

Du rêve à la réalité

Du rêve à la réalité

1975 rêve d'astrophysique



Du rêve à la réalité

1975 rêve d'astrophysique



Années 1970s : Viking I sur Mars



Du rêve à la réalité

Années 1990s : Hubble Telescope



Années 1970s : Viking I sur Mars



1975 rêve d'astrophysique



Du rêve à la réalité

1975 rêve d'astrophysique



Années 1970s : Viking I sur Mars



Années 1990s : Hubble Telescope



1990 Pierre Salati



1990 : Cours de DEA avec Pierre Salati



1990 : Cours de DEA avec Pierre Salati

Cours de DEA
Physique des Particules et Cosmologie

2 Mai 1990

TD n°1 - Énoncé

Exercice 1 le parallaxe (μ) est la distance correspondant à une parallaxe de 1 seconde d'arc. Evaluer un parallaxe en mètres et en années-lumière.

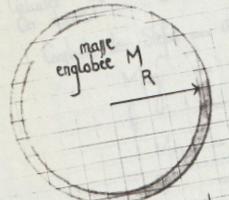
Exercice 2 la relation période - luminosité des δ -Céphéïdes. Certains pulsars, comme les RR Lyrae ou δ -Céphéïdes, se mettent à pulser lorsque la couche externe atteint une température critique engendrant une instabilité de la pulsation radiale de l'enveloppe stellaire excitée par des processus d'échanges thermiques entre la matière stellaire qui, en surface, est partiellement ionisée, et le flux de lumière L .

Le but de l'exercice est de déterminer la période de pulsation. On raisonne sur une couche très mince de masse m .
On utilisera comme variable de distance au centre non pas R mais M .
Ainsi les 2 variables du problème deviennent : $R(M)$ et $P(M)$

rayon R | Période P

a - Écrire l'équation hydro-dynamique reliant $\frac{\partial p}{\partial t}$ et $\frac{\partial a}{\partial t}$ $\frac{GM}{4\pi R^4}$

b - la région développant l'instabilité sera considérée par la suite comme homogène, elle se déforme en bloc. On admet que l'étoile a un état par R_0 et P_0 hydrostatique ou la couche étudiée est caractérisée par $P(M, t) = P_0(M) [1 + p(t)]$
On linéarise le problème en posant : $R(M, t) = R_0(M) [1 + r(t)]$
 p et $r \ll 1$
Pourquoi peut-on poser $\frac{\partial p}{\partial M} = \frac{\partial r}{\partial M} = 0$?




DEA
Cours de cosmologie et de physique des particules.

Cours n°2

Introduction à la Relativité générale
Modèle de Friedmann-Lemaître

Un peu de géométrie non-euclidienne

1a - le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$
1b - l'espace tangent
1c - la connexion affine et la base $\vec{e}_\mu(M)$
1d - la dérivée covariante D_ν
1e - le transport parallèle et la géodésique
1f - le tenseur de Riemann-Christoffel $R^\mu_{\nu\alpha\beta}$ et de Ricci $R_{\mu\nu}$

2 - le tenseur impulsion-énergie $T^{\mu\nu}$

2a - Définition
2b - Cas d'un gaz parfait $T^{\mu\nu} = (P+p)U^\mu U^\nu - P g^{\mu\nu}$
2c - la conservation de l'impulsion-énergie $\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$
2d - Un peu plus sur la conservation de l'impulsion-énergie $T^{\mu\nu}_{; \nu} = 0$

3 - les équations de la relativité générale
Principe d'équivalence et identité entre géométrie et impulsion-énergie $R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$

4 - Application au modèle d'univers de Friedmann-Lemaître.

4a - un modèle naïf de Robertson et Walker
4b - la métrique du modèle et
4c - les équations du modèle et Walker dans un cas simple

$\frac{\dot{R}}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{R^2}$
 $\frac{d}{dt} (R^3) = -3PR^2 \dot{R}$

1990 : Cours de DEA avec Pierre Salati

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\theta\theta} &= \partial_d \Gamma^d - \partial_\theta \Gamma^d + \Gamma^d \Gamma^\sigma - \Gamma^\sigma \Gamma^d \\
 &= \partial_r \Gamma^r + \partial_\theta \Gamma^\theta + \partial_\varphi \Gamma^\varphi + \Gamma^r \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} + \Gamma^\theta \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} + \Gamma^\varphi \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} + \Gamma^0 \{ 3H \} \\
 &\quad - 2 \Gamma^d \Gamma^0 - \left\{ \Gamma^d \Gamma^i = \Gamma^r \Gamma^r + \Gamma^\theta \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \Gamma^\varphi \right\} \\
 &= \partial_r \left\{ \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R^2} \right\} + \partial_\theta \left\{ -(1-hr)^2 \right\} - \partial_\theta \omega \varphi \theta + \frac{hr}{1-hr^2} \cdot r(1-hr)^2 - r(1-hr)^2 \cdot \frac{2}{r} \\
 &\quad + \partial_\theta H \Gamma^0 - 2H \Gamma^0 - \left\{ -r(1-hr)^2 \frac{1}{r} - r(1-hr)^2 \frac{1}{r} + \omega \varphi \theta \right\} \\
 &= r^2 \left\{ \ddot{R}R + \dot{R}^2 - \frac{2\dot{R}^2}{R} + 2hr^2 - \omega \varphi \theta \right\} - \frac{2}{r} - 2(1-hr)^2 \\
 &\quad + \frac{\dot{R}}{R} - \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R^2} + 2(1-hr)^2 - \omega \varphi \theta \\
 &= r^2 \left\{ \ddot{R}R + 2\dot{R}^2 + 2h \right\} = -\partial_{\theta\theta} \left\{ \frac{\ddot{R}}{R} + 2\frac{\dot{R}^2}{R^2} + 2\frac{h}{R^2} \right\} \\
 \\
 \sigma_{\varphi\varphi} &= \partial_d \Gamma^d - \partial_\varphi \Gamma^d + \Gamma^d \Gamma^\sigma - \Gamma^\sigma \Gamma^d \\
 &= \partial_r \Gamma^r + \partial_\theta \Gamma^\theta + \partial_\varphi \Gamma^\varphi + \Gamma^0 \{ 3H \} + \Gamma^r \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} + \Gamma^\theta \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} + \Gamma^\varphi \left\{ \Gamma^r + \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \right\} \\
 &\quad - 2 \Gamma^d \Gamma^0 - \left\{ \Gamma^d \Gamma^i = \Gamma^r \Gamma^r + \Gamma^\theta \Gamma^\theta + \Gamma^\varphi \Gamma^\varphi \right\} \\
 &\quad \begin{matrix} i=r & i=\theta & i=\varphi \\ j=\varphi & j=\varphi & j=r \text{ or } \theta \end{matrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \partial_r \left\{ \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R^2} \sin^2 \theta \right\} + \partial_\theta \left\{ -(1-hr)^2 \sin^2 \theta \right\} + \partial_\theta \left\{ -\sin^2 \cos \theta \right\} + \partial_\varphi \Gamma^0 + \frac{hr}{1-hr^2} \cdot r(1-hr)^2 \sin^2 \theta \\
 &\quad + \omega \varphi \theta - \sin^2 \cos \theta - 2H \Gamma^0 - \left(2 \cdot \sin^2 \cos \theta \cdot \omega \varphi \theta \right)
 \end{aligned}$$

1990 : Cours de DEA avec Pierre Salati

$$\begin{aligned}
 a_{\theta\theta} &= \partial_d \Gamma^d_{\theta\theta} - \partial_\theta \Gamma^d_{d\theta} + \Gamma^d_{d\theta} \Gamma^\theta_{\theta d} - \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} \\
 &= \partial_r \Gamma^r_{\theta\theta} + \partial_\theta \Gamma^\theta_{\theta\theta} - \partial_\theta \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^r_{\theta\theta} \left\{ \Gamma^r_{\theta\theta} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} \right\} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} \{ 3H \} \\
 &\quad - 2 \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} - \left\{ \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} \right\} \\
 &= \partial_r \left\{ \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R^2} \right\} + \partial_\theta \left\{ -(1-kr^2) \right\} - \partial_\theta \omega \theta + \frac{kr}{1-kr^2} - r(1-kr^2) - r(1-kr^2) \frac{2}{r} \\
 &\quad + 3H \Gamma^\theta_{\theta\theta} - 2H \Gamma^\theta_{\theta\theta} - \left\{ -r(1-kr^2) \frac{1}{r} - r(1-kr^2) \frac{1}{r} + \omega \theta \right\} \\
 &= r^2 \left\{ \ddot{R}R + \dot{R}^2 - \frac{2\dot{R}^2}{R} + 2kr^2 \right\} - \frac{2\dot{R}^2}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R} - 2(1-kr^2) \\
 &= r^2 \left\{ \ddot{R}R + 2\dot{R}^2 + 2k \right\} = -g_{\theta\theta} \left\{ \ddot{R}R + 2\dot{R}^2 + 2k \right\} \\
 \\
 -R &= \partial_d \Gamma^d_{\theta\theta} - \partial_\theta \Gamma^d_{d\theta} + \Gamma^d_{d\theta} \Gamma^\theta_{\theta d} - \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} \\
 &= \partial_r \Gamma^r_{\theta\theta} + \partial_\theta \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} \{ 3H \} + \Gamma^r_{\theta\theta} \left\{ \Gamma^r_{\theta\theta} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^\theta_{\theta\theta} \right\} \\
 &\quad - 2 \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} - \left\{ \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \Gamma^d_{\theta d} \Gamma^\theta_{\theta\theta} \right\} \\
 &\quad \begin{matrix} i=\theta \\ j=\theta \end{matrix} \\
 &= \partial_r \left\{ \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\dot{R}^2}{R^2} \right\} + \partial_\theta \left\{ -(1-kr^2) \sin^2 \theta \right\} + \partial_\theta \left\{ -\sin^2 \theta \right\} + 3H \Gamma^\theta_{\theta\theta} + \frac{kr}{1-kr^2} - (1-kr^2) \frac{2}{r} \\
 &\quad + \omega \theta - \sin^2 \theta - 2H \Gamma^\theta_{\theta\theta} - \left\{ 2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \omega \theta \right\}
 \end{aligned}$$

After 3 pages of algebra we have recovered the equation

$$H^2 = \frac{\dot{R}^2}{R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

energy density
Curvature
Cosmological Constant

If we define the critical density ρ_c by $H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_c$ and if we assume a constant vanishing cosmological constant, we have

- $\rho > \rho_c$ then $k > 0$ and the space is spherical positive curvature the space is closed
- $\rho = \rho_c$ $k = 0$ the space is flat
- $\rho < \rho_c$ the curvature k is negative. The space is hyperbolic

Let us consider now the spatial components of the general relativity equations:

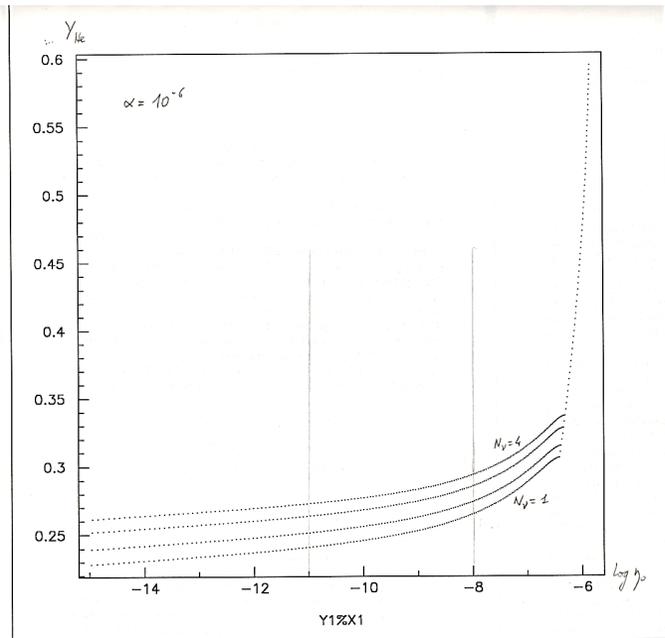
$$G_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} (R + 2\Lambda) = 8\pi G T_{ij} = -8\pi G \rho g_{ij}$$

$$- \left\{ \frac{\dot{R}}{R} + 2 \frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{2k}{R^2} \right\} - \frac{1}{2} \left\{ -6 \left\{ \frac{\dot{R}}{R} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} \right\} + 2\Lambda \right\} = -8\pi G \rho$$

$$2 \frac{\dot{R}}{R} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} - \Lambda - \frac{\dot{R}}{R} - 2 \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{2k}{R^2} = -8\pi G \rho$$

$$\frac{2\dot{R}}{R} + \frac{8\pi G \rho}{3} + \frac{\Lambda}{3} - \Lambda = -8\pi G \rho$$

1990 : Stage de DEA avec Pierre Salati



Date: 3 MAY 90 14:03:22.94-GMT
 From: SALATI@FRLAPP51
 Subject: chem_dec.for
 To: SALATI@CERNVM

```

EXTERNAL FREEZE
COMMON/DATA/xM,SVA
OPEN(unit=10,file='CHEM_DEC.R',status='NEW')

C   La masse de la particule est notee xM (GeV) et sa
C   section efficace d'annihilation dans la limite non
C   relativiste SVA (barns).

xM = 1.0
SVA = 1.0

DO 1 n = 1, 201
C   On calcule le point de gel chimique aF en fonction de SVA
CALL RZERO(1.0,80.0,aF,AAA,1.0E-04,200,FREEZE)
FASY = Fequi(aF) / ( 1. + 2. * aF )
Omega = 2. * xM * (1.8E-24/2.0E-29) * FASY * (1.95**3) * 83.22
WRITE(10,100) SVA, aF, Omega
100  FORMAT(10x,E10.4,10x,F6.2,10x,E10.4)
SVA = SVA * ( (1.0E-15)**(1./200.) )
1   CONTINUE

STOP
END
C   *****
FUNCTION FREEZE(a,i)
COMMON/DATA/xM,SVA
xNF = 5.0
xMPLAN = 1.22E19
pi = 3.14159
Annihi = xM * SVA * (2562.4) * Fequi(a) / a
Expans = 2 * a * SQRT(8. * pi**3 * xNF / 45.) / xMPLAN
FREEZE = Annihi - Expans
RETURN
END
C   *****
FUNCTION Fequi(a)
pi = 3.14159
Fequi = a**1.5 * exp(-a) / SQRT(2. * pi**3)
RETURN
END
    
```



Photo de Pierre au CERN

1992 : Thèse dans Virgo... et beaucoup de bébés!



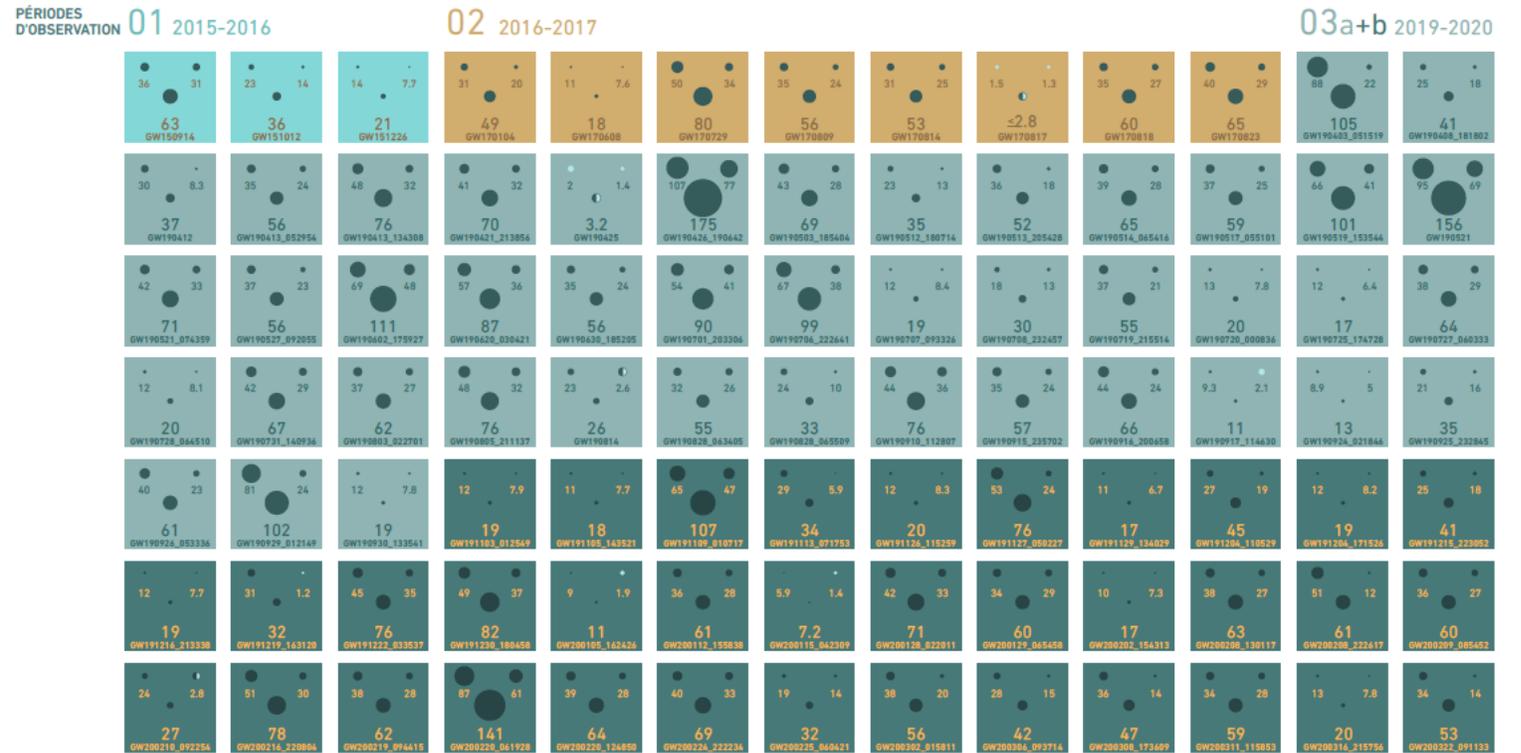
1997-2021 : Expérience Virgo

DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

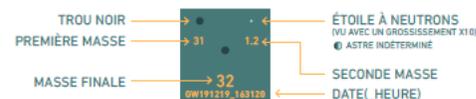
→ DEPUIS 2015

Une belle aventure!

Ci-contre: les 91 détections d'ondes gravitationnelles réalisées depuis entre septembre 2015 et avril 2020



LÉGENDE



LES UNITÉS SONT EN MASSE SOLAIRE
 1 MASSE SOLAIRE = 1.989×10^{30} KG

L'estimation des masses n'inclut pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois être supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale reste toujours inférieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné.

Les événements recensés ici ont passé un des 2 critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.



1997-2021 : Expérience Virgo

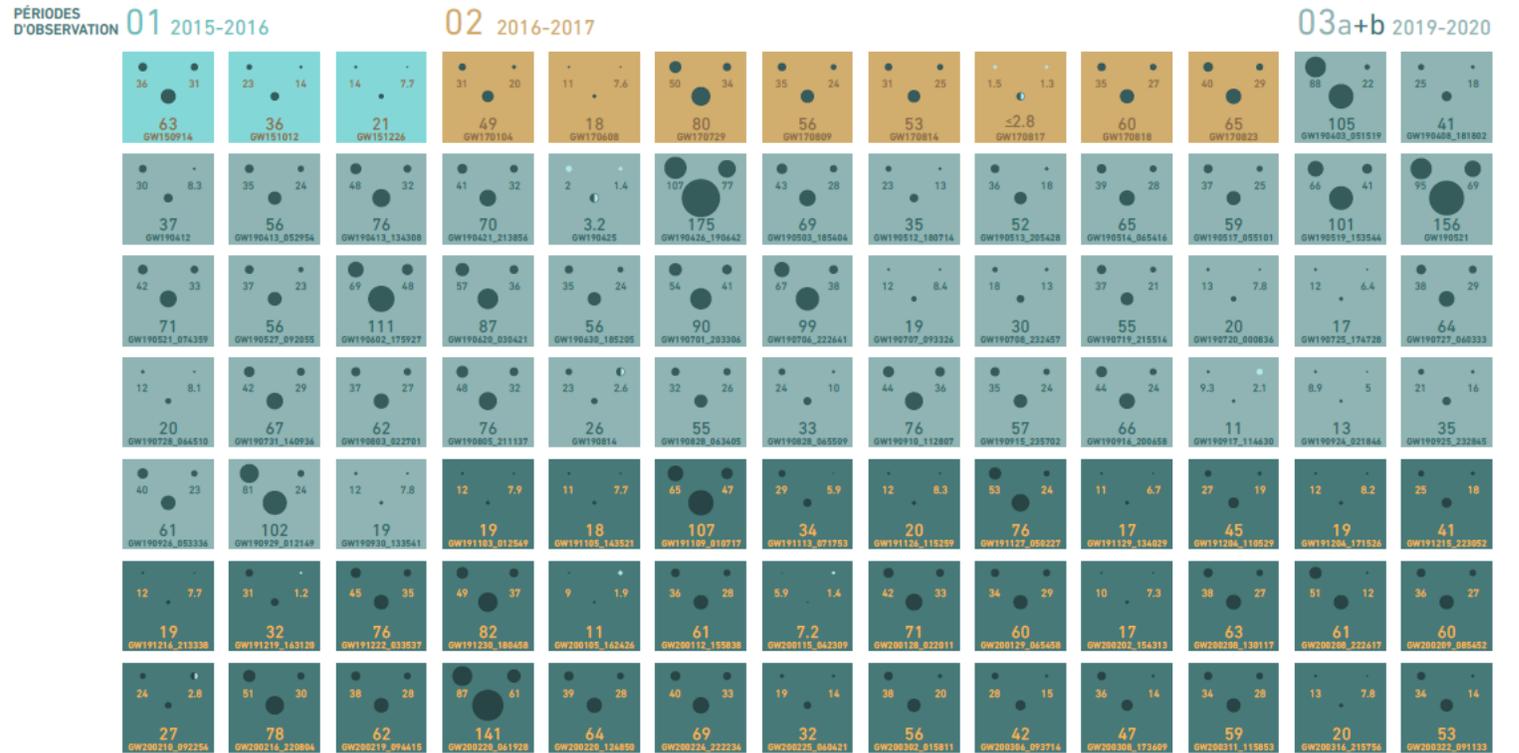
DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

→ DEPUIS 2015

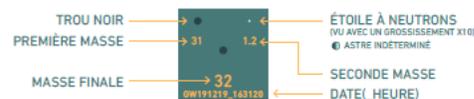
Une belle aventure!

Ci-contre: les 91 détections d'ondes gravitationnelles réalisées depuis entre septembre 2015 et avril 2020

Merci Pierre de m'avoir donné des ailes!



LÉGENDE



LES UNITÉS SONT EN MASSE SOLAIRE
 1 MASSE SOLAIRE = 1.989×10^{30} KG

L'estimation des masses n'inclut pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois être supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale reste toujours inférieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné.

Les événements recensés ici ont passé un des 2 critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.

