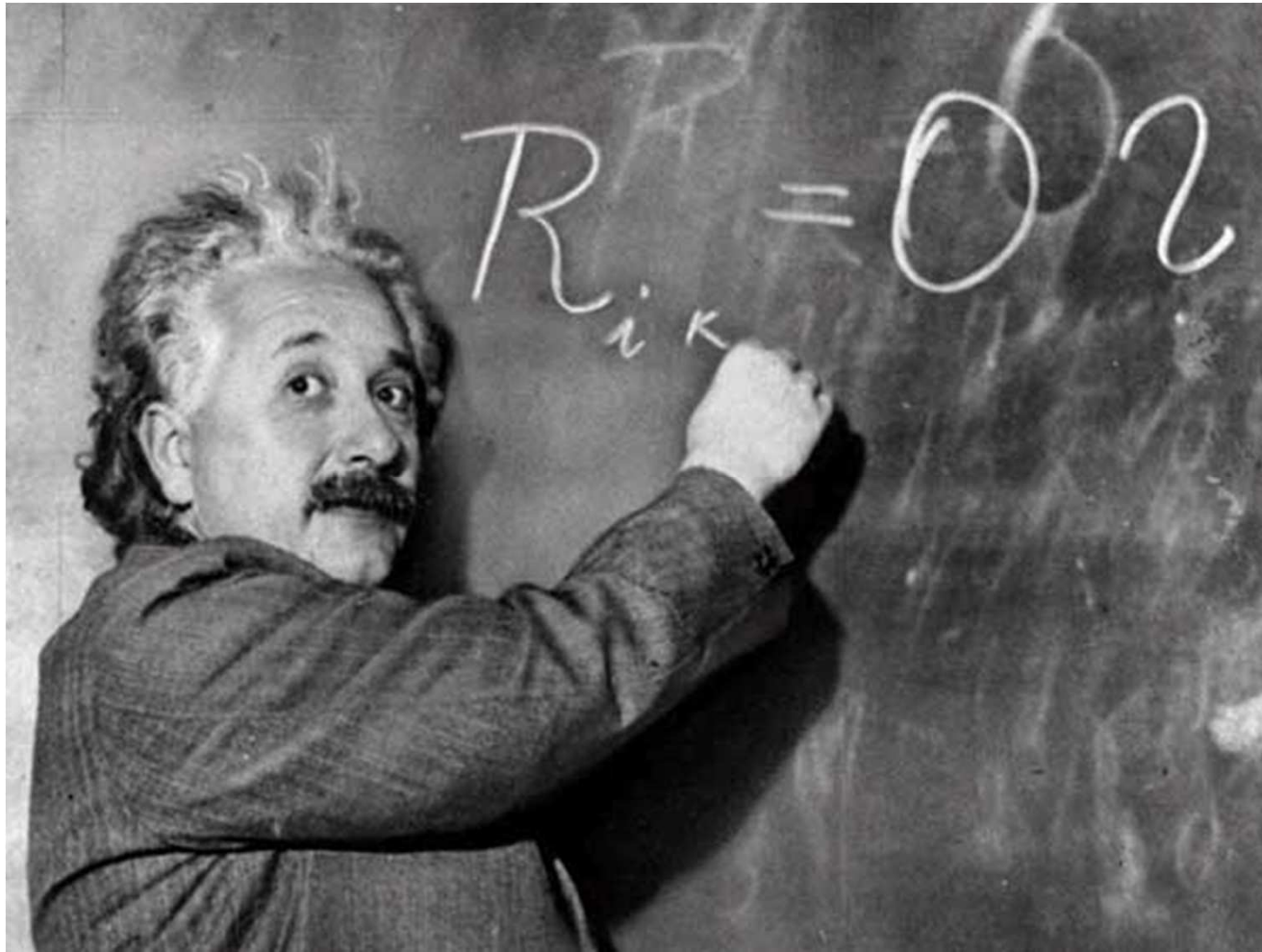

CENT ANYS DE RELATIVITAT GENERAL

**Enric Verdaguer
Universitat de Barcelona**

SOCIETAT CATALANA DE FÍSICA

Barcelona, 21 octubre 2015

RELATIVITAT GENERAL



PLA

1. Gènesi, renaixement, eina i tests.
 2. Principi d'equivalència i rellotges en camps grav.
 3. Forats negres: col.lapse, geometria, termodinamica.
 4. Dualitat gravitació/teories gauge (gravitació quàntica).
-

GÈNESI (1887-1922)

1887: ex. Michelson-Morley: velocitat llum independent SRI

1905: Einstein: Teoria de la Relativitat Especial

1907: Einstein: Principi d'Equivalència (la idea més feliç)
prediu (**1911**) desviació dels raigs de llum pel Sol de **0.875''**

LES EQUACIONS

Königlich Preuáische Akademie der Wissenschaften (Berlin)

4 novembre 1915: “On the General Theory of Relativity” $R_{ab} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{ab}$

11 novembre 1915: “On the General Theory of Relativity (Addendum)”

18 novembre 1915: “Explanation of the Perihelium Motion of Mercury
from the General Theory of Relativity”

LES EQUACIONS

Königlich Preuáische Akademie der Wissenschaften (Berlin)

4 novembre 1915: “On the General Theory of Relativity” $R_{ab} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{ab}$

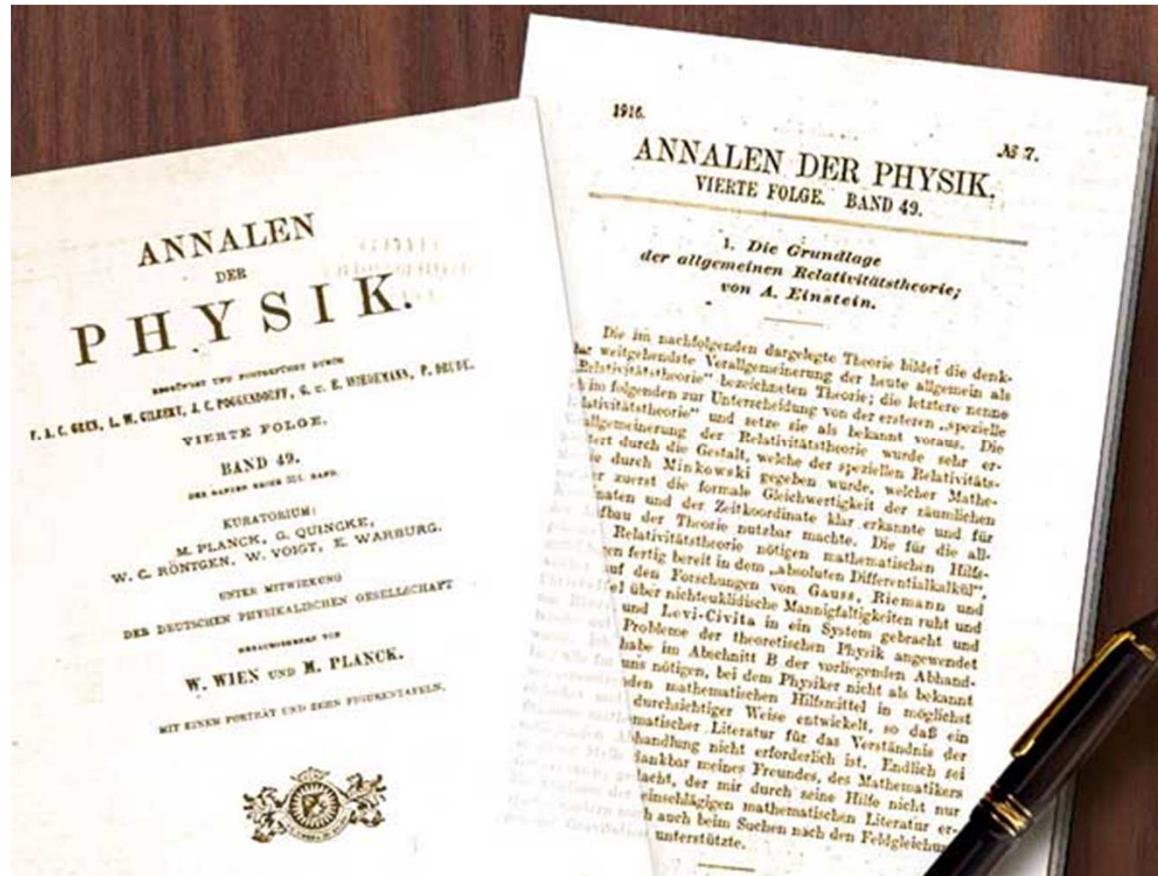
11 novembre 1915: “On the General Theory of Relativity (Addendum)”

18 novembre 1915: “Explanation of the Perihelium Motion of Mercury from the General Theory of Relativity”

25 novembre 1915: “Die Feldgleichungen der Gravitation”
 (“The Field Equations of Gravitation”)

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

RELATIVITÄT GENERAL



20 març 1916: “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”
 (“The Foundation of the General Theory of Relativity”)
 Annalen der Physik 49 (1916).

RELATIVITAT GENERAL

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

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

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: $dfreq/freq = gh/c^2$**
-

RELATIVITAT GENERAL

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.

TEORIA QUÀNTICA

1900: **Planck**, hipòtesi quàntica energia radiada per àtoms

1905: **Einstein**, hipòtesi quàntica llum, efecte fotoelèctric

1913: **Bohr**, model quàntic de l'àtom

1923: **De Broglie**: ones de matèria

1925: **Heisenberg, Born, Jordan** (mecànica de matrius)
Schrödinger (mecànica ondulatoria)

1927: **Heisenberg**, principi d'incertesa

Dirac, equació relativista i quàntica de l'electró.

...

1960s: **Teories gauge** (TQC), interaccions fonamentals.

RENAIXEMENT (1960-1980)

1960: Pound-Rebka, comproven **desplaçament al roig** gravitacional en un **10%**.

1960: Mathews-Sandage descobreixen **quasars** (fonts 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)

1963: Kerr: espai temps simetria axial estacionari, forat negre amb rotació (FN més general)

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 (1980-)

1981: Guth: etapa **inflacionària** univers (nou 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**

1997: Maldacena: correspondència **AdS/CFT**, formulació d'una teoria quàntica de la gravitació (teoria de cordes). Gravetat com a eina per descriure teories gauge.

EINA I TESTS GRAV FEBLE I FORTA

- Principi d'equivalència (Eöt-Wash, 2001): $3/10^{13}$.
 - Avanç del periheli: $1/10^3$.
 - Desviament de la llum: $1/10^4$.
 - Retard en l'eco de radar (Cassini, 2003): $1/10^5$.
 - Desplaçament al roig (Vessot, 1976): $1.4/10^4$.
 - Precessió de giròscops (Gravity Probe B, 2004): $1/100$.
 - Cosmologia: inflació ($10^{(-35)}$ s), model concordant.
 - Ones gravitacionals: evidència indirecta.
 - Forats negres: evidència, pont amb teoria quàntica.
-

ESPACI-TEMPS I GRAVITACIÓ

- A **mecànica newtoniana**: espai i temps **absoluts**
 - A **relativitat especial**: espai-temps
 - Res pot viatjar a velocitat més gran que la **llum**
 - **Relotges** idèntics: des de sistemes de referència diferents tenen diferents ritmes (temps és **relatiu**)
-

RELATIVITAT ESPECIAL

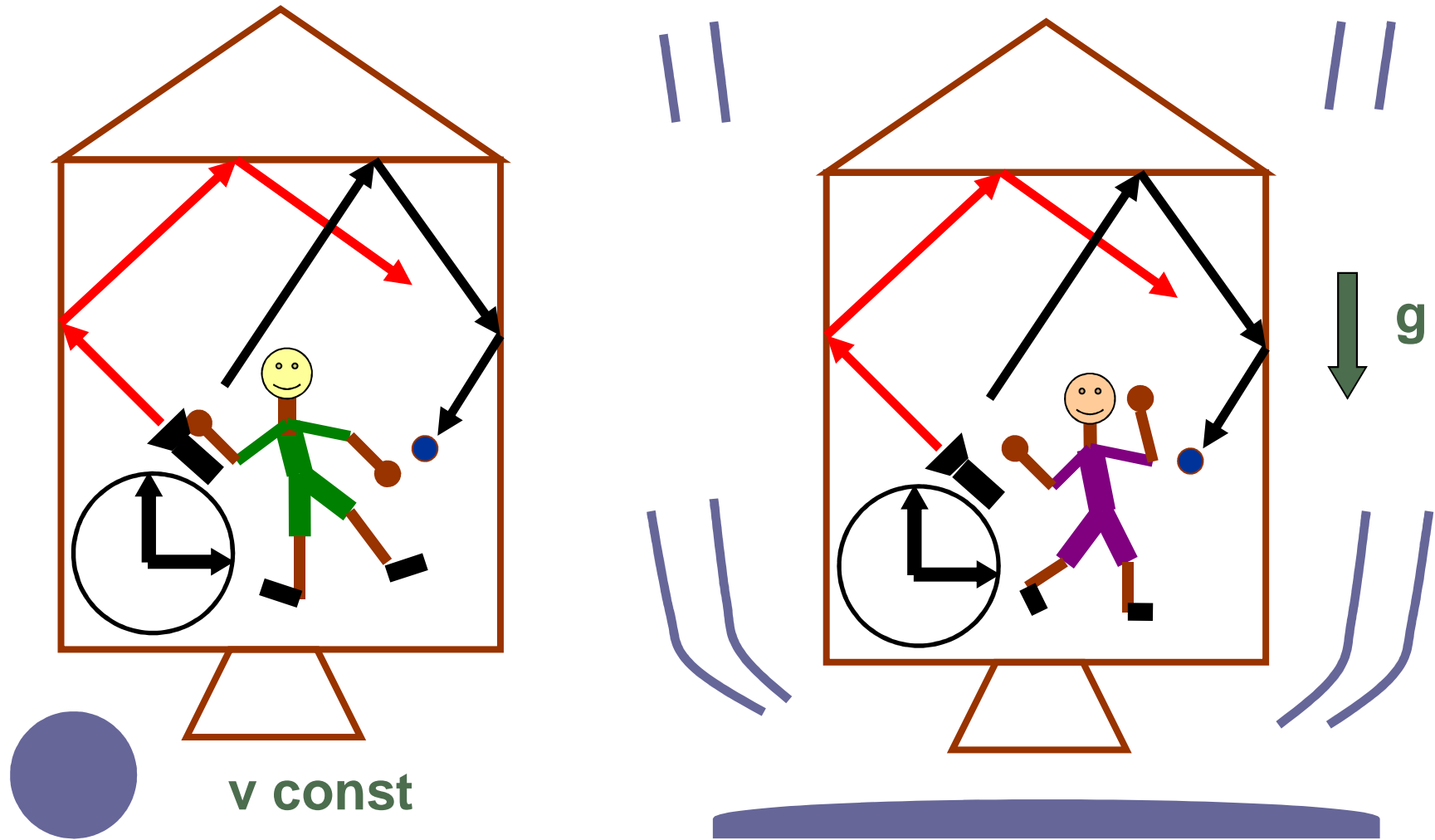
PRINCIPI DE RELATIVITAT:

- Els **sistemes de referència inercials** són equivalents respecte **totes les lleis** de la física (**SRI**: sist. de ref. on es satisfà la primera llei de Newton: partícules lliures vel const)
 - La velocitat de la **llum en el buit** és **$c=300\ 000\ \text{Km/s}$** en tots els **SRI**
-

PRINCIPI D'EQUIVALÈNCIA

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

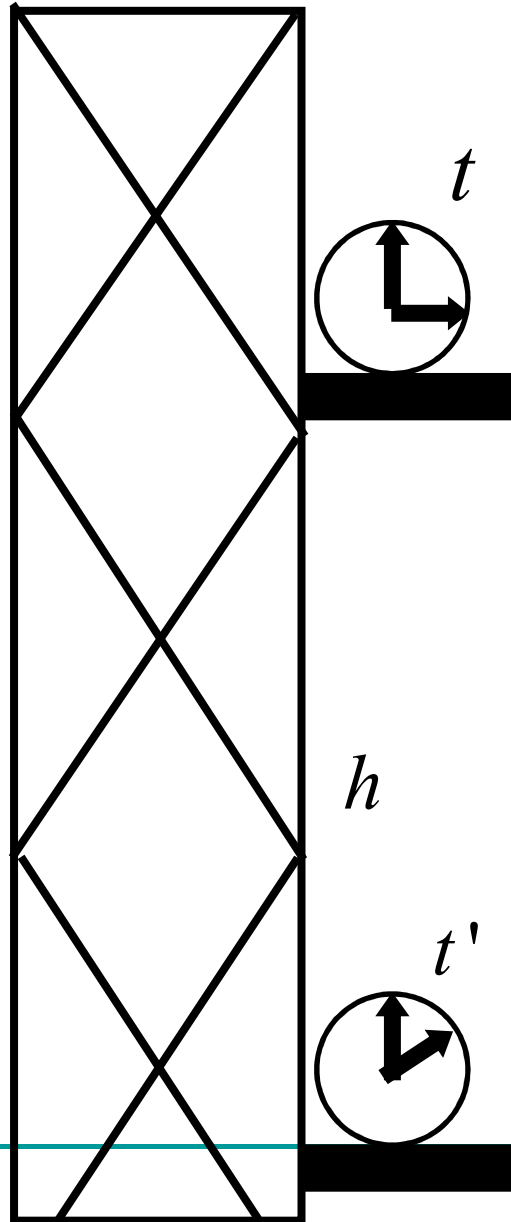
PRINCIPI D'EQUIVALÈNCIA



RELOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS

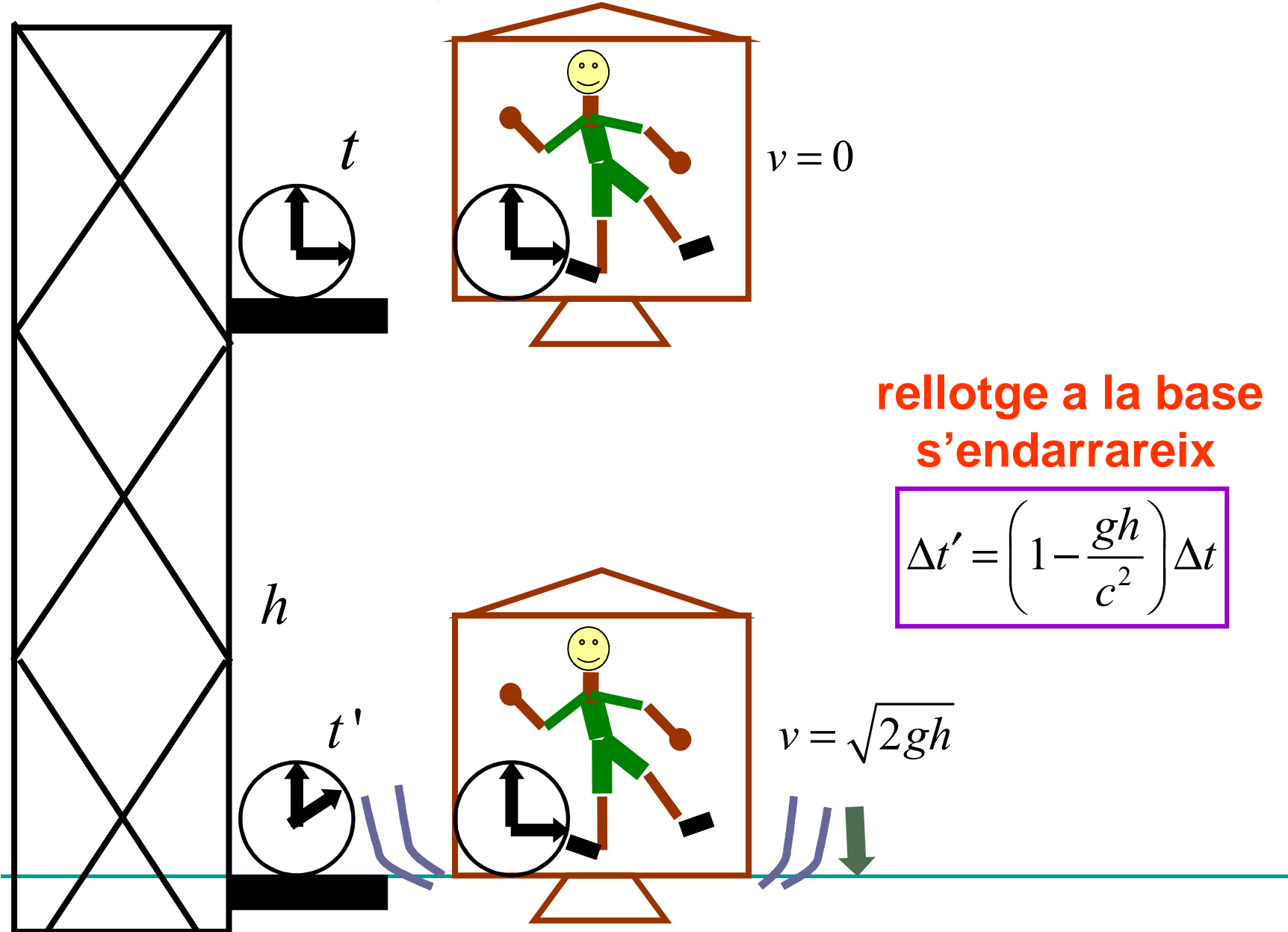


RELOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS

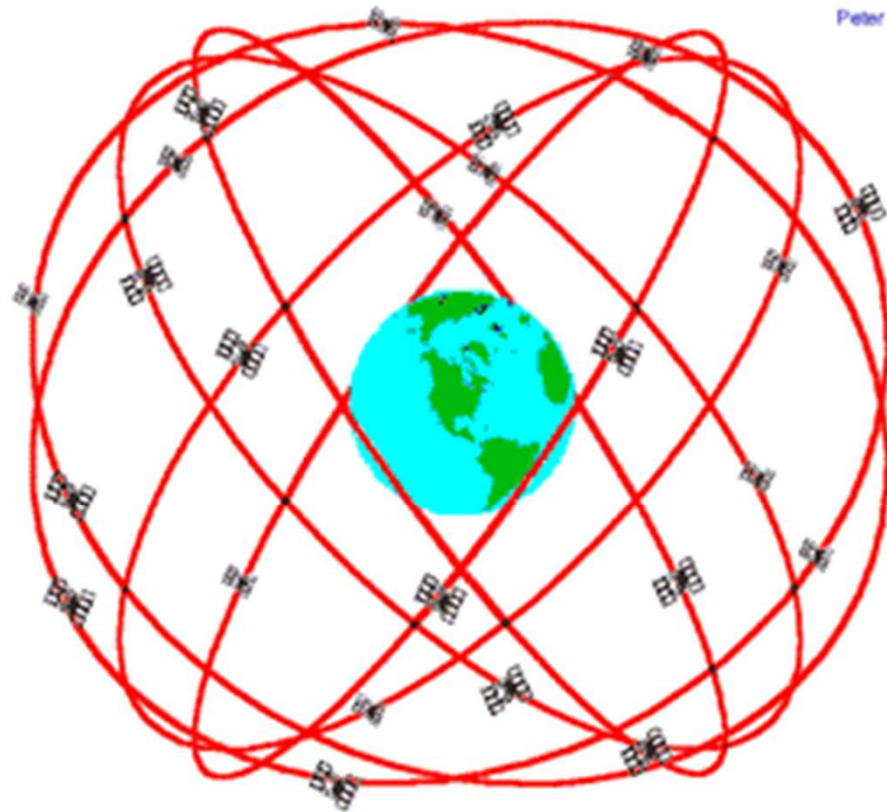


Volem **comparar** els dos rellotges

RELOTGES EN CAMPS GRAVITATORIS



GLOBAL POSITIONING SYSTEM : GPS



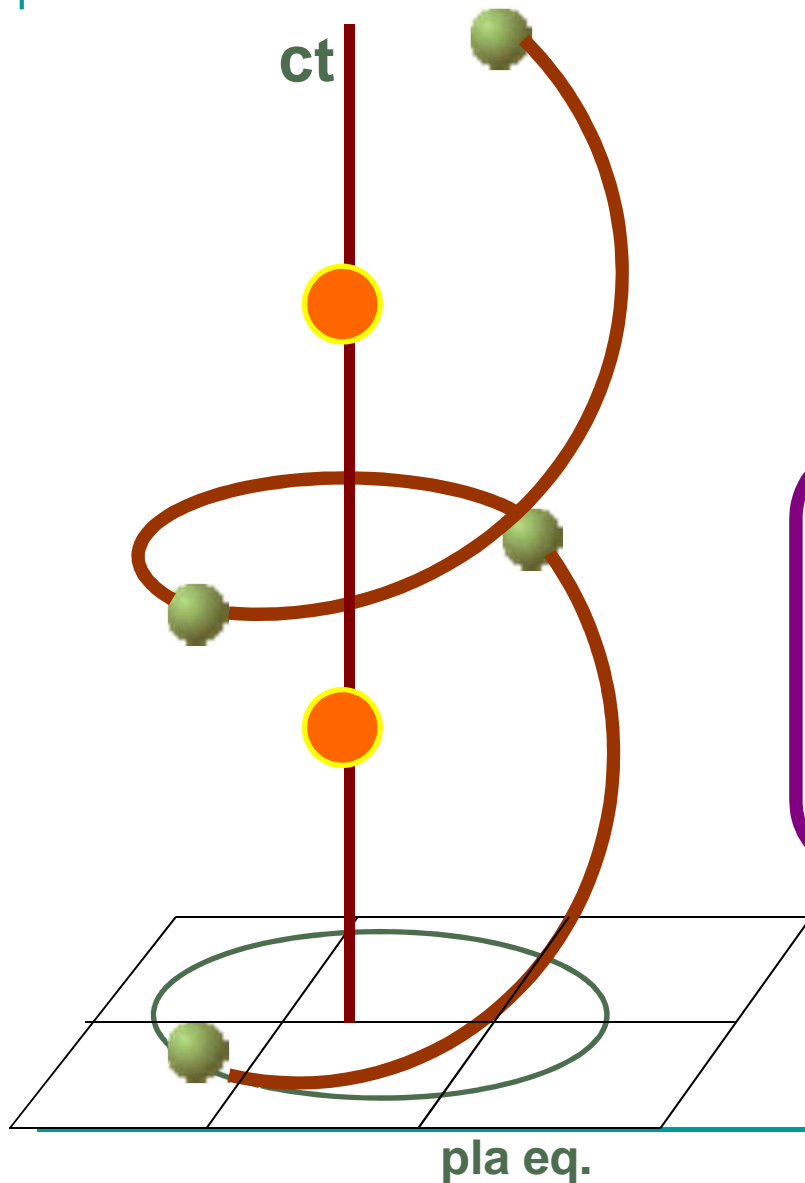
GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination
Velocitat satèl.lits 14 000 Km/h



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

Relotges avancen
 39×10^{-6} s/dia

GRAVITACIÓ: matèria corba l'espai temps



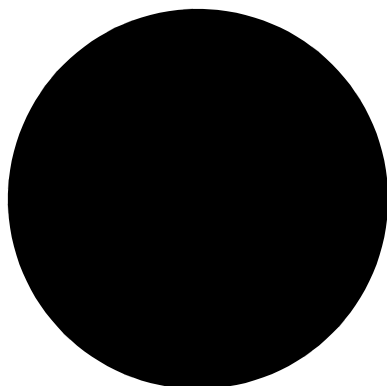
Sol corba espai temps.
Terra segueix “geodèsica”
Projecció al pla equatorial
és una **el.lipse**

Equacions d'Einstein:
Curvatura creada per la massa
del Sol: “equival” a la **lei de
Newton** de la gravitació

$$r \approx 10^8 \text{ km}$$

$$T \approx 1 \text{ any}$$

FORATS NEGRES



FORAT NEGRE

Una regió de l'espai on la gravetat és tan intensa que no permet que res **ni la llum** pugui escapar.

Són els objectes **macroscòpics més perfectes i simples** de l'univers: **M, J, Q** (Chandrasekhar) **“No tenen pèls”**

FORATS NEGRES I COL.LAPSE GRAV.

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

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.

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 **$T=1/M$**

ESTRELLES INVISIBLES NEWTONIANES

- John Michell 1783 (UC), Pierre Simon Laplace 1796: quan **velocitat d'escapament** d'una estrella es **$c=300\ 000\ \text{Km/s}$**

$$\frac{1}{2}mv_e^2 - G\frac{Mm}{R} = 0 \quad \text{Terra: } v_e \approx 11\frac{\text{Km}}{\text{s}}$$

- **FN** quan es comprimeix massa **M** en radi **R_g**:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}$$

Sol (M): $R_g = 3\ \text{Km}$

Terra: $R_g = 10\ \text{mm}$

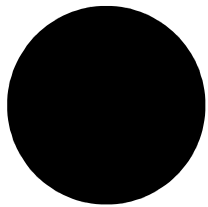
$10^9\ \text{M}$: $R_g = 10^9\ \text{Km}$

FORATS NEGRES

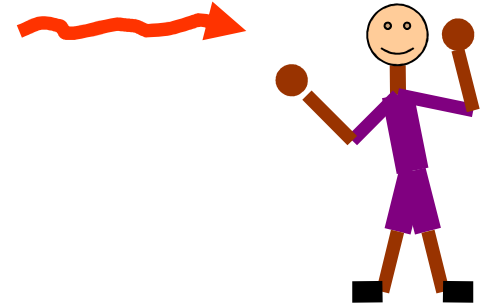
- **FN** no es poden crear al laboratori si no per **col.lapse** d'estrelles de masses **2** o **3 M_{sol}**
 - A l'univers primitiu es poden formar **Mini FN: 10¹² Kg**, **R_g = 1 Fermi** (radi protó)
-

CAIGUDA A UN FORAT NEGRE

$M = 10M_S$ $r_g = 30$ Km forat negre a 10^8 Km



$$z = \frac{\lambda_{rebuda} - \lambda_{emesa}}{\lambda_{emesa}}$$



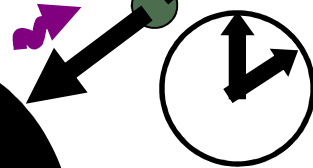
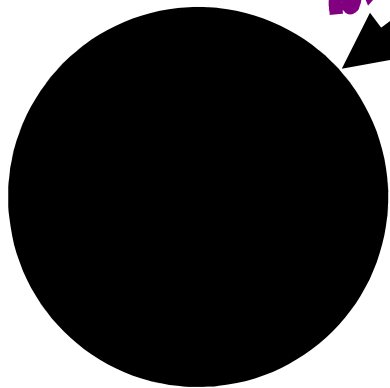
distància Km	z	temps caiguda mes. a B	temps caiguda mes. a A
300	0.05	204 h 33 m 50.1129 s	204 h 33 m 49.6681 s
120	0.15	204 h 33 m 50.1148 s	204 h 33 m 49.6696 s
30.03	30.25	204 h 33 m 50.1162 s	204 h 33 m 49.67012 s
30 r_g	infinít	infinít	204 h 33 m 49.67013 s
15	-----	-----	204 h 33 m 49.67017 s
0	-----	-----	204 h 33 m 49.67020 s

UN FORAT NEGRE NO TE SUPERFÍCIE

FN xucla: l'acceleració de la gravetat (**pes**) es fa infinit a **l'horitzó**

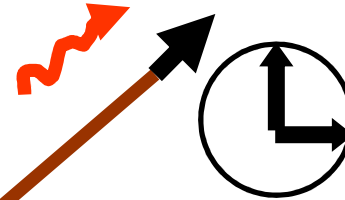
En canvi **lluny** es com si fos newtonià

FORAT



NEGRE

La **llum** que arriba a l'infinit te **freqüència** desplaçada al **roig** (com la llum que prové d'un objecte que s'allunya a **vel** \rightarrow **c**)

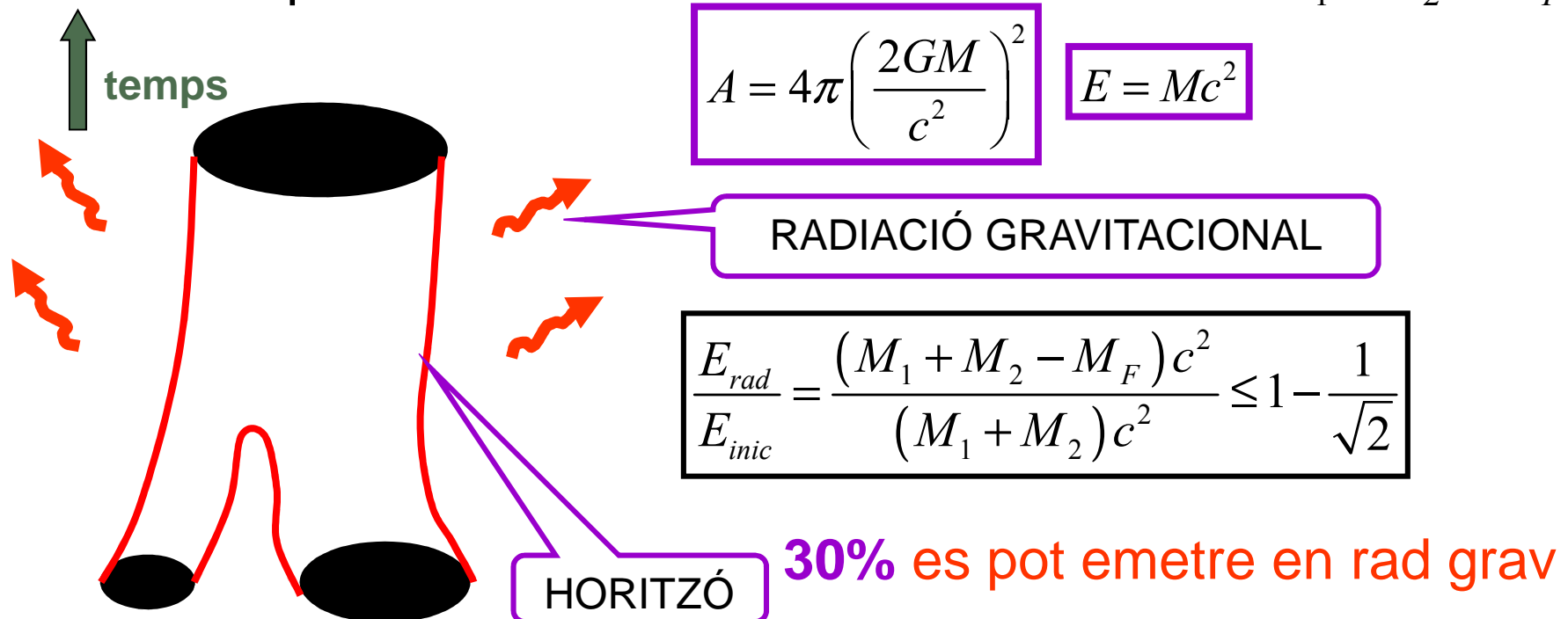


ELS FORATS NEGRES NO ES PODEN DIVIDIR

L'ÀREA DE L'HORIZZÓ D'UN FN NO POT DISMINUIR

→ Un FN no es pot dividir en dos

→ Dos FN poden col.lisionar i formar-ne un tercer $A_1 + A_2 \leq A_F$

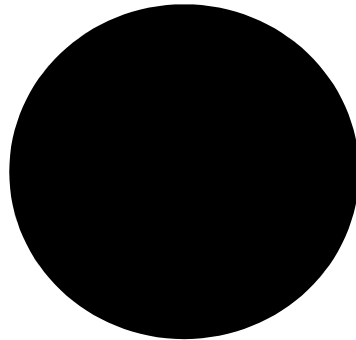


ELS FORATS NEGRES NO TENEN PÈLS

Qualsevol forat negre estacionari queda completament caracteritzat per

- **Massa M**
- **Moment angular J**
- **Càrrega elèctrica Q**

- A la pràctica **M** i **J** (FN elèctricament neutres)
- Els **pèls (irregularitats)** han estat **radiats** durant la formació del FN
- Objectes més **perfectes i simples** de l'univers (**Chandrasekhar, N1983**)



LEIS DE LA MECÀNICA DE FN

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

MECÀNICA FN

PRIMERA LLEI

$$dM = \frac{1}{32\pi M} dA$$

SEGONA LLEI

$$dA \geq 0$$

TERMODINÀMICA

$$dE = TdS$$

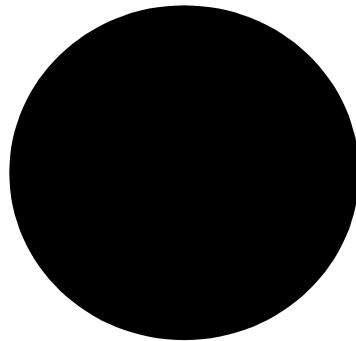
$$dS \geq 0$$

TERMODINÀMICA DE FN

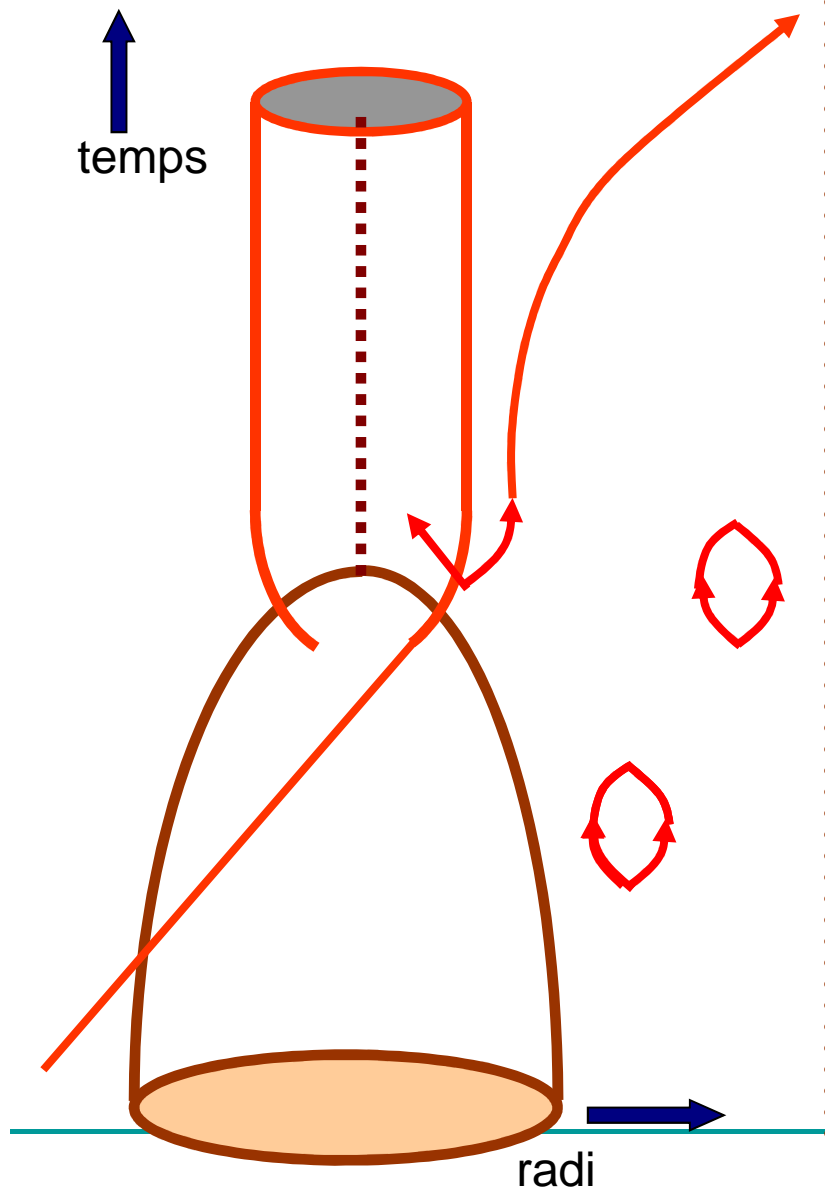
Bekenstein (1973):

Llenço una tassa de café a un FN: l'**entropia** de l'univers disminueix!

Es podria evitar la violació de la llei de l'entropia si els FN tinguessin entropia. Aquesta hauria de ser **proporcional a l'area** del FN



RADIACIÓ DE HAWKING



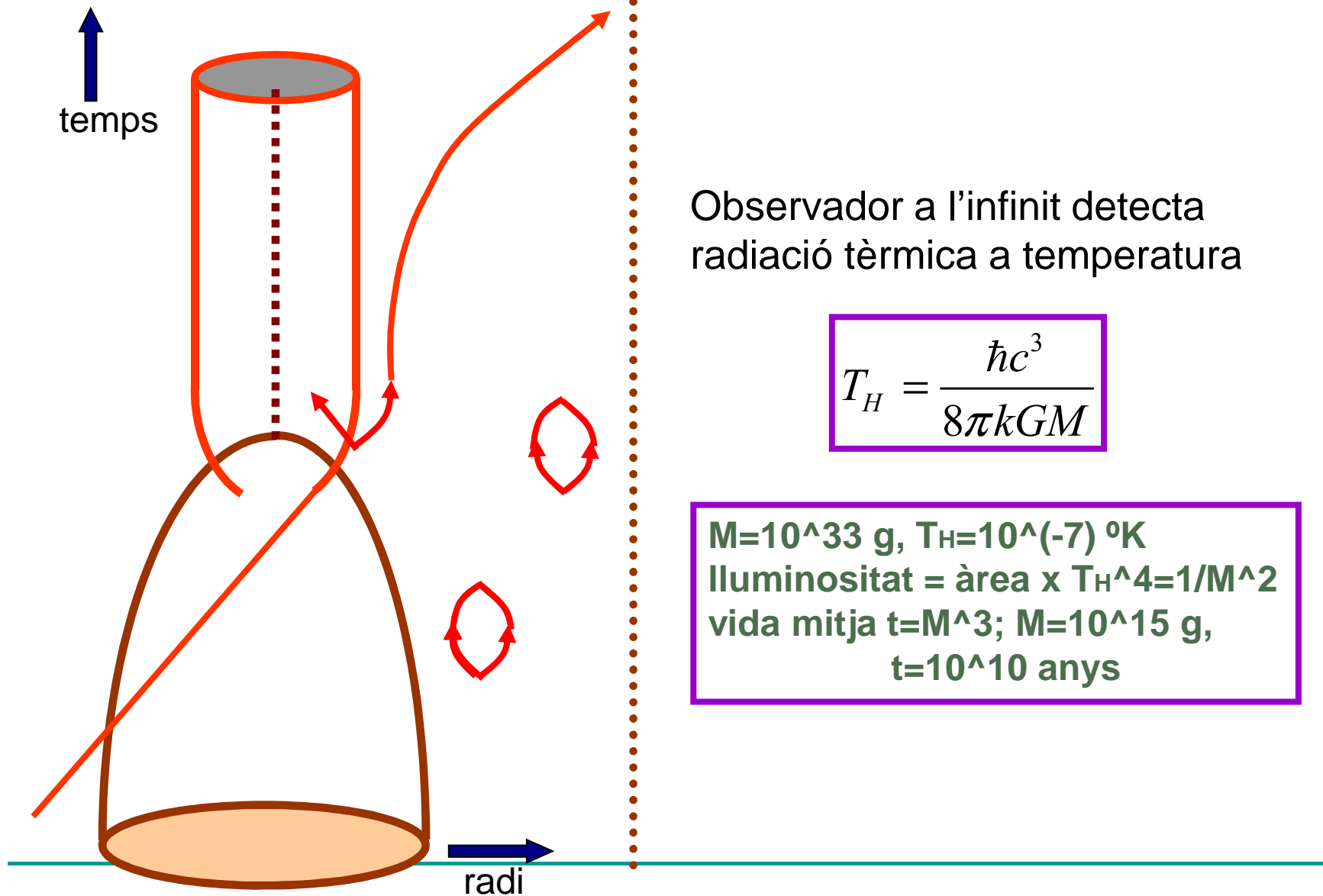
1974. Hawking: mecànica quàntica a l'espai temps FN en formació

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

$$t \geq \hbar / E$$

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

RADIACIÓ DE HAWKING



TERMODINÀMICA DE FN

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

MECÀNICA FN

PRIMERA LLEI

$$dM = \frac{1}{32\pi M} dA$$

SEGONA LLEI

$$dA \geq 0$$

TERMODINÀMICA FN

$$dE = T_H dS$$

(generalitzada)

$$dS' \geq 0$$

$$E = Mc^2$$

energia FN

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

temperatura

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

entropia
àrea horitzó

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

Problemes oberts: origen microscòpic entropia
paradoxa de la informació

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: $M \sim T^4 M^3 G^3 \Rightarrow T \sim M^{-1/2} G^{-3/4}$, $S \sim T^3 (GM)^3$

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

ORIGEN ENTROPIA FORATS NEGRES

- Base física de **temperatura** de FN és clara: radiació Hawking
- Base física **entropia** FN no ho és: l'entropia és

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

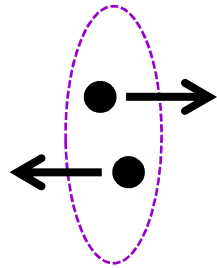
$S_{bh} = A / 4l_p^2 \rightarrow$ el nombre d'estats interns d'un FN és

$$N \sim e^{A/4l_p^2}$$

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

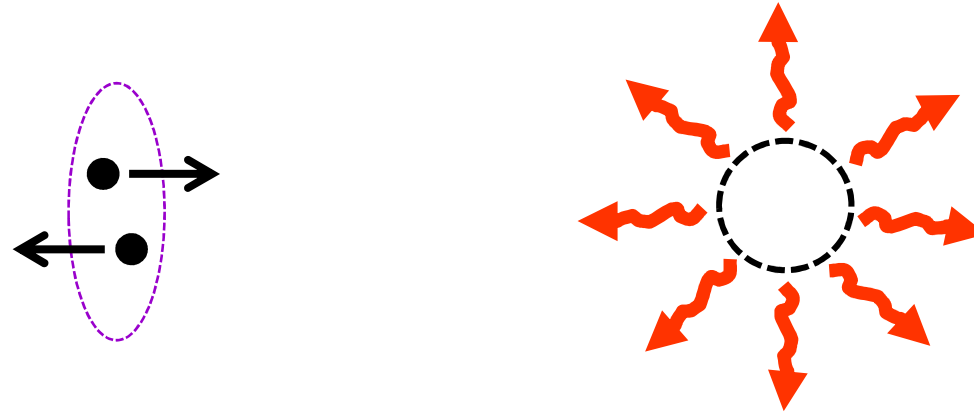
COL.LISIÓ TRANS-PLANCKIANA



Suposem col.lisió amb energia $E \gg M_P$

per explorar distància $d \geq \hbar / E$

COL.LISIÓ TRANS-PLANCKIANA



Suposem col.lisió amb energia $E \gg M_P$

quan l'energia es concentra en radi $R_G \sim GE$ **es forma un FN**

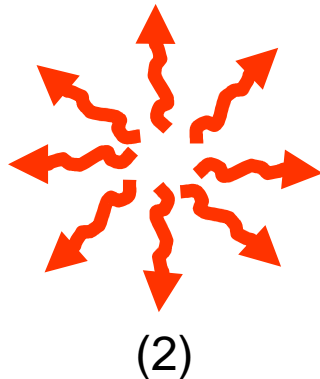
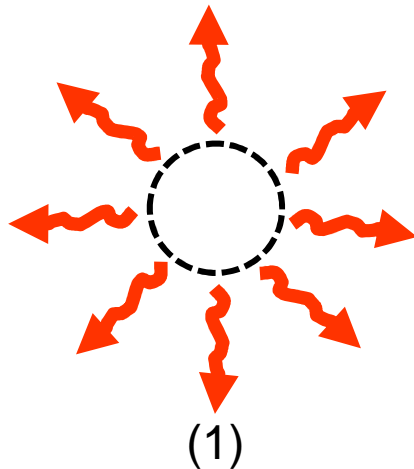
per explorar distància $d \geq \hbar / E$ resulta: $d \ll R_G$

el **FN radia** amb temperatura $T \approx \frac{1}{kR_G}$

partícules poc energètiques $N \approx \frac{E}{kT} \approx GE^2 \approx \left(\frac{E}{M_P}\right)^2 \approx S_{FN} \gg 1$

$$\Delta x \geq \hbar / E + GE$$

EVAPORACIÓ DE FN I INFORMACIÓ

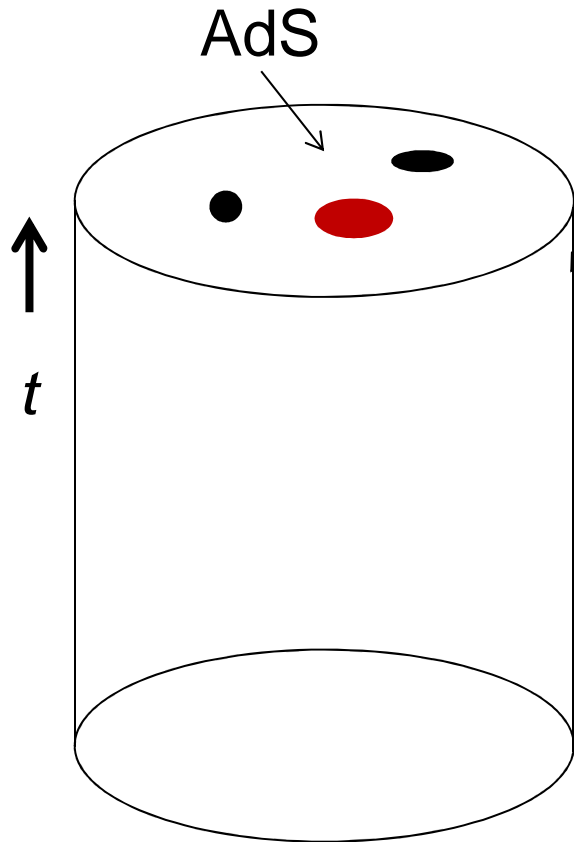


- A (1) tenim estat **pur**, correlacions entre dins i fora
- A (2) no hi ha FN, estat descrit per matriu densitat (**mixt**):
 - **Queda un remanent de massa de Planck** :
Amb prou estats per la info de les correlacions: estat total es pur (**poc probable** tota la info d'un gran FN en estats interns d'una massa de Planck)
 - **Les correlacions es transfereixen en l'evaporació**:
 - a- Major part informació emergeix quan $M \sim M_p$
 - b- Informació **emergeix gradualment** en l'evaporació.
 - c- **Principi de complementarietat**: una membrana sobre l'horitzó que té tota la info i l'emet (obs extern). Un observador a l'interior veu la info a dins.
 - d- **No horitzó** d'esdeveniments (aparent), ni singularitat.

DUALITAT GRAVITACIÓ I TEORIES GAUGE

Una formulació d'una teoria quàntica de la gravitació
Una nova aplicació de la Relativitat General

CORRESPONDÈNCIA AdS/CFT



Teoria de cordes en espai Anti-de Sitter

La frontera es localment plana (no grav)

A la frontera hi podem descriure una teoria conforme (CFT)

Correspondència: La CFT és equivalent a la teoria gravitacional a AdS, hi ha un diccionari entre els dos mons.

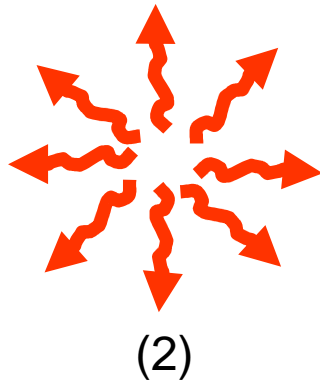
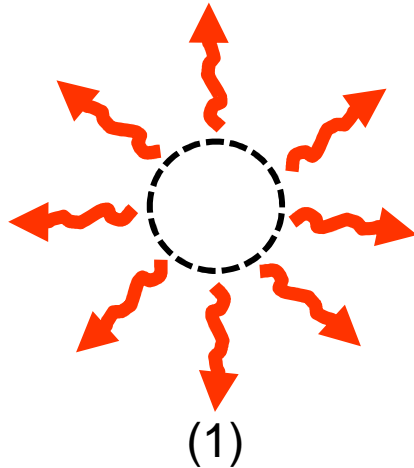
La frontera té una dim menys: **holografia**.

A **baixes** energies la teoria de cordes es descriu per les **eqs d'Einstein**. Correspon a acoblaments **forts** a la CFT.

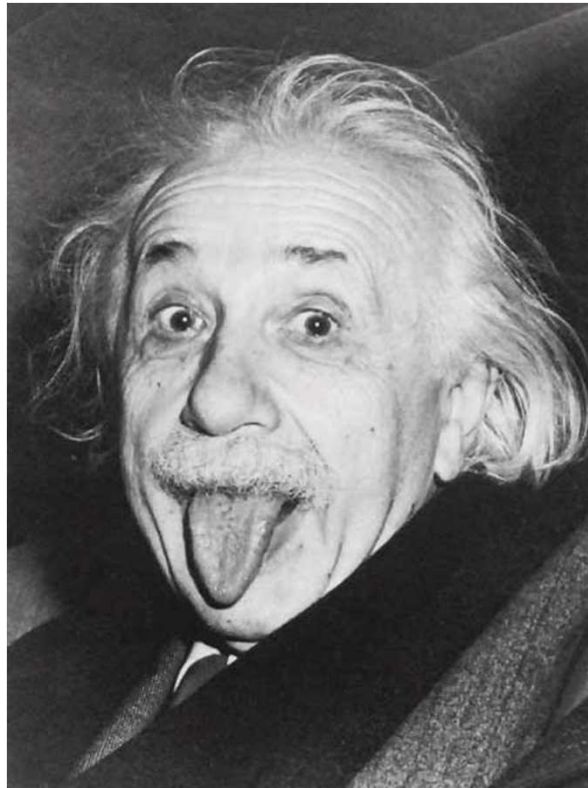
Hi ha diverses correspondències i dimensions

EVAPORACIÓ DE FN I INFORMACIÓ

- A (1) tenim estat pur, correlacions entre dins i fora
- A (2) no hi ha FN, estat descrit per matriu densitat (mixt):



- **La correspondència AdS/QFT:** argument per no pèrdua d'informació. El procés es pot descriure a la frontera de AdS on la teoria quàntica no admet pèrdua d'informació (evolució unitaria).



CONCLUSIONS

- La teoria de la **Relativitat General** és una **teoria efectiva** clàssica que descriu la gravetat des de l'escala de Planck a escales cosmològiques.
 - Descriu univers des de 10^{-35} s (inflació) fins avui (**constant cosmològica**) de manera **consistent**
 - Sotmesa a **proves** des de **mm, planetària** (pN), **galàctica** ($1/r^2$) que **descarten alternatives** (gravetat feble i forta)
-

CONCLUSIONS

- La teoria de cordes dóna una **teoria quàntica de la gravitació**. En el límit de baixes energies dóna la RG, en general involucra dimensions extres i altres camps.
 - En la correspondència **AdS/CFT** la Relativitat General emergeix com una **eina teòrica** per descriure teories no gravitacionals (AdS/QCD, AdS/CMT, gravetat/fluids).
 - Els **forats negres** que són essencials en la RG semblen un enllaç amb la teoria quàntica i encara presenten enigmes per resoldre.
-

MOLTES GRÀCIES!
