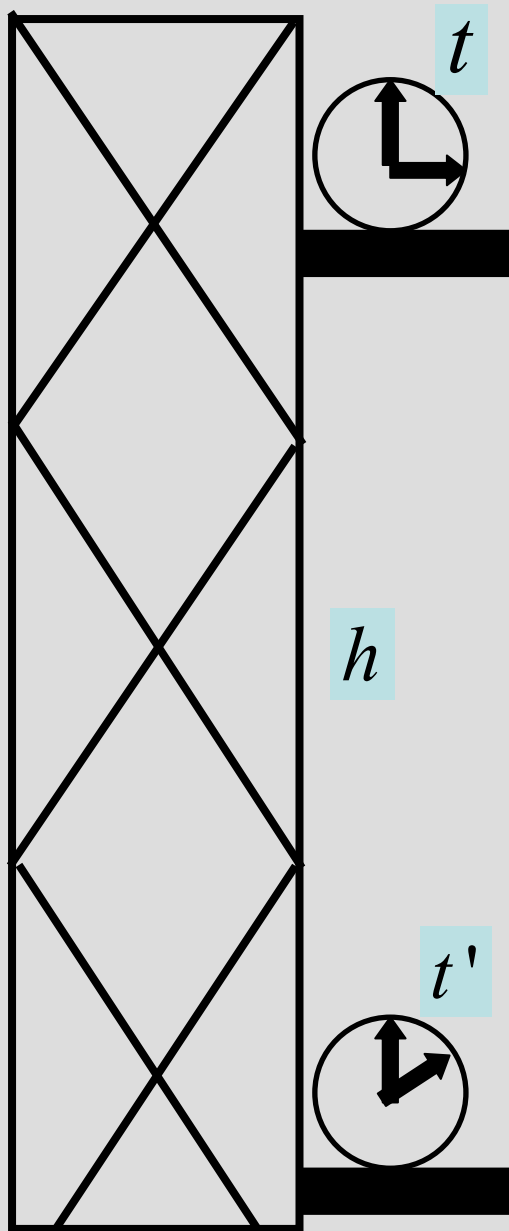


PRINCIPI D'EQUIVALÈNCIA D'EINSTEIN

Einstein (1907): **Localment** un sistema de referència en **caiguda lliure** en un camp gravitatori no es pot distingir d'un sistema de **referència inercial** (indep lloc i temps)



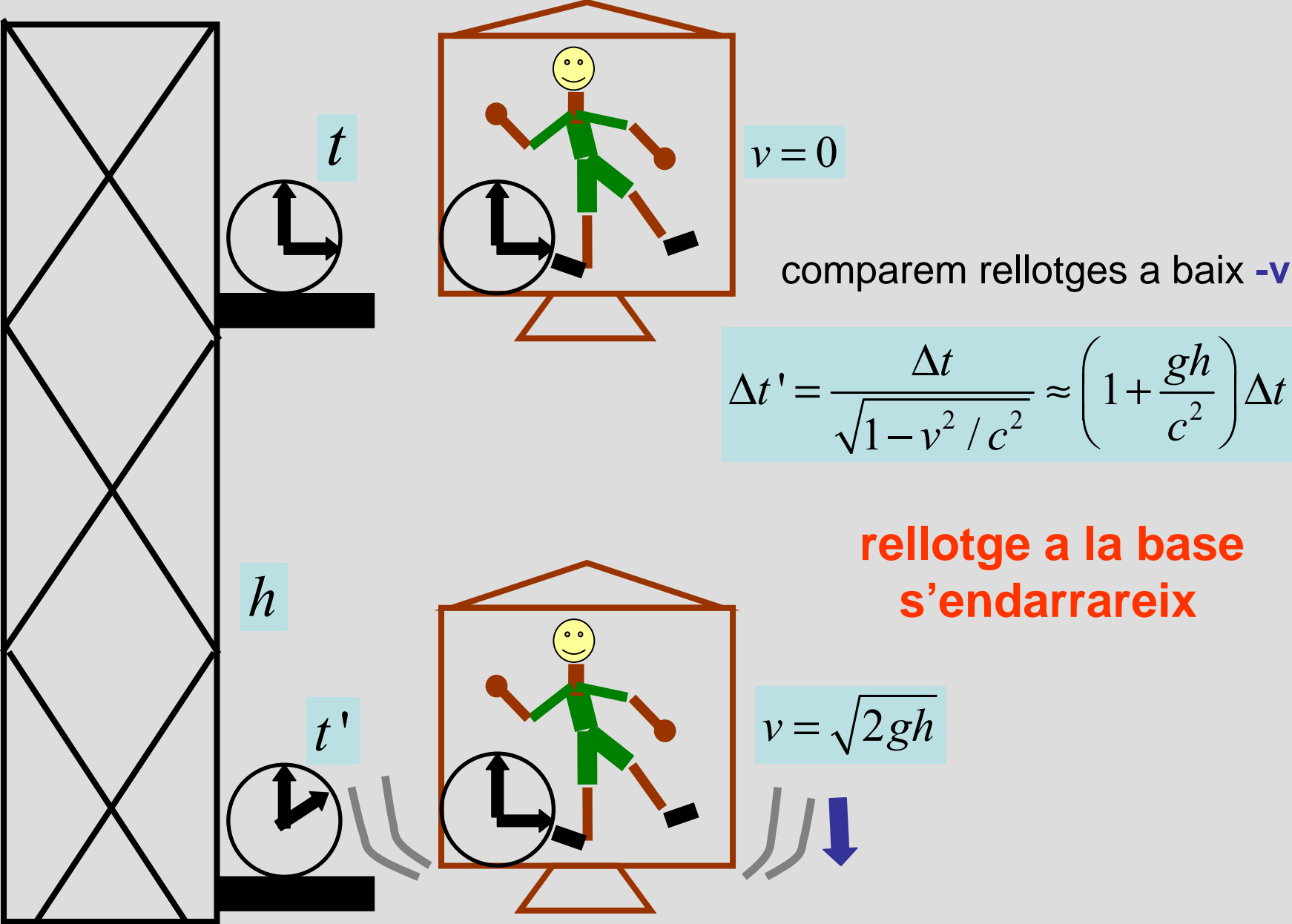
RELLOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS



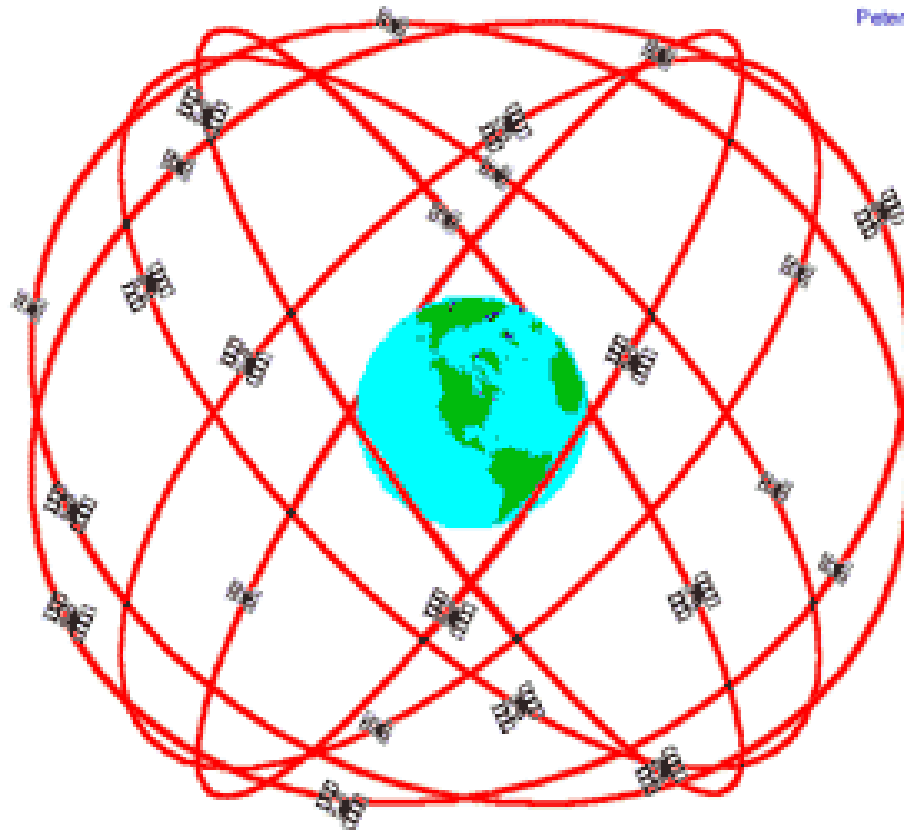
Volem **comparar** els dos rellotges:

El rellotge de dalt, **on el camp gravitatori és més feble**, **s'avança**

RELLOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS



GLOBAL POSITIONING SYSTEM : GPS



GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination
Velocitat satèl.lits 14 000 Km/h



ús general des del **1993**
primers satèl.lits **1978**
US Air Force

GPS: APLICACIÓ DE LA REL GEN

La distància al satèl.lit és = **c x temps triga senyal**
per precisió de **30 m** cal precisió en temps de **10^{-7} s**
(**c = 300 000 Km/s**)

Rellotges satèl.lits avancen **39×10^{-6} s/dia**

Retard per velocitat **$> - 7 \times 10^{-6}$ s/dia**

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Avanç per gravetat **$< 46 \times 10^{-6}$ s/dia**
(però **$g' = g/4$** , equació imprecisa)

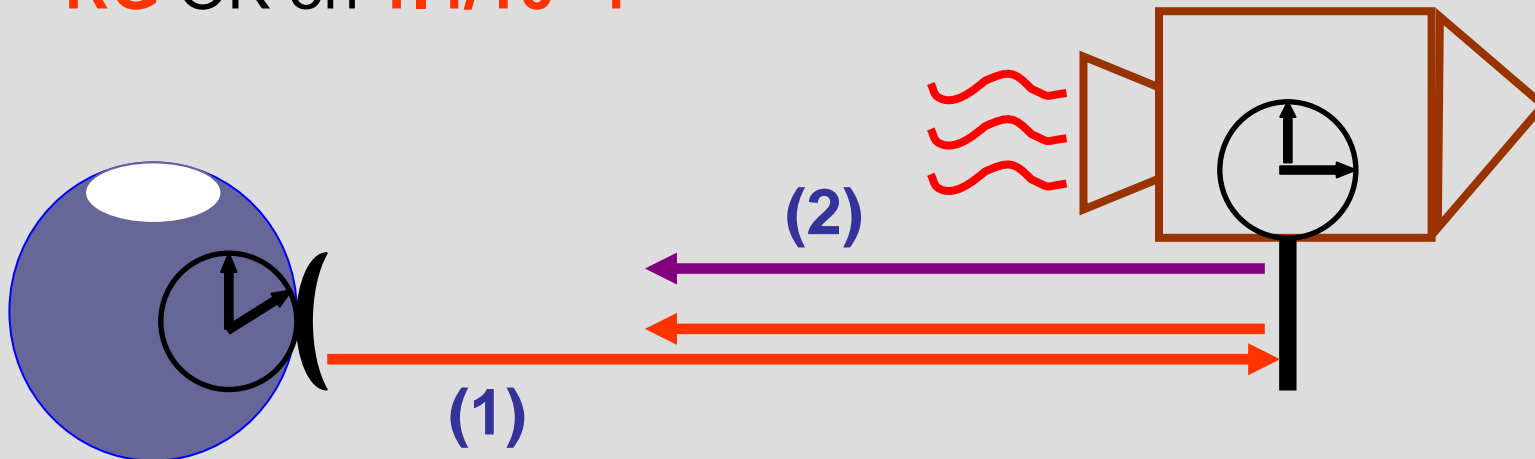
$$t' \approx \left(1 - \frac{gh}{c^2} \right) t$$

DESPLAÇAMENT AL ROIG

1960. Pound-Rebka: torre de Jefersson U. Harward, 25 m efecte $df/f=10^{-12}$. Amb isòtop de **Fe (57)** de vida 10^{-7} s long ona 0.86A° . Efecte Mossbauer. **RG OK** en un **10%**

1965. Pound-Snider: experiment millorat. **RG OK** en **1%**

1976. Vessot: coet Scout D rellotges masser de precisió $1/10^{15}$. (1420 MHz). Senyal **(1)** rebota dos cops Doppler senyal **(2)** emès per coet un Doppler (s'elimina Doppler)
RG OK en $1.4/10^4$



RELLOTGES I TESTS P.E.E. (lloc i temps)

1987. Milisecond pulsar PSR1937+21 (molt estable):
es compara amb rellotges degut a moviment terra respecte
cdm terra-lluna ona **0.86A°**. **RG** OK en un **10%**

1993. Galileo exp: rellotge en camp grav Sol: **RG** OK en **1%**

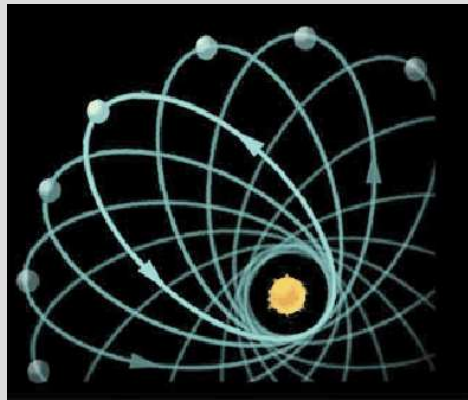
1993. Nucleosíntesi Big-Bang: variació constant α (dif rellotg)

1996. Oklo: fisió nuclear espontània, variació constants $\alpha, \frac{m_e}{m_p}, \dots$

2002. Null redshift: compara rellotge de cesi amb massar
d'hidrògen durant un any, pot grav Sol canvia. No canvi

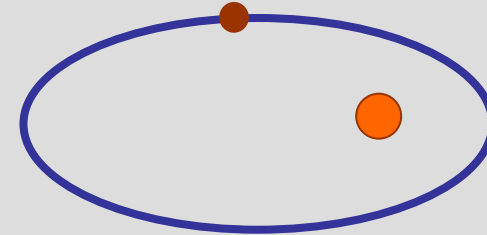
2002. Proposta enviar nau a $4R_{\odot}$: amb fila de rellotges
atòmics refredats amb làser. S'espera precisió: **1/10⁽¹⁰⁾**

AVANÇ DEL PERIHELÍ

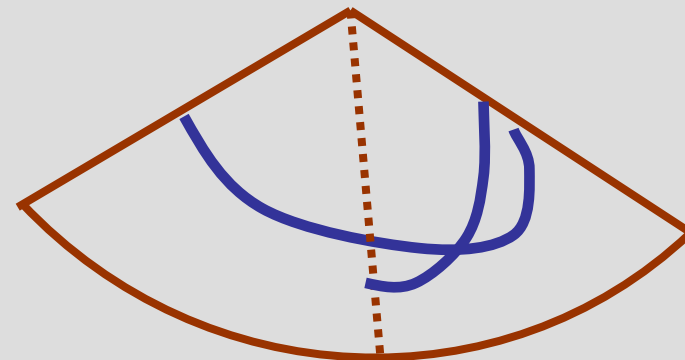
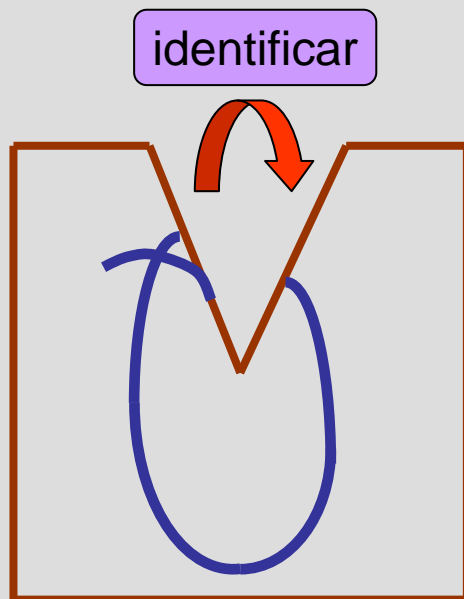
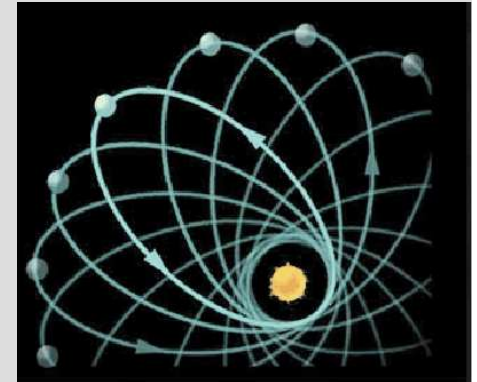


AVANÇ DEL PERIHELÍ

- La teoria de Newton prediu òrbites el·liptiques tancades, però **Mercuri** **avança** el periheli en **43''/segle** (inexpl)

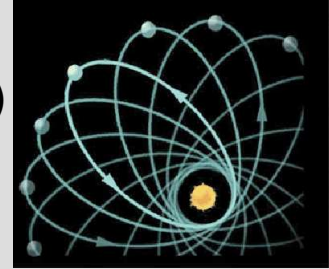


- La **RG** prediu que també l'espai es corbat, **el pla de l'òrbita no és pla** i l'el·lipse no hi cap



AVANÇ DEL PERIHELÍ

1846. Adams i Le Verrier prediuen **Neptú** (Newton)



1859. Le Verrier: discrepància amb òrbita Mercuri
avanç periheli: **574"/segle**. D'aquests **531"** s'expliquen
degut a Venus (**277"**) Jupiter (**153"**) Terra (**90"**) Mart **+(10"**)
no explicats: **43"**.

-- existeix nou planeta **Vulcà ?**

-- llei Newton modificada **$r^{-2.0000001574}$?**

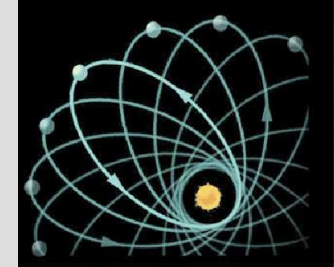
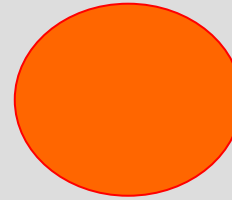
1915. Einstein: amb **RG** obté **43"** (palpitacions!)

degut a curvatura espacial, efectes no lineals **v^2**

AVANÇ DEL PERIHELÍ

1966. Dicke-Goldenberger:

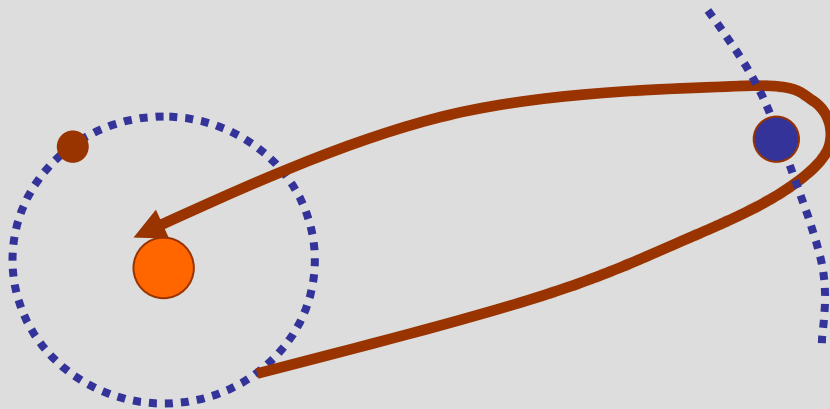
aixafament solar $1/10^5$ (52 Km)
quadrupol term extra r^{-4} (3'')



1973. Hill+: avui es creu $1.7/10^7$ (<2 Km) (0.5'') OK amb **RG**

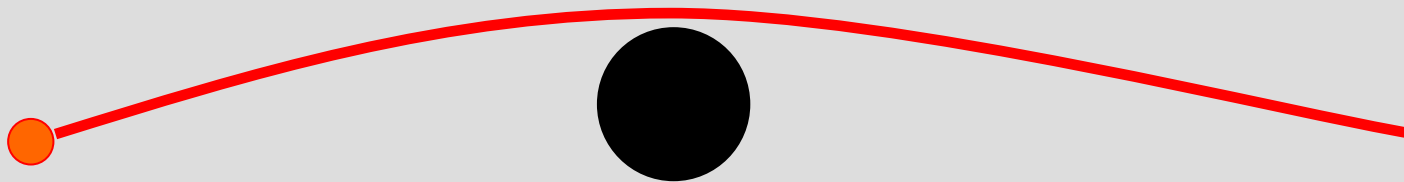
1990. Millores en **Q** Sol per par **pN**, **RG** OK $1/10^3$

Starprobe: projecte mesurar esfericitat Sol, enviar nau a prop. Cal frenar nau amb Júpiter

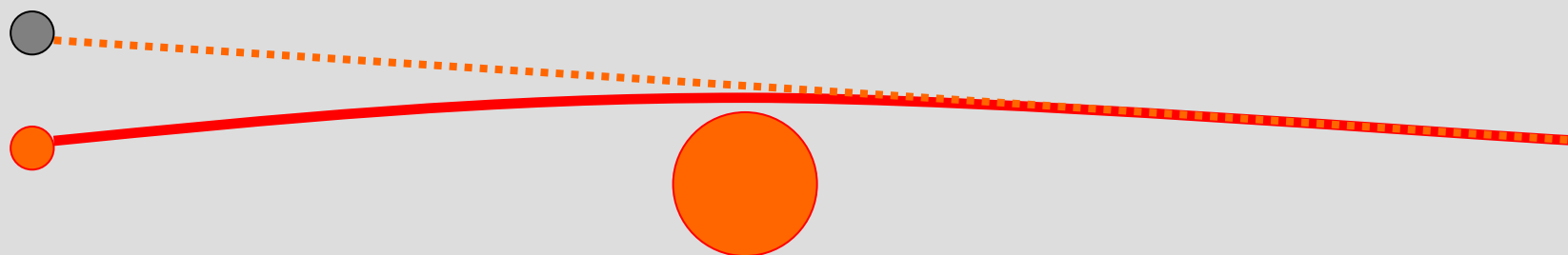


Avanç periastre observat en sistemes binaris: B1913+16, J0737-3039

DESVIAMENT DE LA LLUM



DESVIAMENT DE LA LLUM



1919. Eddington: Expedicions durant eclipsis solars a Illa Prince (G. Guinea) i Sobral (Brasill). **1.60'' (0.31)** i **1.98'' (0.12)**

1922, 1929, 1931, 1947, 1952, 1973 expedicions precisió **10%**

1979: dos quàsars a 6'' idèntics (**lents gravitatòries**)
ara és **eina** per observar **matèria fosca**

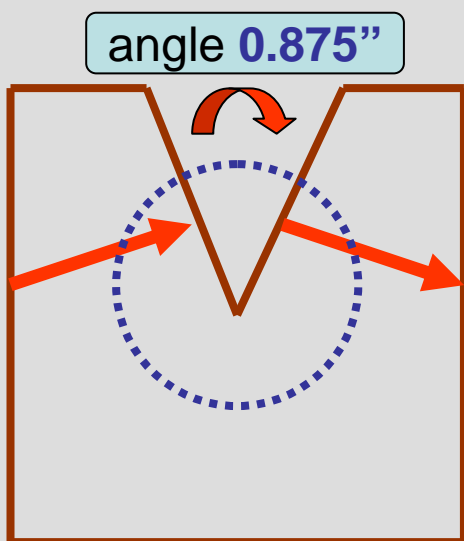
1991: radiotelescopis en fila observen quàsars a **10^9 a.l.**
evita refracció ones per corona (lluny) **RG OK** en **1/1000**

2004: 10^6 obs de 541 fonts per 78 VLBI: **RG OK** **1/10000**

GR prediu angle desviació de 1.7505'' pel Sol

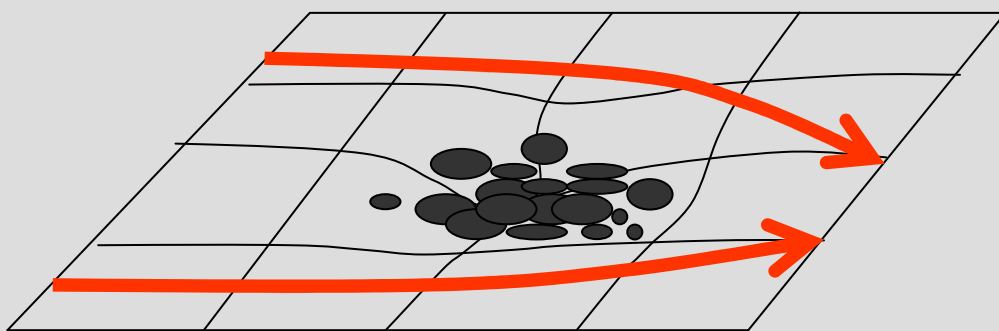
DESVIAMENT DE LA LLUM

EFFECTE CURVATURA DE L'ESPAI:



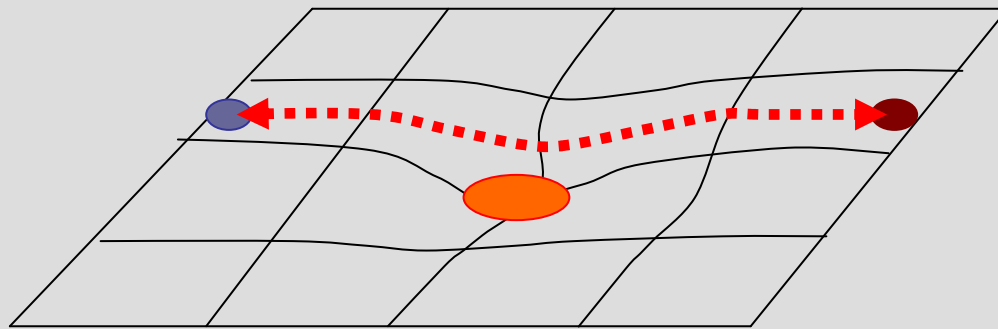
El pla equatorial te menys superfície que l'espai pla
long. circumferència $< 2 \pi r$

Pel cas del Sol dóna efecte de **0.875"** la meitat de l'observat



Explica la meitat de l'efecte **lent gravitacional** (dues imatges d'un objecte)

RETARD EN L'ECO DE RADAR



RETARD EN L'ECO DE RADAR

S'envien ones de ràdio a Mart en diferents posicions

Viatge d'anada i tornada la llum es retarda 250×10^{-6} s

Distància de Terra ● a
Mart ● te **19 Km** més
si hi ha el Sol al mig

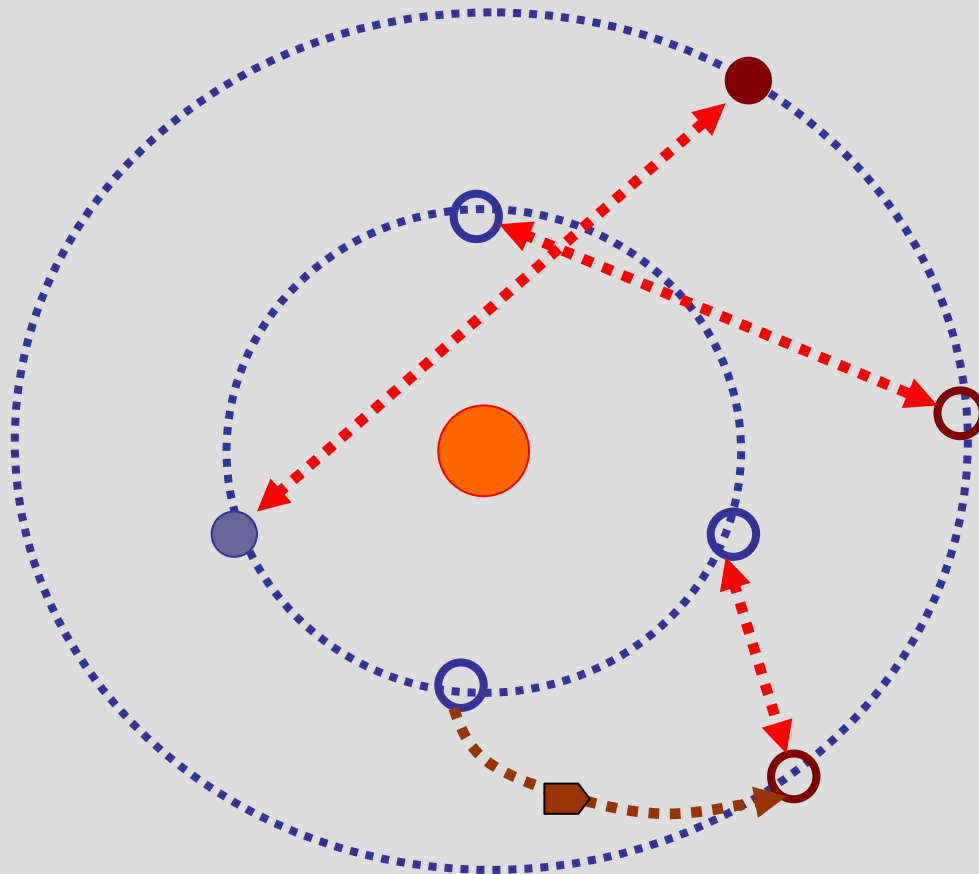
A **RG** hi dos efectes relacionats directament amb:
la **curvatura de l'espai** i el **principi d'equivalència**

RETARD EN L'ECO DE RADAR

1967: mesures amb Mercuri, **RG** OK en **20%**

1977: naus **Viking** ➔ deixen miralls a Mart, **RG** OK en **1/1000**
cal molta precisió en òrbites i posicions planetes

2003: Seguiment Doppler nau **Cassini** a Saturn, **RG** OK $1/10^5$



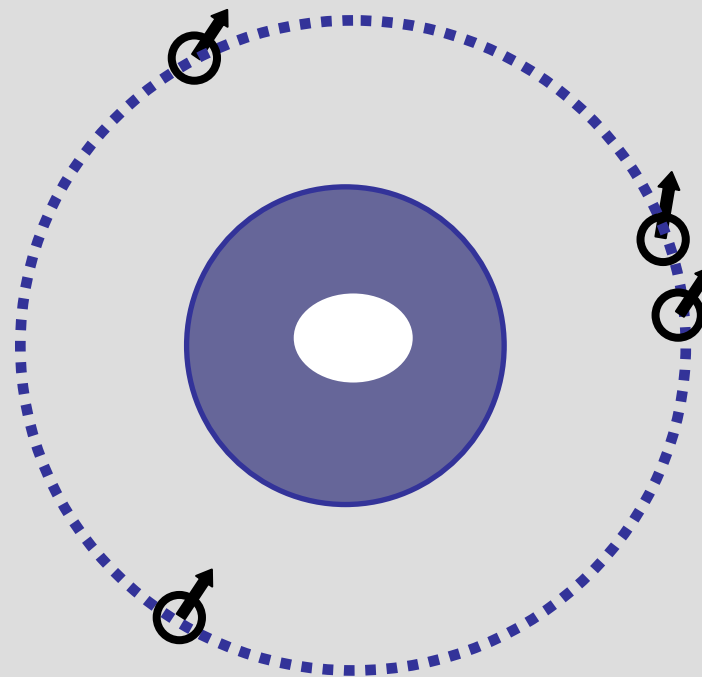
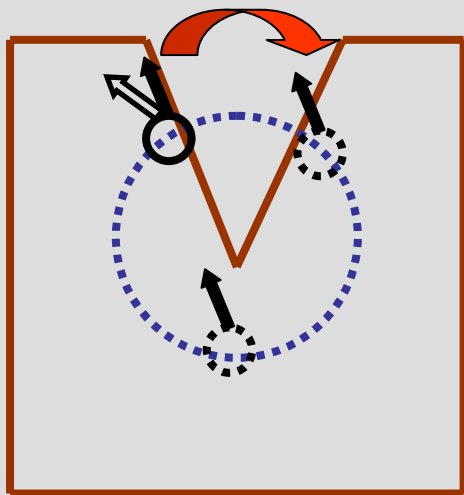
PRECESSION DE GIRÒSCOPS



PRECESSION DE GIRÒSCOPS

- Un giròscop sempre apunta eix en mateixa direcció en **SRI**
- **RG** dos efectes: **precessió geodètica i arrossament SRI**

PRECESSION GEODÈTICA (CURVATURA ESPAI):

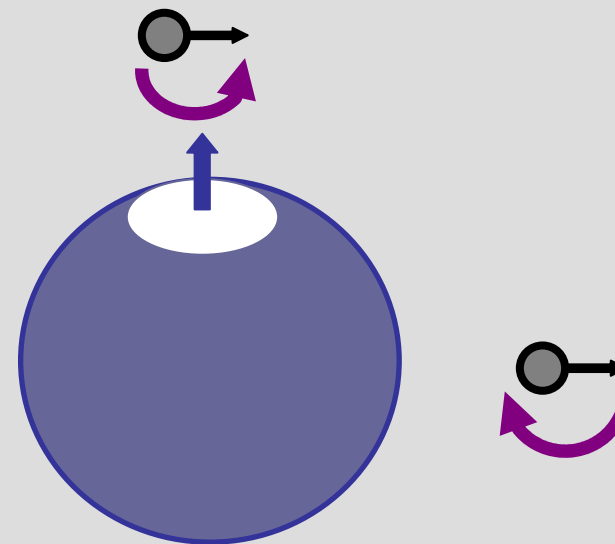
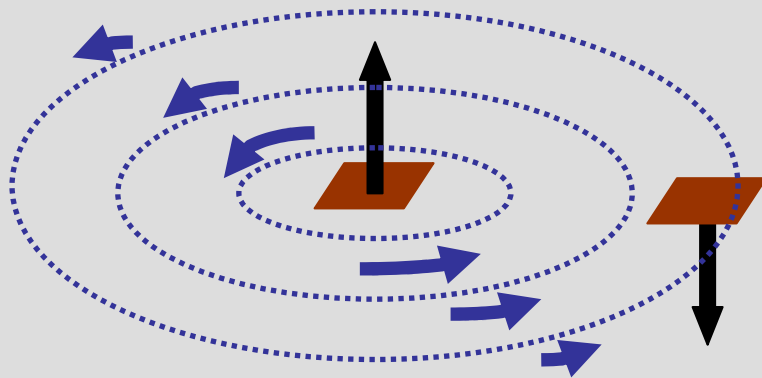


Òrbita a **100 Km** i **1 any** (5000voltes) s'espera precessió de **6''**

PRECESSIÓ DE GIRÒSCOPS

ARROSSEGAMENT SISTEMES INERCIALS (nou test)
un cos en **rotació arrossega** l'espai temps al seu voltant

Analogia: remolí d'aigua i flotador



Giròscops estacionaris. Efecte en **1 any: 0.1"**

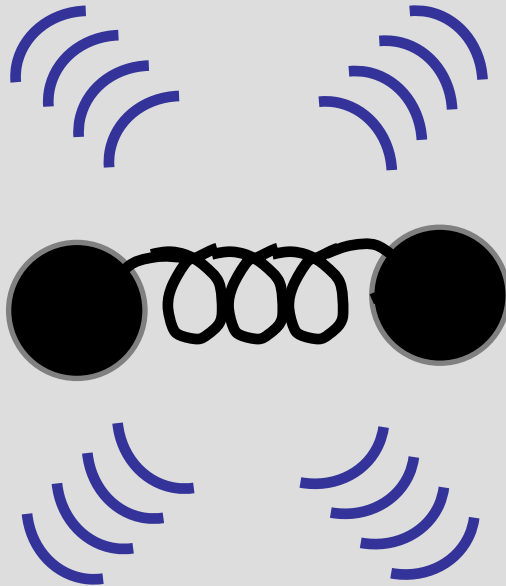
PRECESSIÓ DE GIRÒSCOPS

1960. Schiff-Fairbank-Cannon: consideren la possibilitat de posar un giròscop en òrbita per comprovar efecte **Lens-Thirring** (1918) degut a **rotació** Terra.

2009. Gravity Probe B: (F. Everitt) llançen el 2004 esfera de de **4 cm** (esfericitat **$1/10^6$**) (com la Terra amb bonys d'**1m**) de **quarz** envolta en **niobidi** que és superconductor a **4 °K**) eix apunta a estrella **Rigel** d'Oriò. Niobidi desenvolupa **camp magnètic** paral·lel a eix. Es posa en rotació per fricció d'Heli a pressió i a **4 °K**.

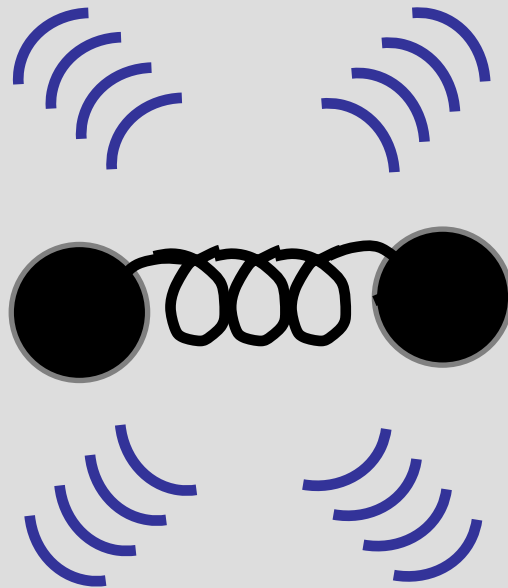
Recull dades del 2004 al 2005: complexitat dades, prob tec, soroll, direcció Rigel. Resultats preliminars: **RG** OK en **10%**

ONES GRAVITATÒRIES



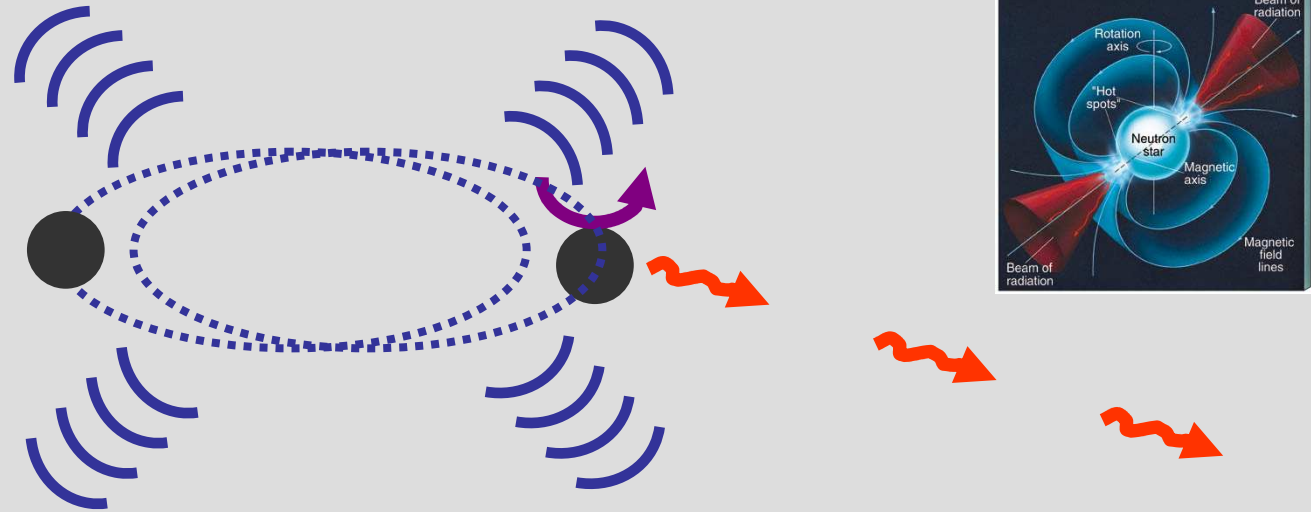
ONES GRAVITATÒRIES

- La **radiació gravitacional** és una predicció de la **RG** (Einstein, 1916) i de tota teoria relativista de la gravitació. ones són **transversals**, **2 polaritzacions**, **vel propagació=c**
- S'espera **$h=dL/L=10^{-21}$** de fonts properes i potents



**radiació
quadrupolar**

PÚLSAR BINARI B1913+16



1974: Hulse-Taylor (N.1993): pulsar binari **B1913+16**.

2 estrelles de neutrons de **1.4 Ms**, evidència **rad grav** el **1980**

• Període púlsar: **0.059 s**. Avanç periastre: **4.2°/any**. Ecc **0.62**

• Període òrbita: **P= 7.75 h**. Radi òrbita: **10⁽⁵⁾ Km**

decreix a un ritme de **2.4184x10⁽⁻¹²⁾ s/s**

perd energia per **radiació gravitacional**

d'acord amb **RG** no rad **dipolar** imp

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}$$

ALTRES PÚLSARS BINARIS

B1534+12: semblant al de Hulse-Taylor, galaxia, 2 EN de masses de **1.34 Ms**, **dP/dt** decreix d'acord amb **GR** en **15 %**
Incertesa en la distància

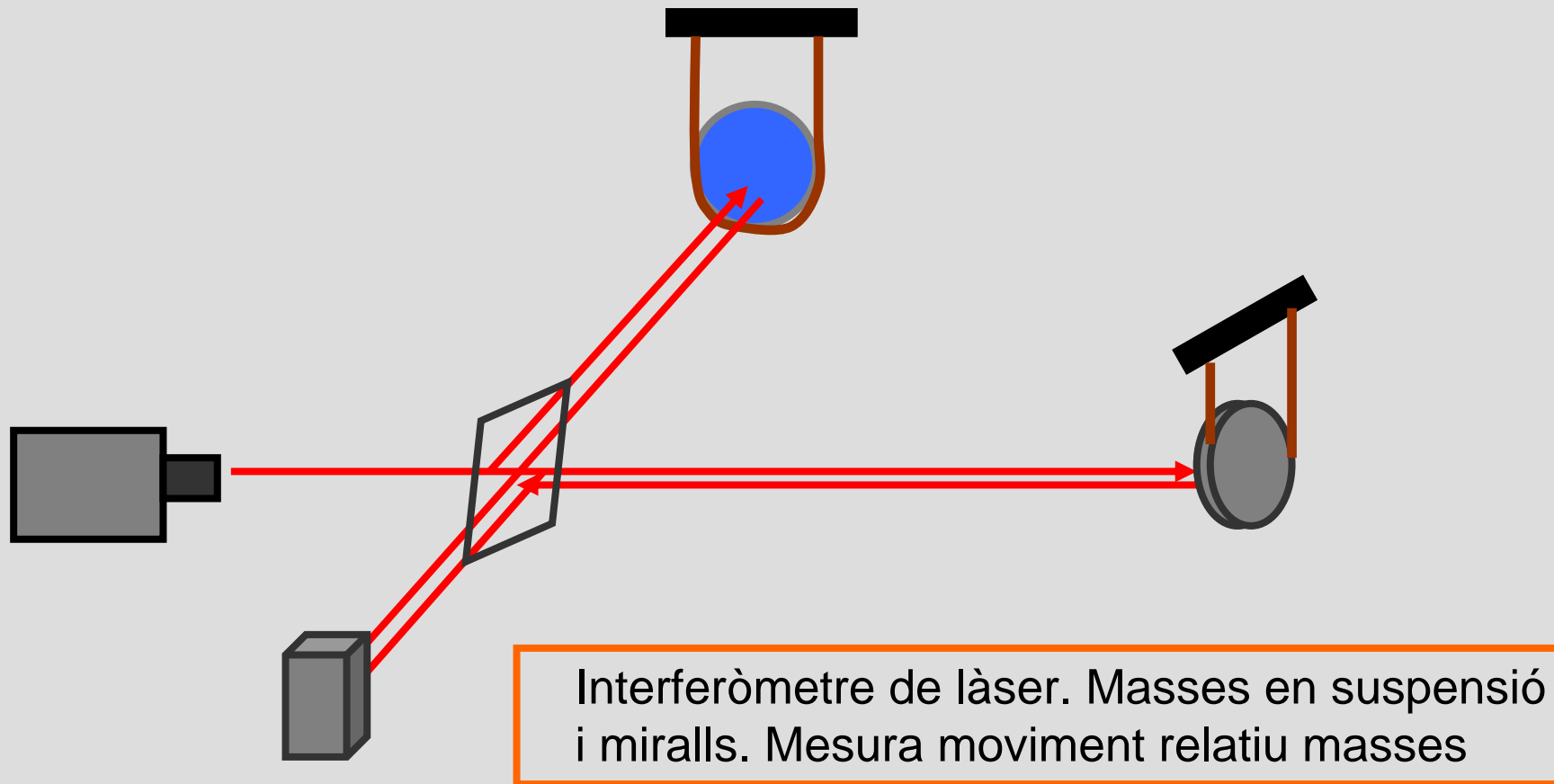
B3127+11C: 2 EN, massa **total 2.7 Ms**, és al cumul globular M15, te acceleracions locals, no possible determinar **dP/dt**

J0737-3039A,B: **púlsar doble**, desc 2003, **P=2.4 h**. Avanç periastre **16.88°**. **m_A=1.34 Ms**, **m_B=1.25 Ms**. Oportunitat única per **tests de precisió** de **RG forta**, param **p_N** i **dP/dt**

J1141-6545: 2003, company NB, **m_A=1.30 Ms**, **m_B= 0.98 Ms**, **dP/dt** OK amb **25 %**. Oportunitat per forts límits a **rad dipolar** i per tant a teories **escalar-tensor** (suprimit quan **m_A=m_B**)

DETECCIÓ ONES GRAVITATÒRIES

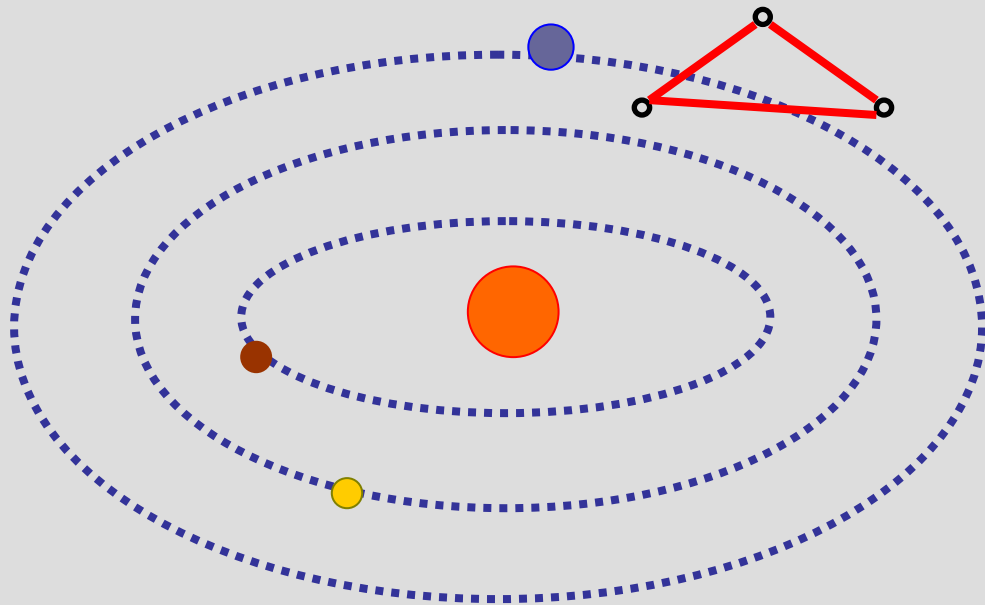
INTERFERÒMETRES



LIGO aprovat 1991, braços de **4 Km.** (Liousiana, Washington)
en funcionament, $h=10^{(-21)}$, (1m varia **0.01 nucli atòmic**)

DETECCIÓ ONES GRAVITATÒRIES

INTERFERÒMETRE: LISA (2012)



3 satèl.lits en
òrbites solars

ANTENES I FONTS

LIGO (USA) funcionament 1^a fase, **LIGO avançat** 2010

VIRGO (EU) projecte

GEO 600 (EU) projecte

TAMA300 (JAPÓ) projecte

Sensitivitat $h=10^{-22}$ en rangs de **10-500 Hz**,

Fons: **Caiguda espiral binaries** (minuts finals) 40-100/any

Col.lapse nucli supernova

Inestabilitats en púlsars

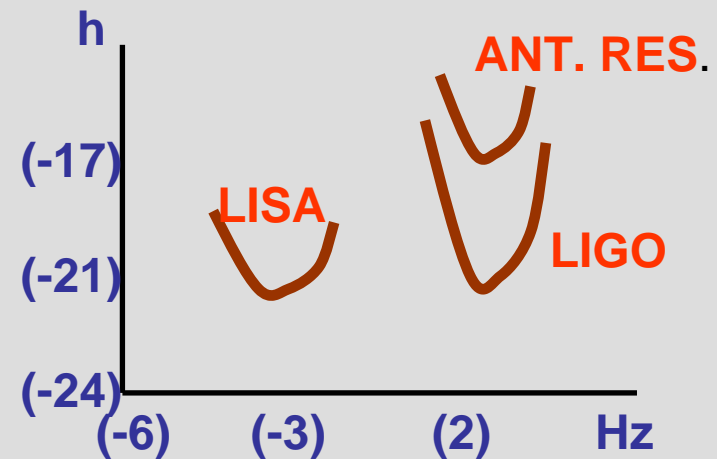
LISA: projecte int, $h=10^{-23}$

en freq. 10^{-4} - 10^{-1} Hz

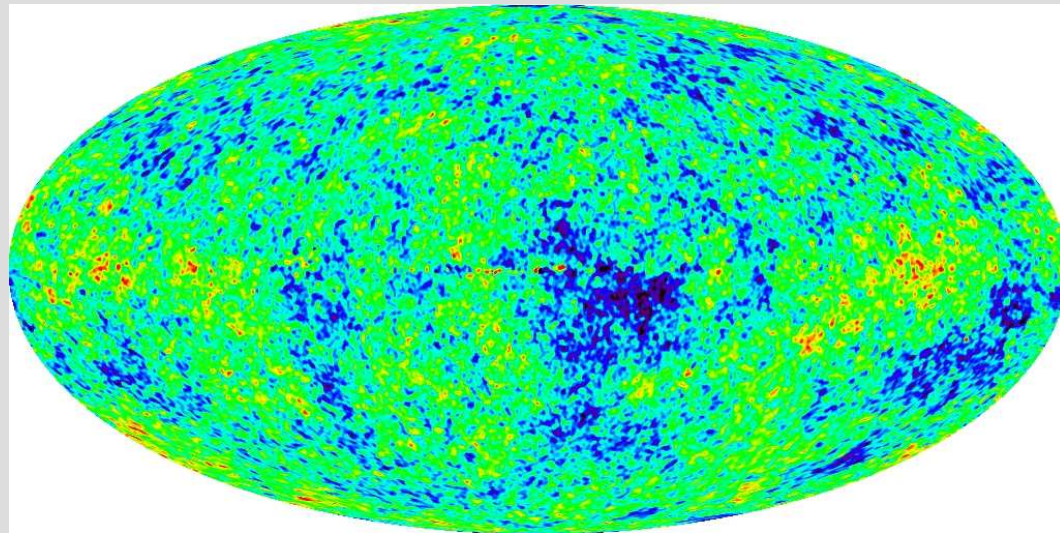
Fons: **Rad grav cosmològica**

ANTENES RESONANTS:

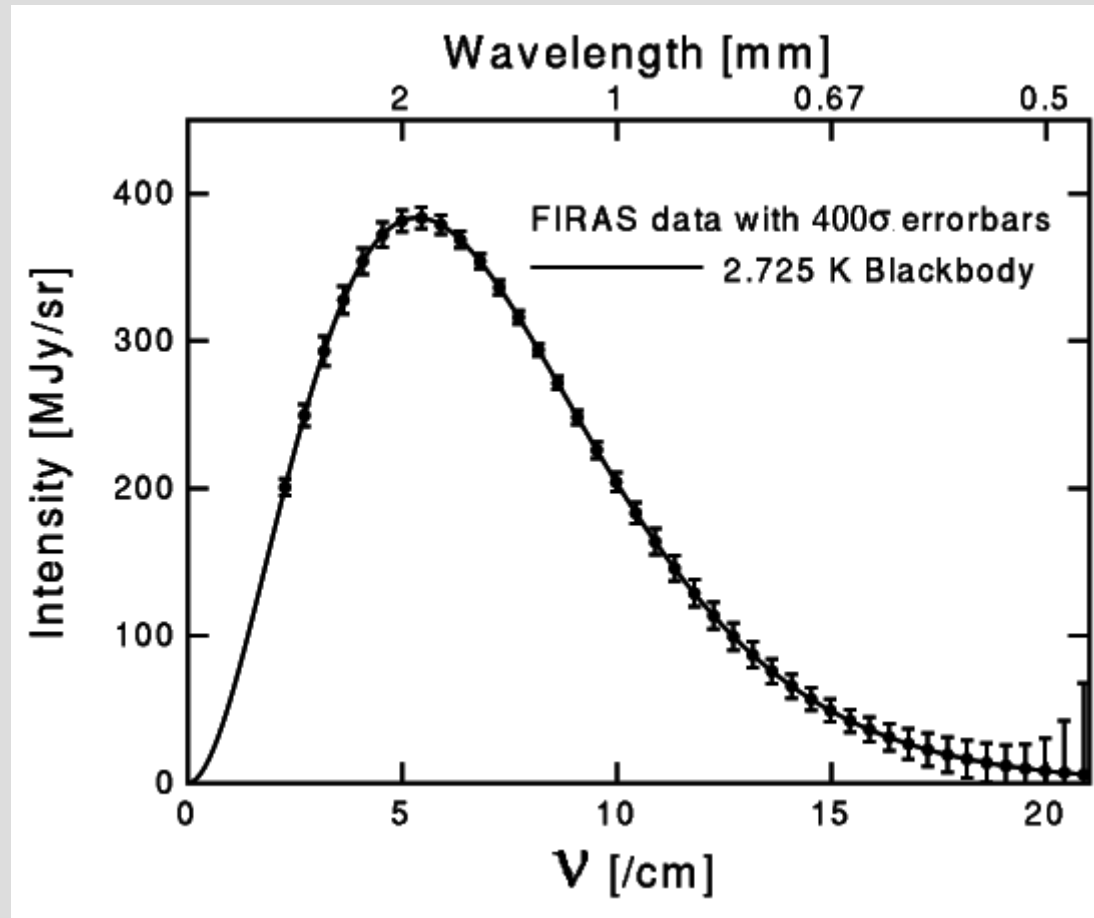
sensit $h=10^{-19}$ freq **10-500 Hz**



COSMOLOGIA



RADIACIÓ CÒSMICA DE FONS



COSMOLOGIA

1917. Einstein: univers estàtic. Introdueix Const Cosm (error?)

1922,1927. Friedmann, Lemaitre: univers en expansió.

Espacialment homogeni i isòtrop. Dos paràmetres,

constant Hubble i contrast densitat: $H_0 \equiv \frac{\dot{R}}{R}$, $\Omega_0 \equiv \frac{\rho_T}{\rho_c}$, $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$

2002: COBE, Boomerang, WMAP, univers esp. plà ($k=0$):

$$H_0 = 75 \frac{\text{Km/s}}{\text{Mpc}}, \Omega_0 = 1$$

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

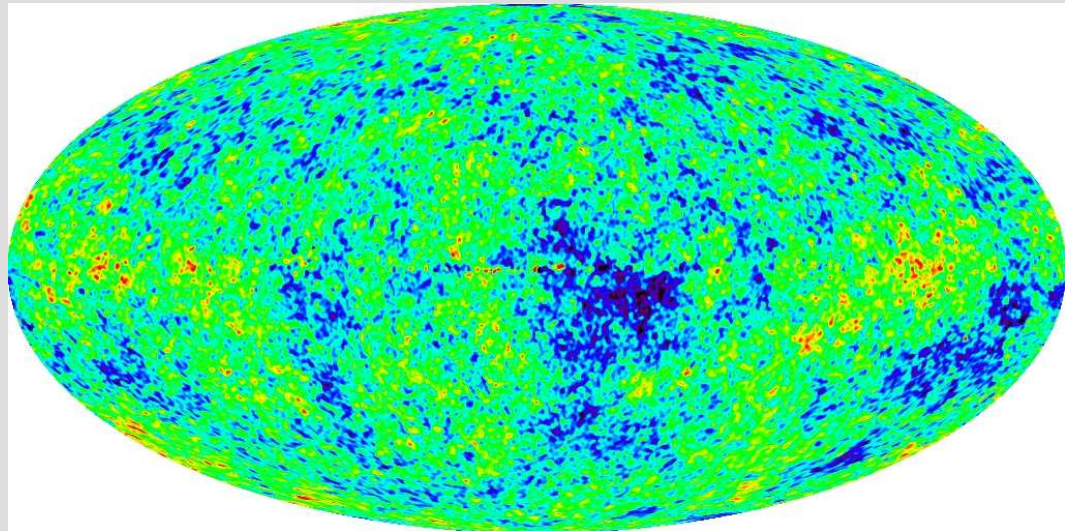
Eqs Friedmann:

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

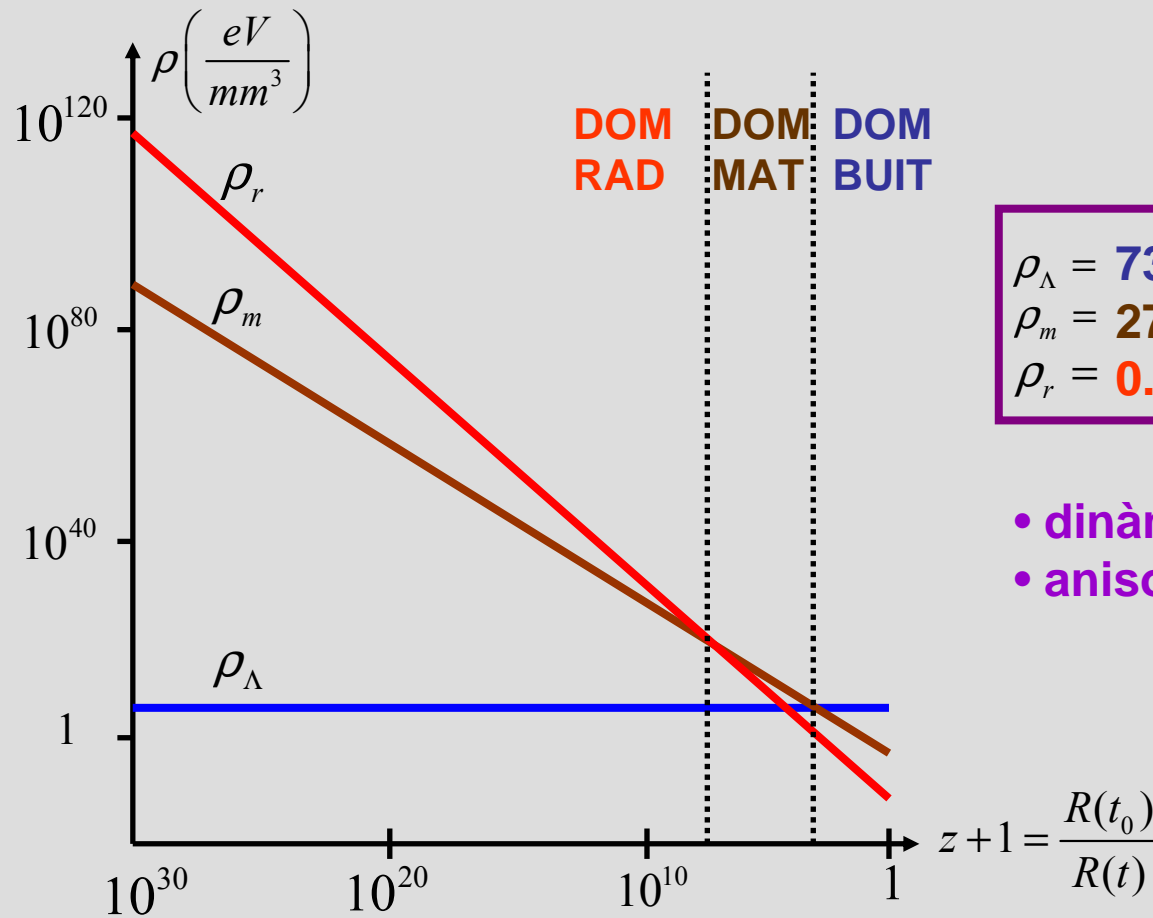
$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\rho_T \equiv \rho_r + \rho_m + \rho_\Lambda, \rho_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{8\pi G}$$

$$p_r = \rho_r / 3, p_m = 0, p_\Lambda = -\rho_\Lambda$$



MODEL COSMOLÒGIC CONCORDANT



$\rho_\Lambda = 73 \% \text{ ENERGIA FOSCA}$
 $\rho_m = 27 \% \text{ (23 \% MATÈRIA FOSCA)}$
 $\rho_r = 0.005 \%$

Confirmat per:

- **dinàmica** (supernoves, 1999)
- **anisotropies CMB** (WMAP, 2002)

$$\rho_r \sim R^{-4}$$

$$\rho_m \sim R^{-3}$$

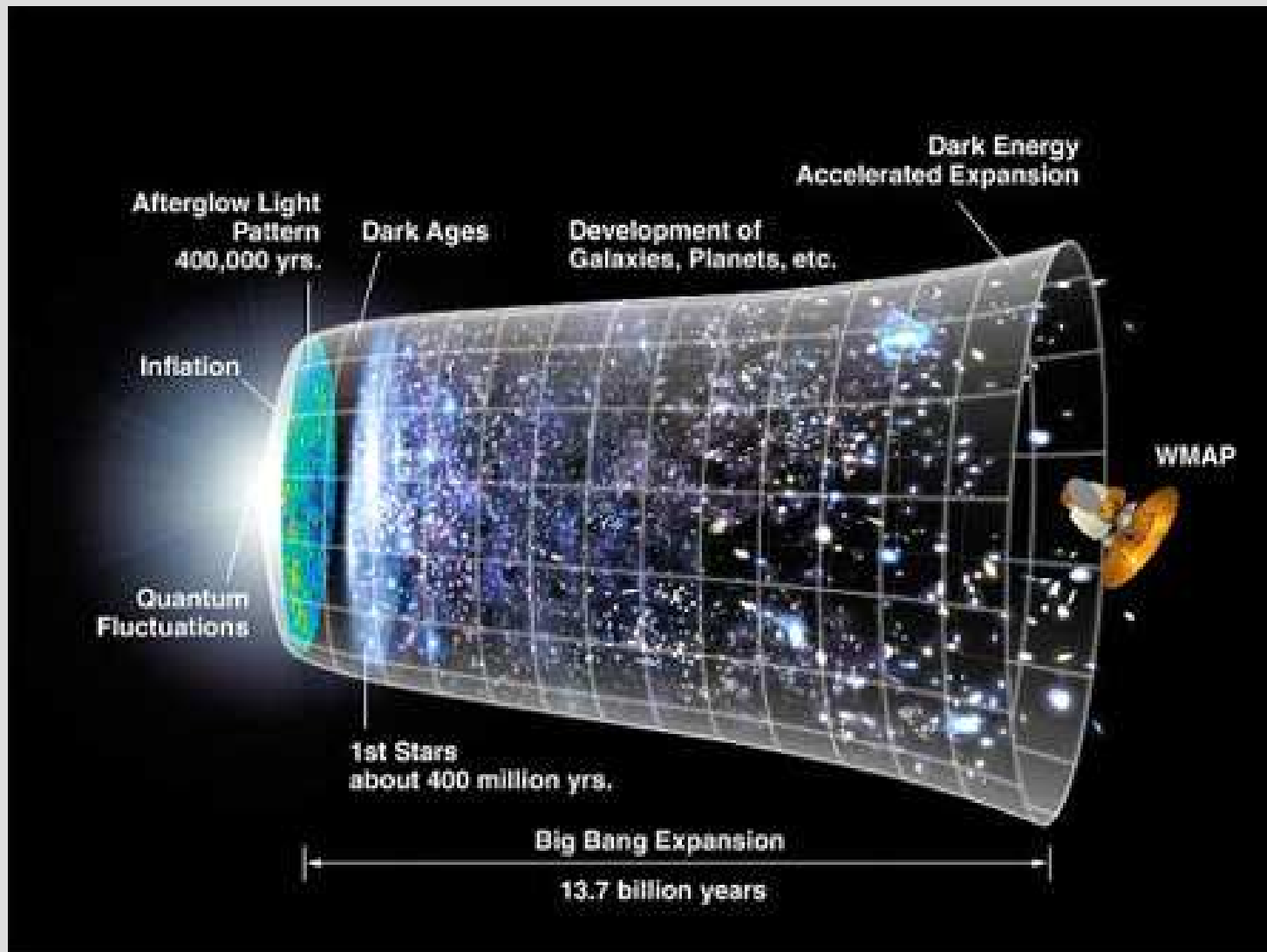
$$\rho_\Lambda \sim 10^4 \frac{eV}{cm^3} \sim 10^{-11} (eV)^4$$

inflació → $\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda = 1$

$$\Omega_r \equiv \frac{\rho_r}{\rho_c}, \quad \Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_c}, \quad \Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c},$$

$$p_r = \rho_r / 3, \quad p_m = 0, \quad p_\Lambda = -\rho_\Lambda$$

EVOLUCIÓ UNIVERS

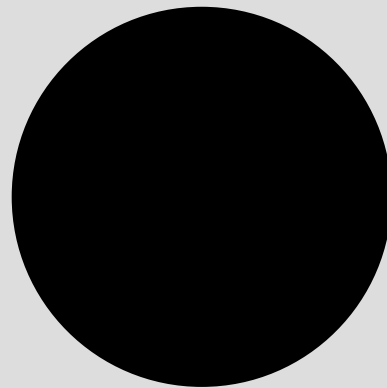


PROBLEMA DE LA CONSTANT COSMOLÒGICA

- **perquè?** $\rho_\Lambda \sim 10^{-120} m_P^4$ “tunning”
- **perquè?** $\rho_\Lambda \sim \rho_m (z \sim 1)$ coincidència

- Models amb Λ dinàmica (**quintaessència**)
- Models de **Branes** que modifiquen gravetat a grans escales
- Gravetat **modificada** a petites i grans escales (**bigravetat**)
- **Dimensions extres** generalment, teoria de **cordes**,...

TERMODINÀMICA DE FORATS NEGRES



FORATS NEGRES I COL.LAPSE GRAV.

Regió de l'espai des de on res ni la llum en pot sortir

1932. Landau (N62): prediu existència estrelles neutrons (EN)

1933. Baade-Zwicky: **supernoves** poden formar EN

1935. Chandrasekar (N1983): massa límit per **nana blanca**
1.4 Ms extrapolat a EN aproximadament **2-3 Ms**

1939. Oppenheimer-Snyder: FN es pot formar per **col.lapse gravitacional**. Descriuen **horitzó**, efecte sobre llum i temps finit del col.lapse.

TERMODINÀMICA DE FORATS NEGRES

1973. Bardeen-Carter-Hawking: **Ileis** de la mecànica de **FN**

1974. Hawking: **radiació de Hawking**. Efecte quàntic en camp gravitatori d'un **FN** produeix radiació tèrmica **$T=1/M$**

2000. Vafa-Strominger: **Entropia** d'alguns **FN** explicada microscòpicament en **teoria de cordes** (gravetat quàntica)
 $S=(1/4)$ àrea horitzó

TERMODINÀMICA DE FN

Un FN ve caracteritzat per poques quantitats (no té pèls), entre elles hi ha relacions com a termodinàmica: **M, J, Q**

PRIMERA LLEI (conservació energia)

$$dE = T_H dS$$

$$E = Mc^2$$

energia FN

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{16\pi^2 kGM}$$

temperatura

$$S = \frac{1}{4} \frac{c^3 k}{G\hbar} A$$

entropia
area horitzó

SEGONA LLEI (generalitzada): la entropia no disminueix

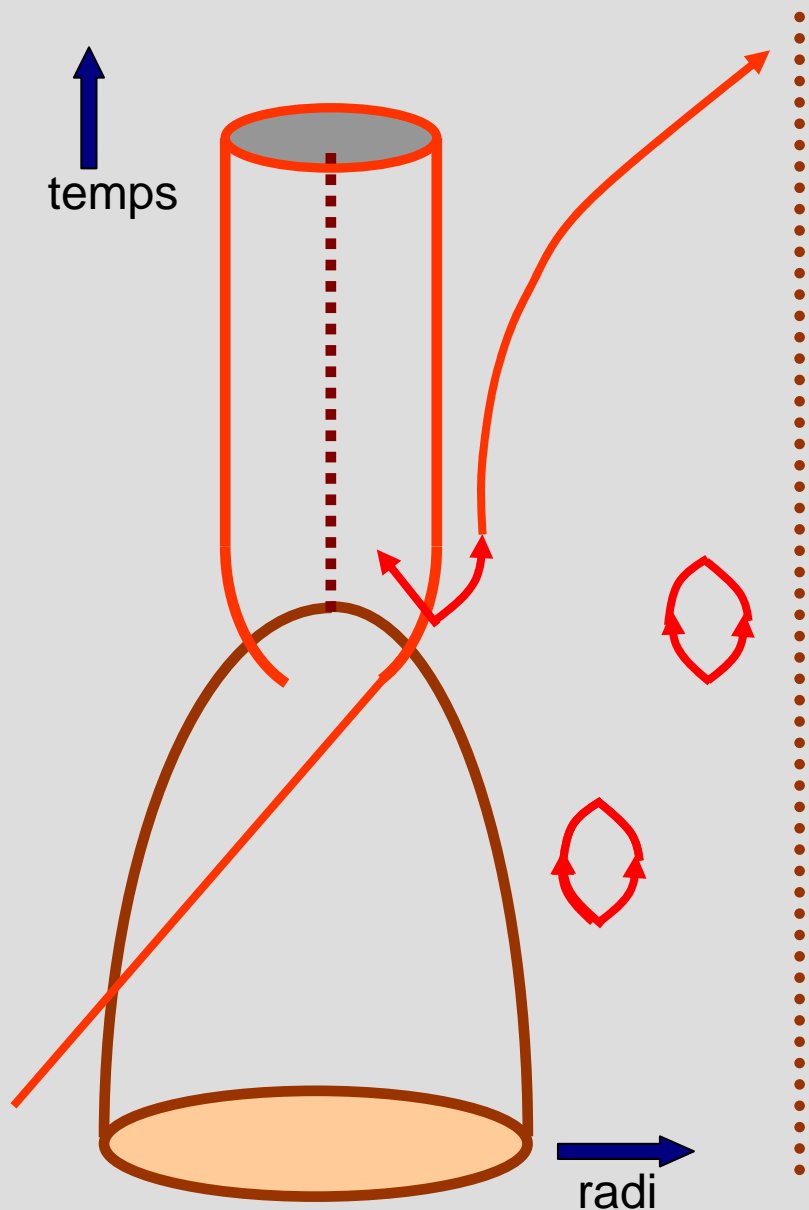
$$dS' \geq 0$$

$$S' = S + S_{resta}$$

- **2a llei passa totes les proves** (*Unruh-Wald*): FN en bany tèrmic, emet més ràpid que absorbeix. Intents de violació amb experiments “gedanken” fallen sempre

Problema obert: origen microscòpic entropia

RADIACIÓ DE HAWKING



1974. Hawking: mecànica quàntica a l'espai temps FN en formació

En el buit quàntic es produeixen parelles de partícules d'energia **E** que s'anihilen en temps **t**

$$t \sim \hbar / E$$

Forces marea horitzó: una pot entrar amb energia $-va$ l'altre lliure a l'inf. $+va$ independent del radi on es forma

Observador a l'inf detecta radiació tèrmica a temperatura

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{16\pi^2 kGM}$$

$M=10^{33}$ g, $T_H=10^{(-7)}$ °K

luminositat = àrea $\times T_H=1/M^2$

vida mitja $t=M^3$; $M=10^{15}$ g, $t=1^{10}$ anys

L'ENTROPIA D'UN FN ÉS GRAN

- Entropia FN: $S_{bh} = \frac{1}{4} \frac{A}{G} = \frac{1}{4} \frac{4\pi(4G^2 M^2)}{G} \sim \left(\frac{M}{M_P}\right)^2$, $R = 2GM$, $G = l_P^2 = 1/M_P^2$
- Bola de radiació a temperatura T i radi r : $M \sim T^4 r^3$
rad tèrmica alta entropia per matèria ordinària: $S \sim T^3 r^3$ ($\delta E = T \delta S$)
quan $r \sim GM$ es forma FN: $M \sim T^4 M^3 G^3 \Rightarrow T \sim M^{-1/2} G^{-3/4}$, $S \sim T^3 (GM)^3$

→ $S \sim \left(\frac{M}{M_P}\right)^{3/2} \ll S_{bh}$ si $M \gg M_P$

ORIGEN ENTROPIA FORATS NEGRES

- Base física de **temperatura** de FN és clara: radiació Hawking

- Base física **entropia** FN no ho és:

En un sistema físic l'entropia és

$$S \sim \ln(\text{nombre de microestats compatible amb estat macroscopic observat})$$

donat $S_{bh} = A / 4G$ el nombre d'estats interns d'un FN és $N \sim e^{A/4l_P^2}$

clàssicament o semi no és clar com definir aquests estats interns (situació anàloga a la de la termodinàmica abans de la mecànica estadística) (cada cel.la 2 microestats $N = 2^n$)

- L'explicació pot venir de:

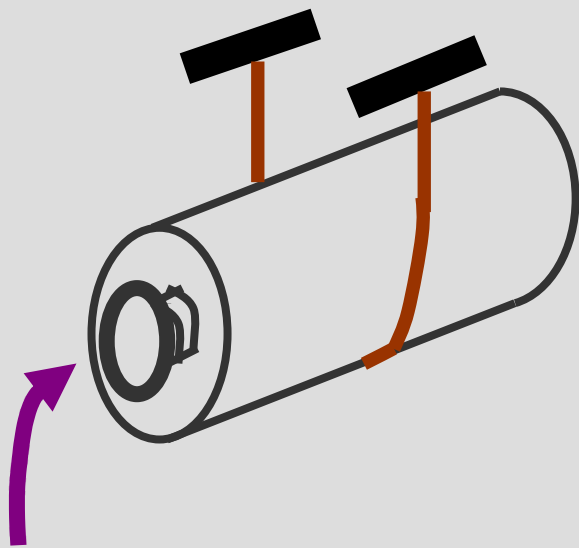
Entropia d'entrellaçament de matèria quàntica fora del FN

Gravetat quàntica: teoria de cordes; gq de loops; ...

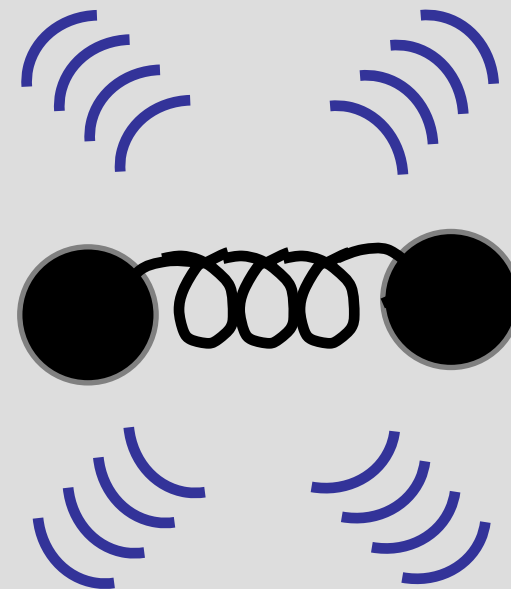
DETECCIÓ ONES GRAVITATÒRIES

ANTENES RESSONANTS

1961. Weber: construeix **antena ressonant** (cilindre alumini de **1 Tm**). **2000: AURIGA** (Europeu, **500 Hz**)



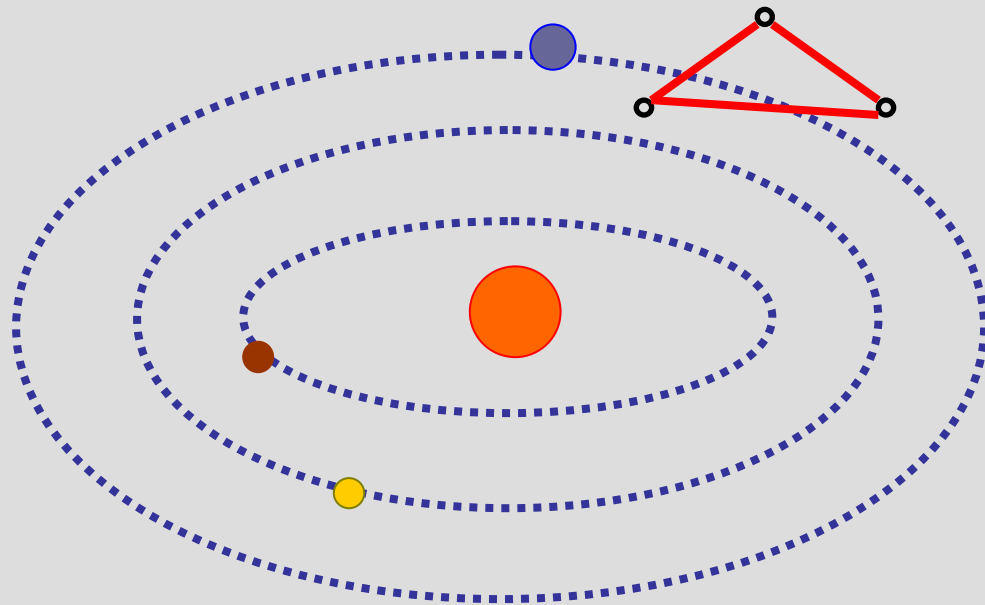
Transductor: massa acoblada amb molla amplifica oscil.lació. Antena a **$T < 4 \text{ }^\circ\text{K}$**



emissor
radiació
quadrupolar
(detector)

DETECCIÓ ONES GRAVITATÒRIES

INTERFERÒMETRE: LISA (2012)



3 satèl.lits en
òrbites solars

FONTS: supernoves ($h=10^{(-18)}$ galàxia, (-21) fora), formació FN, col.lisió EN, FN, sistemes binaris compactes ((-22) B1913+16), caiguda espiral binaries