

Mise en lumière des Sursauts gamma

Karelle Siellez

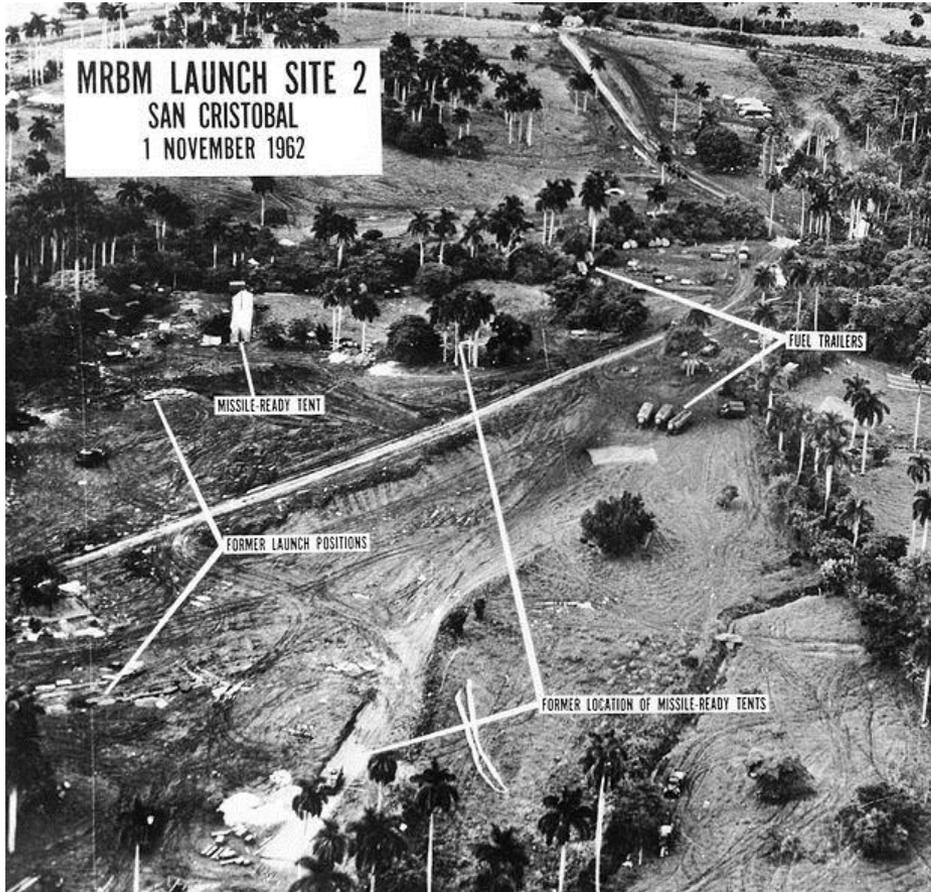
Doctorante à ARTEMIS -

Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

Superviseur : Michel Boer

Un peu d'histoire ...

Crise de Cuba en octobre 1962



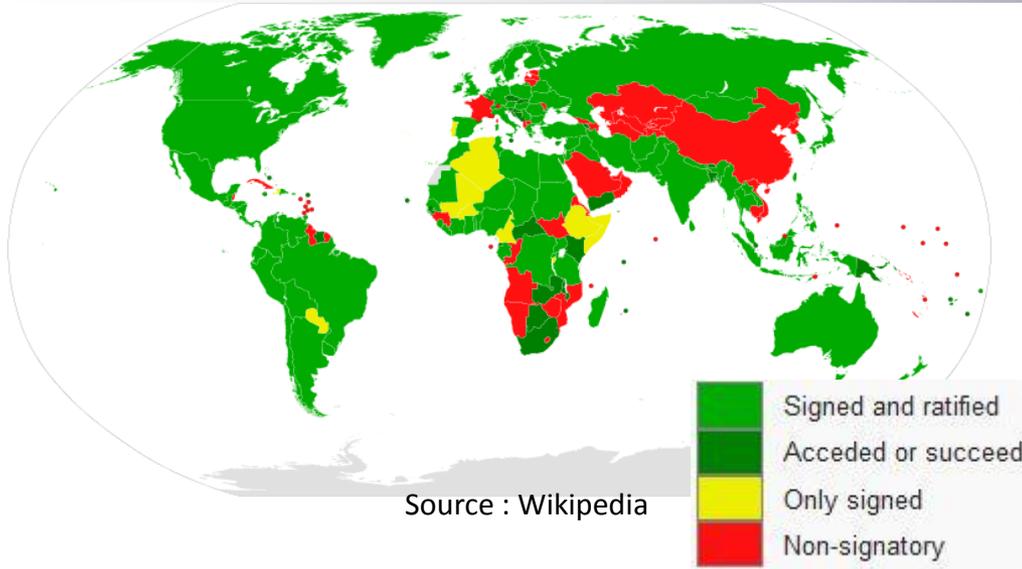
Photographie aérienne des missiles nucléaires soviétiques installés à Cuba.

Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires, signé le 5 août 1963 à Moscou

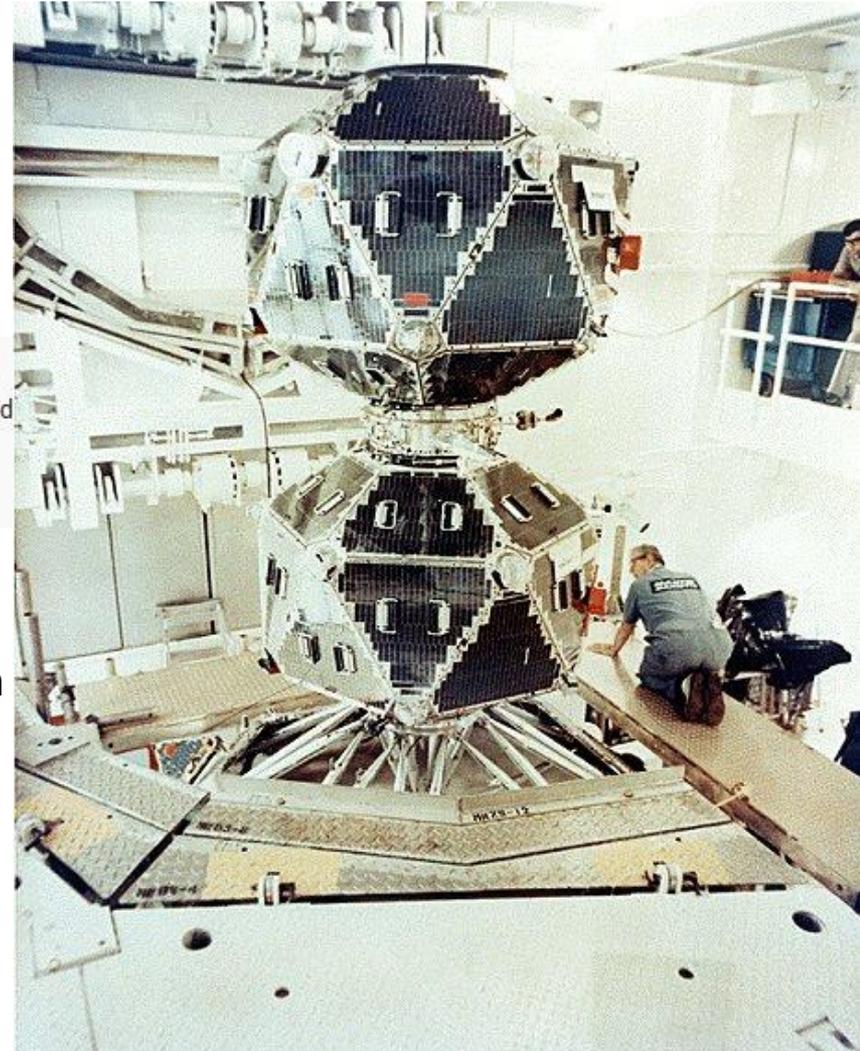


Le Secrétaire d'État Dean Rusk (pour les États-Unis d'Amérique), le Ministre des Affaires Étrangères, Andre Gromyko (Union Soviétique); et Lord Hume (Royaume-Uni). Photo : OTICE.

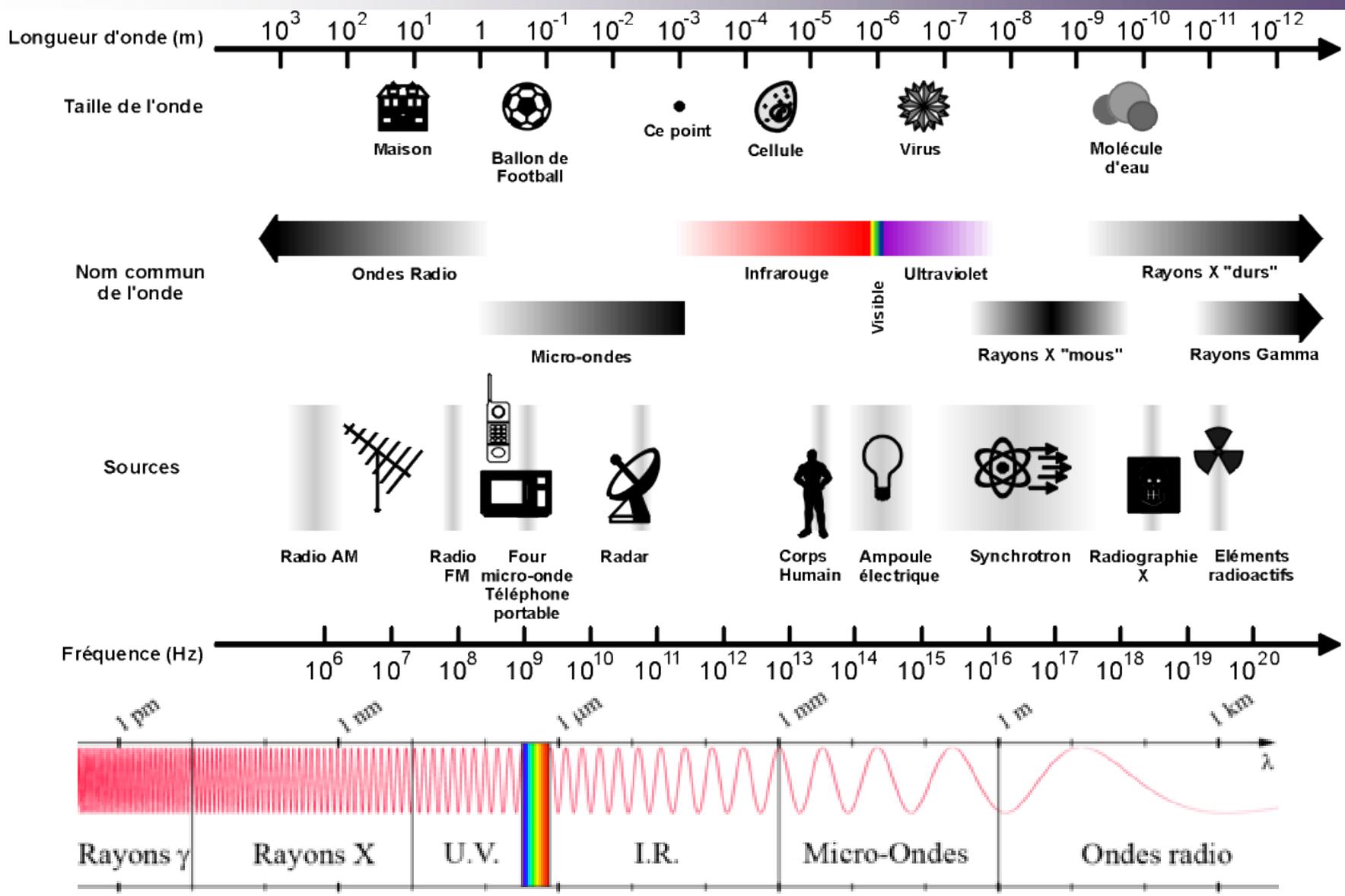
Encore un tout petit peu d'histoire ...



- Envoi de 12 satellites Vela entre 1963 et 1970
- 2 juillet 1967 : Détection d'un flash de radiation gamma de signature inconnue par Vela 3 et 4
- 1970 : Après 16 détections venant du ciel => données exploitées par les scientifiques
- 1973 : Publication dans ApJ : premier sursaut gamma



La lumière



De l'énergie ...

Energie => en Calories

Calorie : quantité de chaleur
nécessaire pour élever d'un degré,
un gramme d'eau dégazéifié sous
un bar de pression



De l'énergie ...

2.5 kg de spaghetti



Obtenir un broc de café



1 part de gateau



60W pendant 1h30



De l'énergie ...



= une voiture roulant pendant 88 miles (140km)

De l'énergie ...

Joules ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)



1 J

Calorie



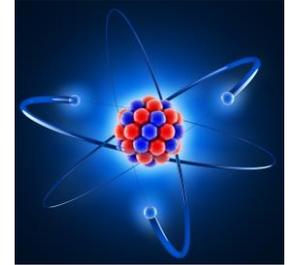
1 cal = 4,18 J

Kilowatt-heure



1 kWh = $3,6 \cdot 10^6$ J

Electron-volt



1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

1 erg = 10^{-7} J



Domaine des Hautes Energies :

- Rayons X = 100 eV - 100 keV
- Rayons Gamma : au delà de 50 keV

Qu'est-ce qu'un sursaut gamma ?

De brèves et intenses bouffées de lumière gamma

Une "explosion" très énergétique

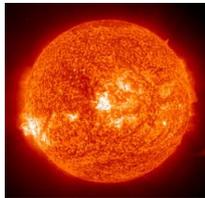
Source : Bruce Gendre

Energie

10^{11} erg
Grille pain ~1 min



10^{34} erg
Soleil ~1s



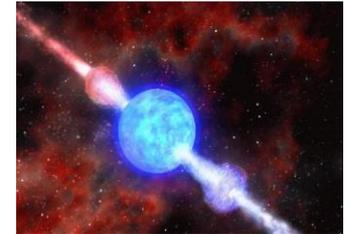
10^{43} erg
Galaxie ~1s



10^{50} erg
Supernova ~jours



10^{52} erg
Sursaut gamma
~100 s



Les explosions les plus violentes de l'univers

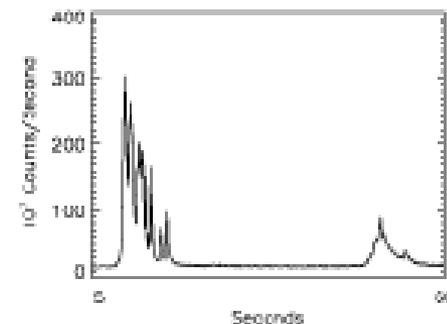
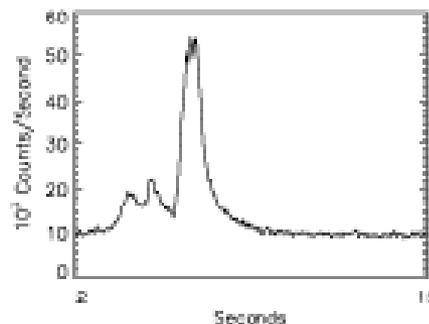
~ 280 millions de millions de fois la luminosité du Soleil en quelques secondes

~ 5 fois l'énergie de masse du Soleil rayonnée de manière isotrope en quelques secondes pour le sursaut le plus brillant

Différentes émissions

Emission prompt :

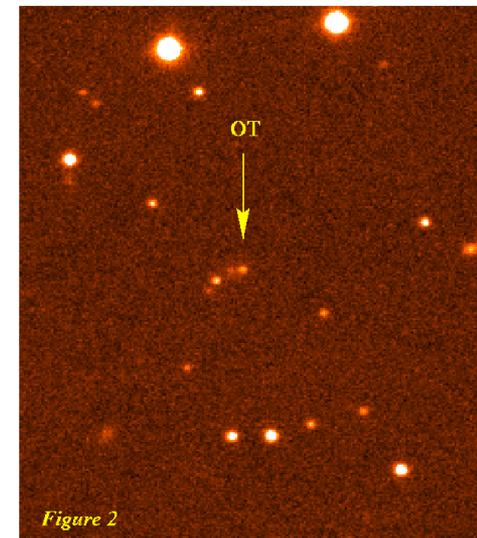
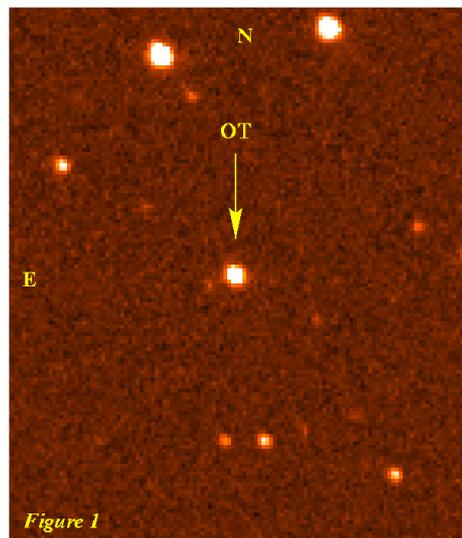
- Première partie d'émission du sursaut gamma
- Emission Gamma/X
- Durée différentes pour chaque burst
- Durée typique de ~ 20 seconds
- La plus long sursauts : + de 2000 secondes
- Le plus court sursaut : quelques millisecondes



Source : Bruce Gendre

Suivi d'une émission rémanente

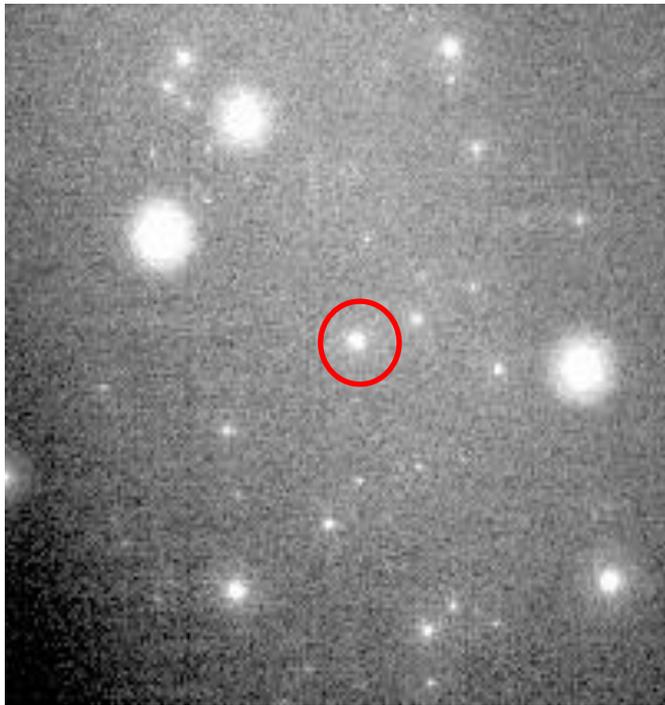
- Visibles à toutes les longueurs d'onde (du X au radio)
- Durée : quelques jours à quelques mois



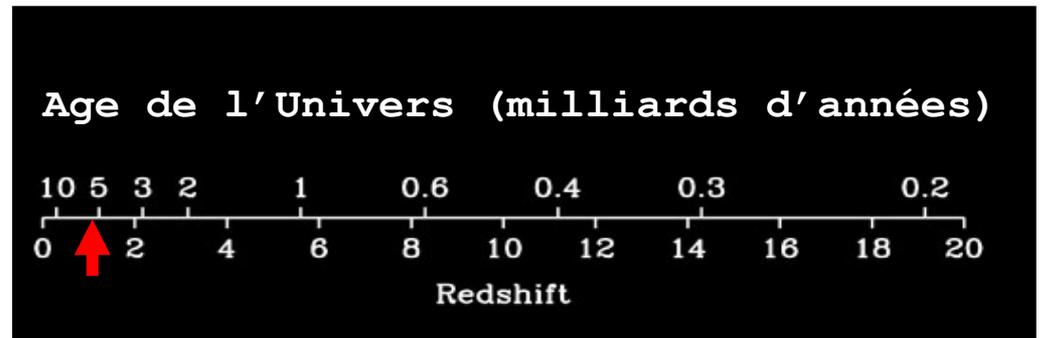
De vrais phares dans l'univers !

GRB 080319B : un sursaut visible à l'oeil nu

- $z = 0,973$ i.e. trajet de $\sim 7,5$ milliards d'années pour la lumière
- Age de l'Univers ~ 6 milliards d'années après le Big-Bang



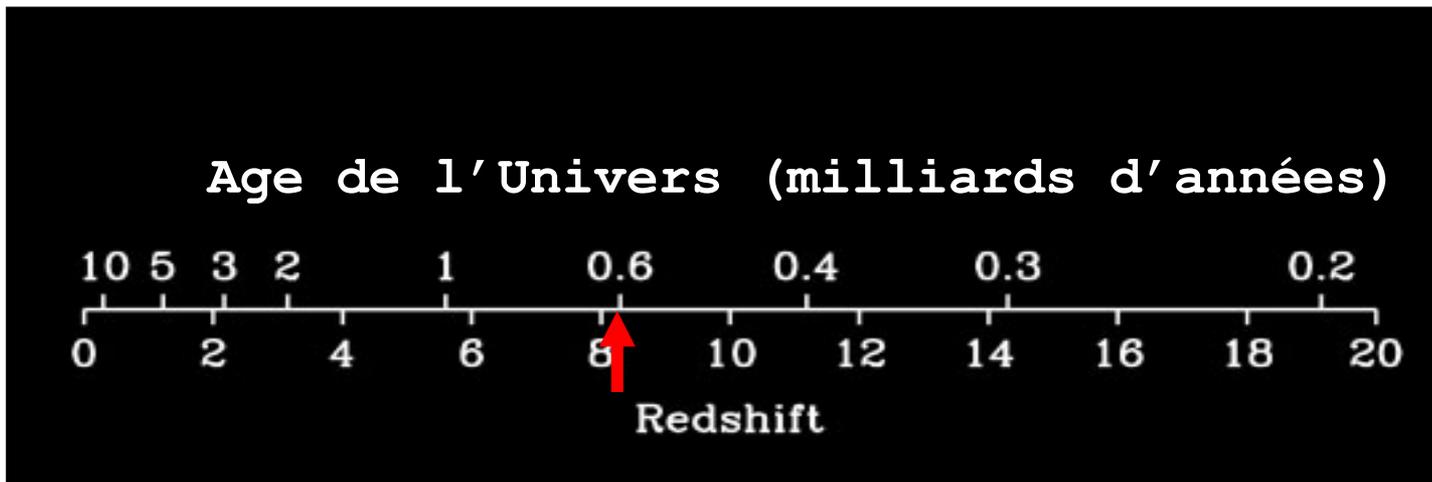
source : Olivier Godet



Vers l'infini et au delà ...

GRB 090423 : l'un des objet les plus lointain de l'Univers!

- $z = 8,2$ i.e. un trajet de ~ 13 milliards d'années pour la lumière
- Age de l'Univers ~ 600 millions d'années après le Big-Bang
- Confirmation de l'existence des étoiles à cette époque!!





La lumière

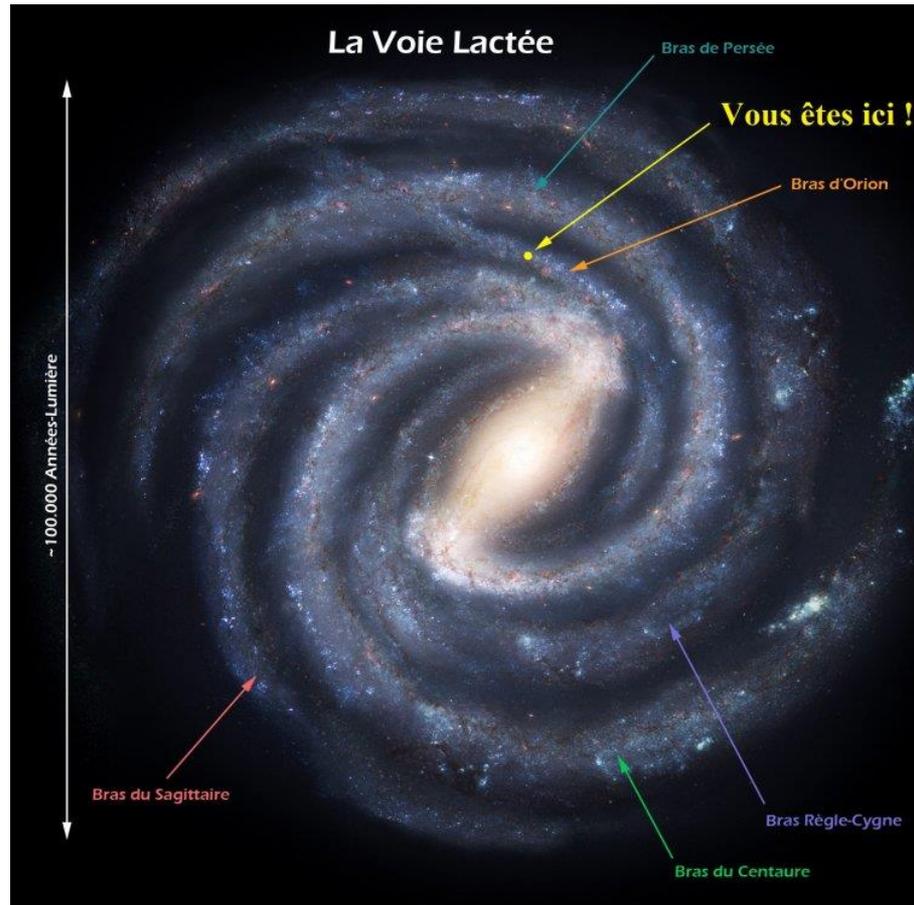
*Sachant que la lumière parcourt
300000 km en une seconde,
quelle distance parcourra t elle
en 1 an ?*

94600000000000 km



Taille de notre galaxie

9460000000000000000 km



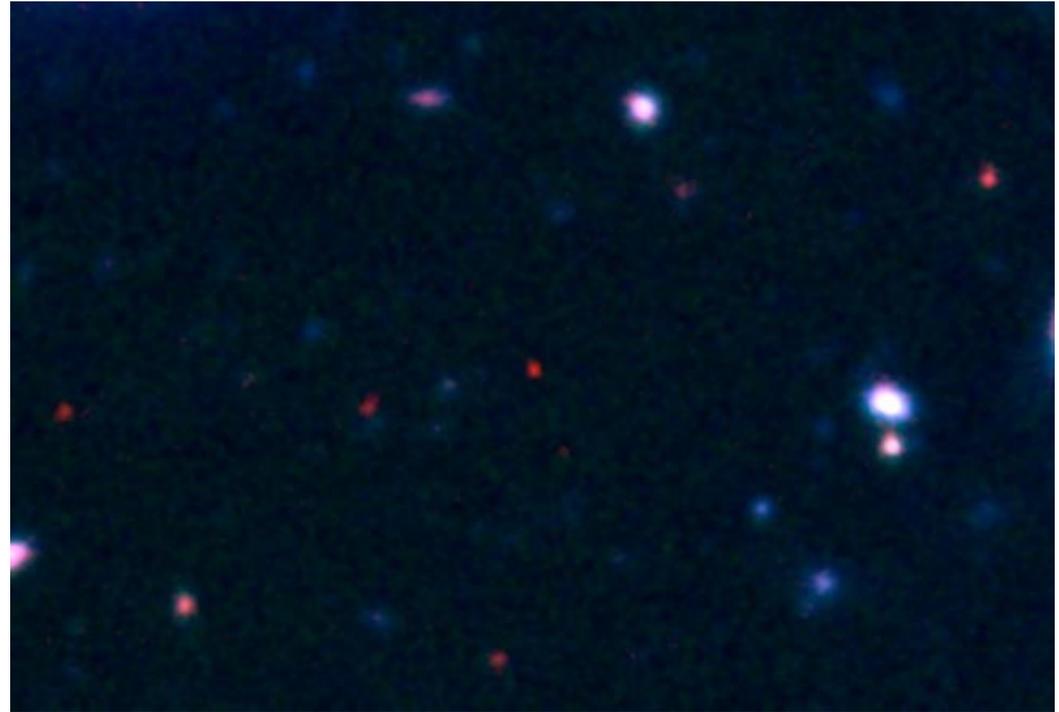
Six jours plus tard...

GRB 090429B, $z=9,4 \Rightarrow 13,14$ milliards d'années.

Le point rouge au centre de l'image est ce qui reste de GRB 090429B. Il s'agit d'une image composite (optique et infrarouge) de l'observatoire Gemini. Ce point rouge résulte de l'absence de lumière visible qui a été absorbé par l'hydrogène de l'Univers lointain // Credit : Gemini Observatory/AURA/Andrew Levan (Univ. of Warwick, UK)

30 arcsec

GRB 090429B vu du télescope à rayons X de Swift qui a imagé le flash moins de 107 secondes après le déclenchement du sursaut gamma // Crédit image : NASA / Swift / Stefan Immler



Monsieur Neil Gehrels nous explique ...



Exactement,
Monsieur
Gehrels

« Cette explosion s'est produite à la frontière cosmique, parmi les premières étoiles à s'être formées dans notre Univers » (Goddard Space Flight Center).

Comment observer ces sursauts ...

Envoi de satellites dédiés :

- BeppoSax : 1996 - 2002
- HETE-2 : 2000 - 2006
- CGRO : 1991 - 2000
- **Swift – 2004**
- Konus-Wind : 1994
- **Fermi : 2008**
- *SVOM : 2018*

Observations au sol avec

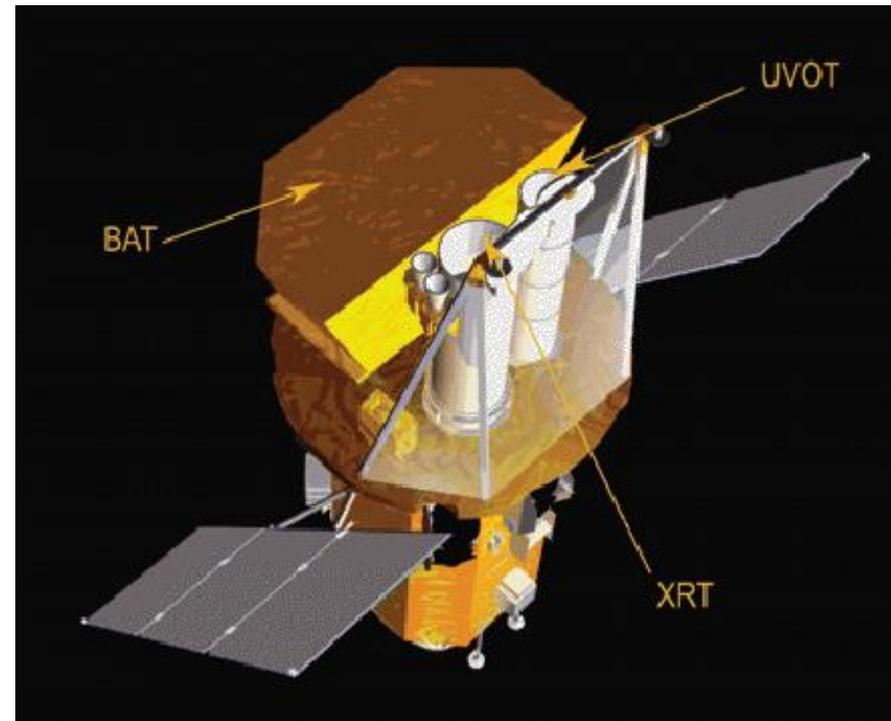
- utilisation de télescopes déjà existants : VLT, Gemini

- Construction de télescopes dédiés : Tarot et Zadko



Trois instruments :

- **BAT : Burst Alert Telescope**, ou **BAT**, télescope de sursaut gamma, de 15 à 350 keV d'énergie pour repérer et calculer les coordonnées, et obtenir un spectre entre 15 et 150 keV.
- **UVOT: UltraViolet/Optical Telescope**, ou **UVOT**, télescope UV/Optique de 170 à 650 nm pour des images et le suivi.
- **XRT : télescope à rayons-X** de 0.2 à 10 keV d'énergie. Il permet d'affiner le repérage jusqu'à quelques secondes d'arc près.



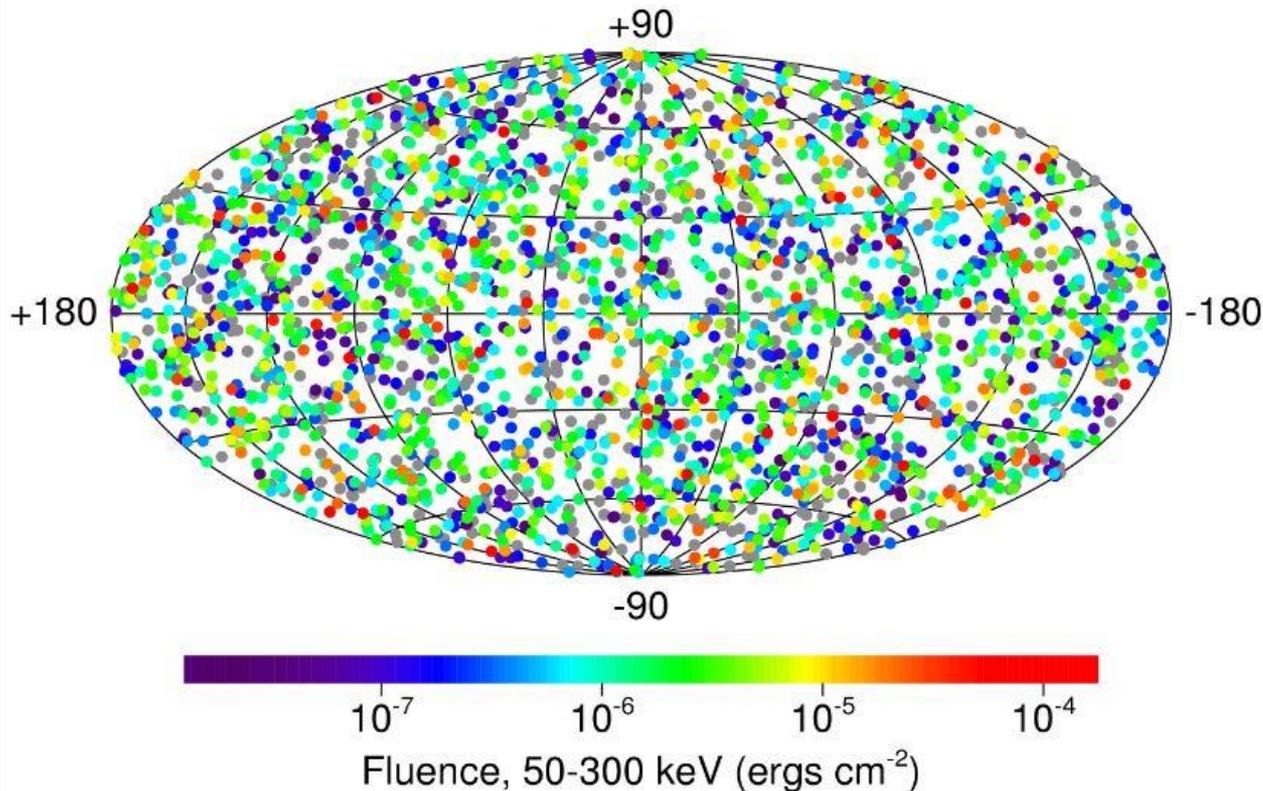
source NASA

Merci BATSE!

Origine des sursauts extragalactique !

Distribution isotropique

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



localisation de 2704 sursauts du satellite BATSE – source NASA

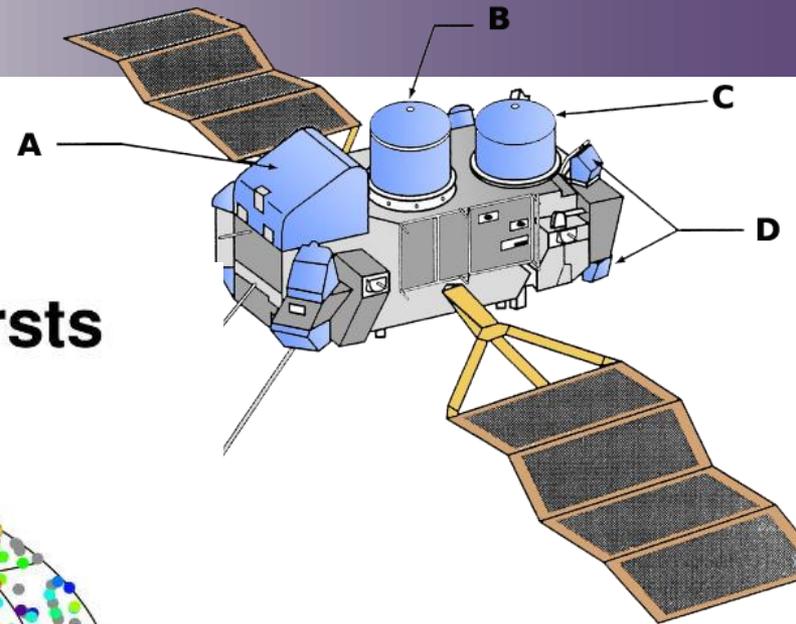


Schéma de l'observatoire gamma CGRO : : A = instrument OSSE ; B = instrument COMPTEL ; C = instrument EGRET ; D = deux des huit détecteurs BATSE

Un Trou Noir!

L'énergie nécessaire est fournie par l'accrétion d'une importante quantité de matière résiduelle sur un trou noir stellaire lors de sa formation.

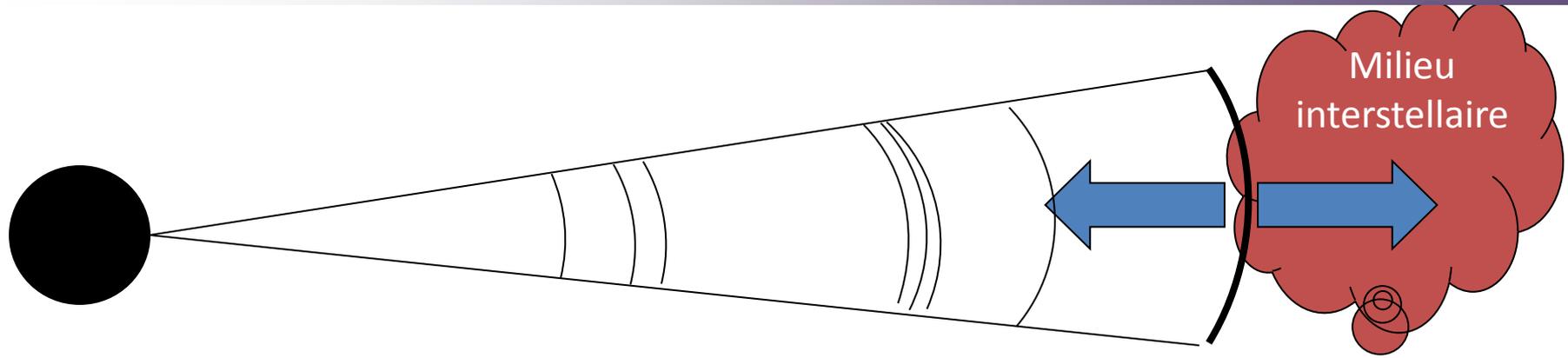
Une "explosion" qui signale la formation d'un trou noir stellaire

Une "explosion" qui va produire une boule de feu

- composée d'électrons, positrons, et de baryons
- accélérée à des vitesses ultra-relativistes



Le modèle de la boule de feu



Source : Bruce Gendre

Un progéniteur éjecte de la matière sous forme de couches

- plusieurs couches avec des vitesses relativistes différentes
- éjection focalisée vers l'observateur

Certaines couches rattrapent les autres : chocs internes

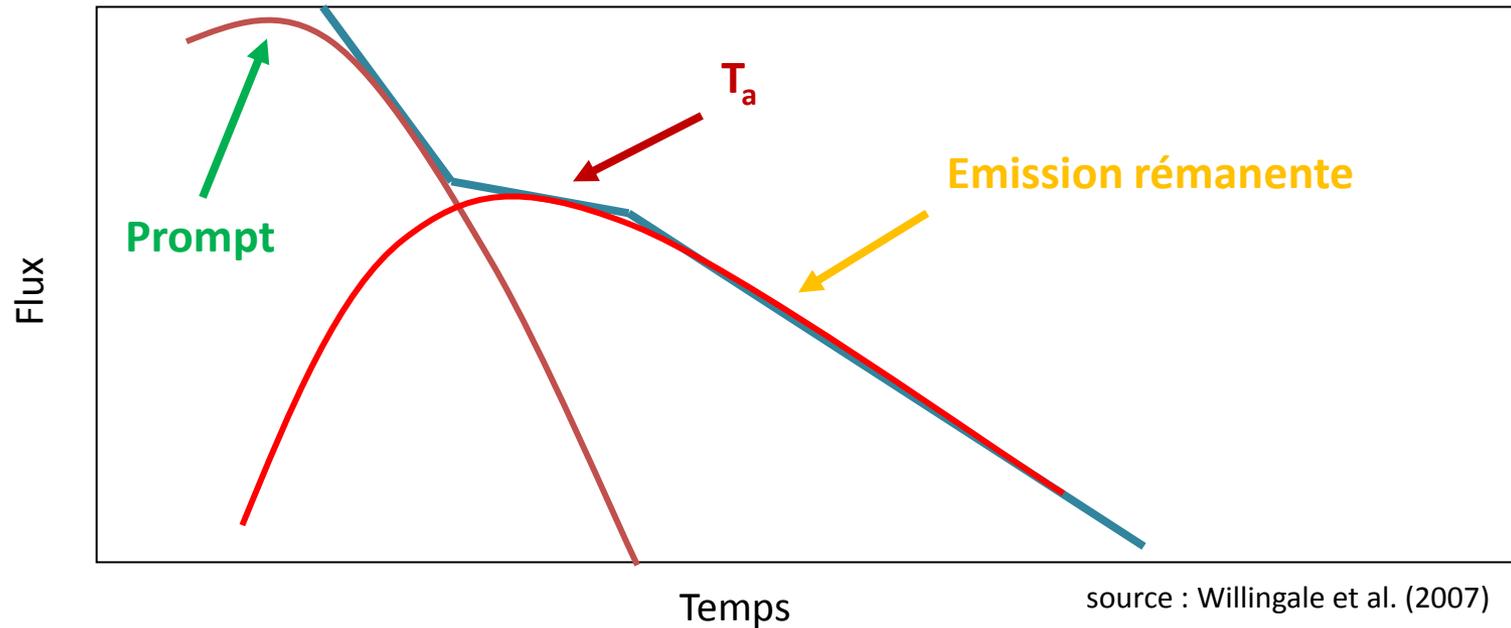
- responsable de l'émission prompte

Les couches interagissent avec le milieu externe : choc externe

- responsable de l'émission rémanente

Formation d'un choc en retour, percutant les couches retardataires

La courbe de lumière



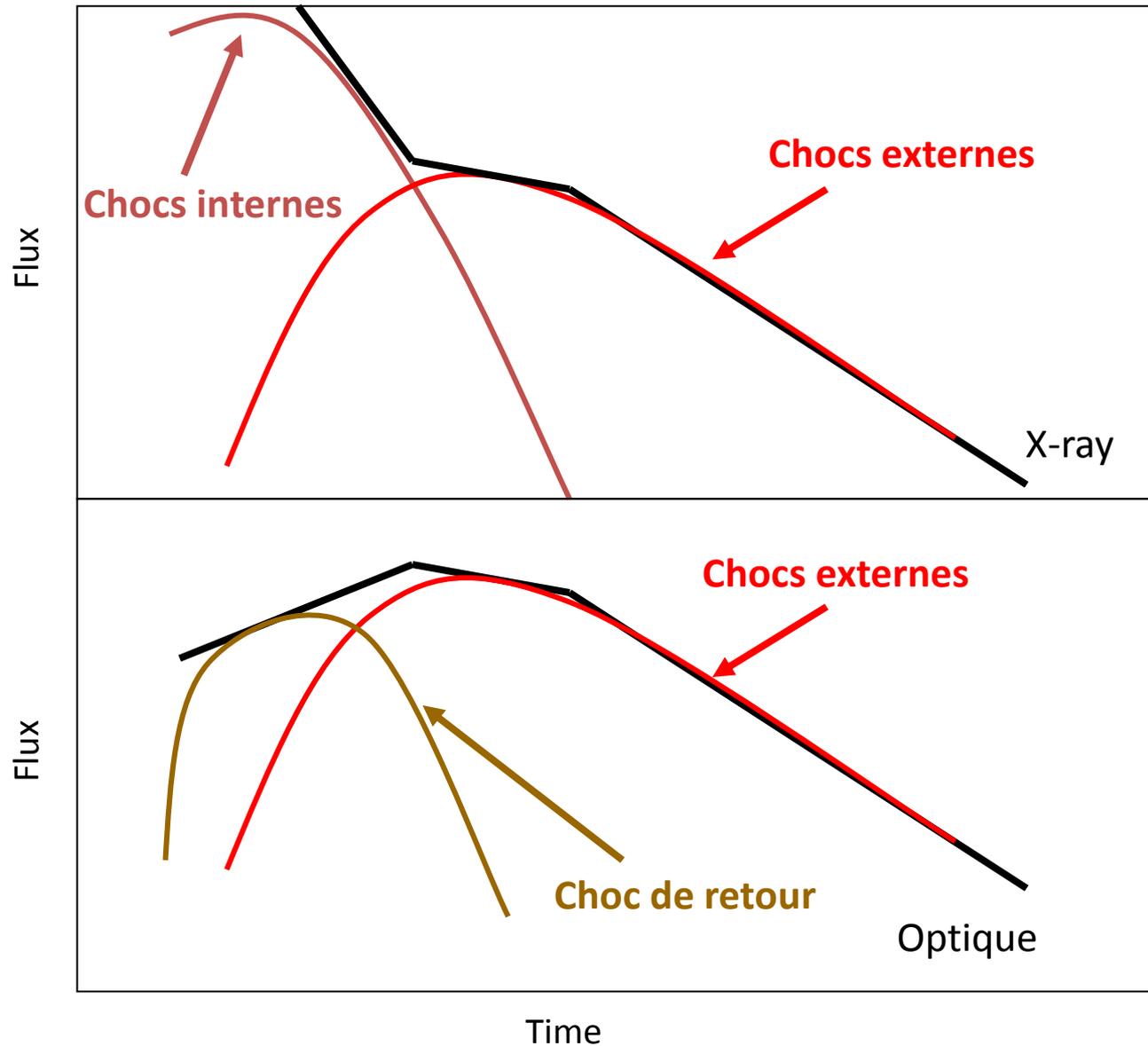
La courbe de lumière obtenue grâce aux données SWIFT est une somme de deux composants

Un composant lié à l'émission prompte

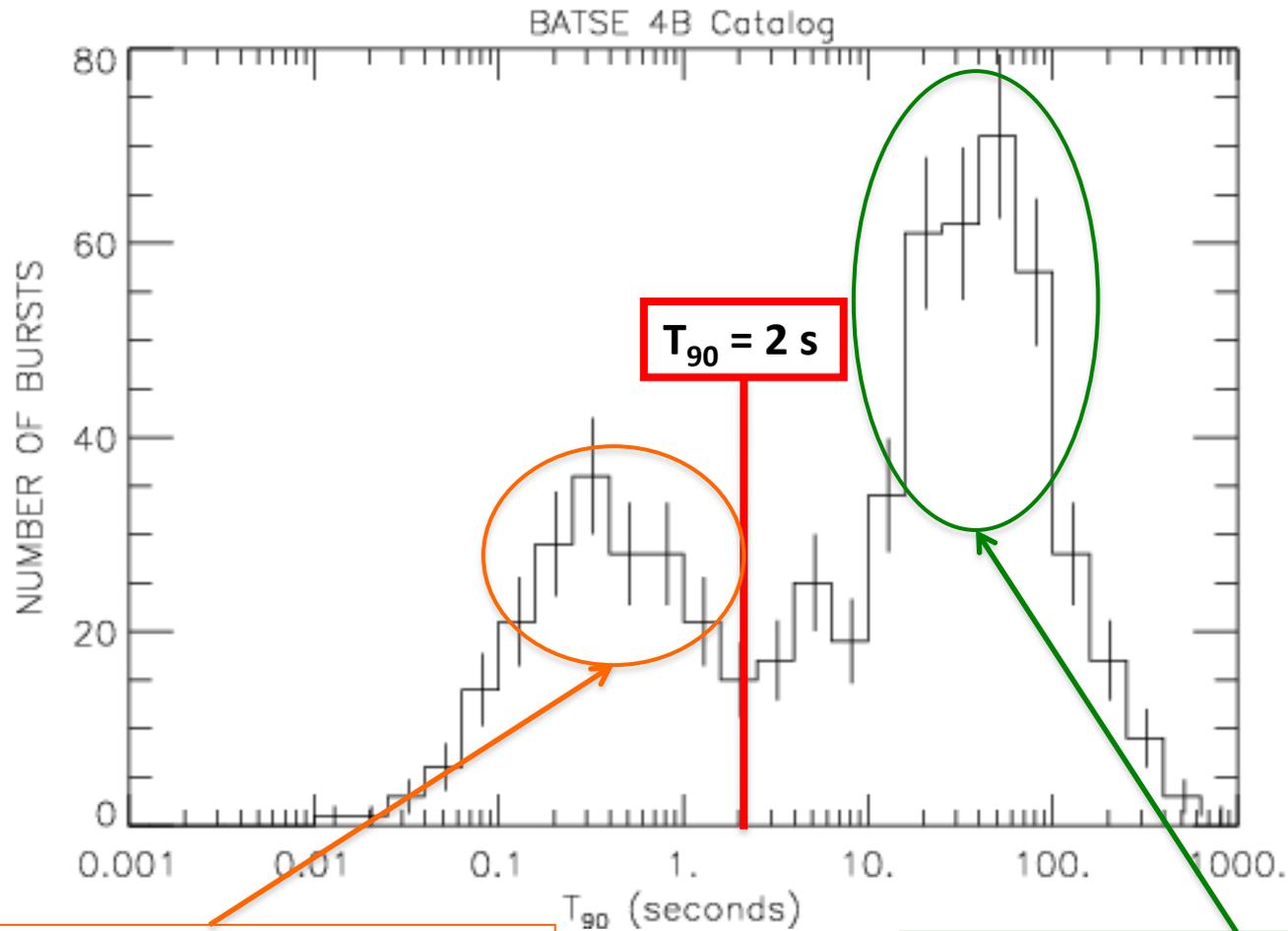
Un second composant de nature moins certaine (émission rémanente ou autre)

Un temps de transition T_a typiquement de 1000-10 000 secondes

La courbe de lumière en X et optique



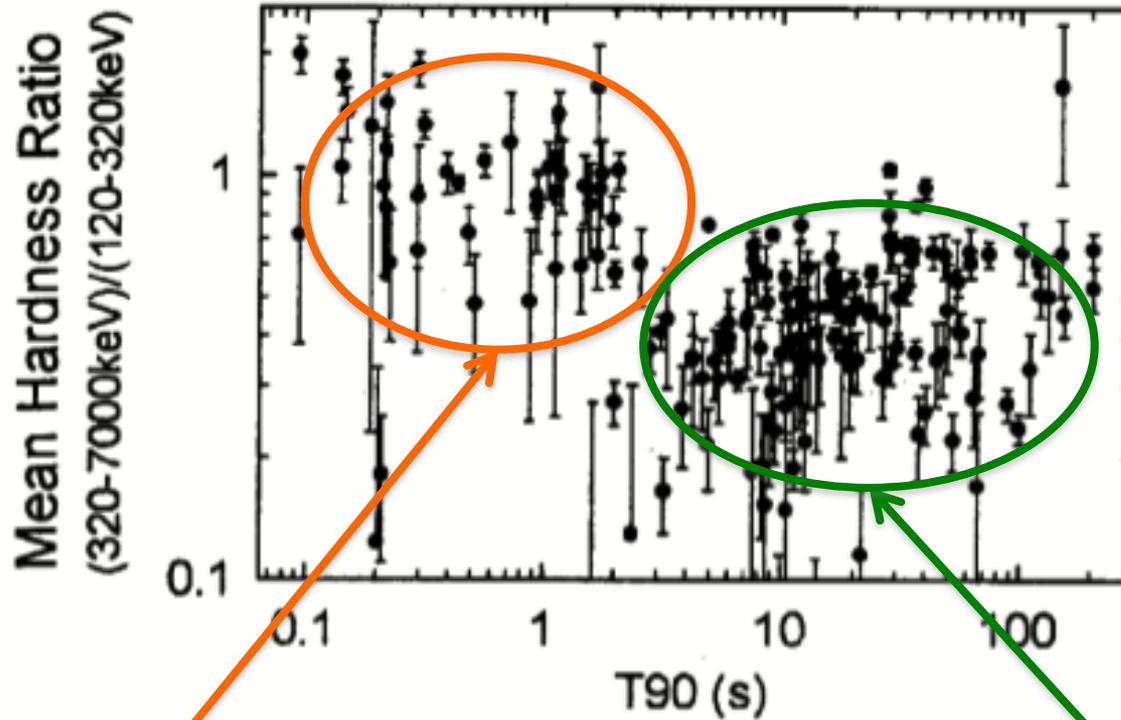
Des sursauts longs et des sursauts courts !



**Durée < 2 secondes :
sursauts gamma courts**

**Durée > 2 secondes :
sursauts gamma longs**

Voyons un peu lequel est dur ...



Sursauts gamma courts : plus durs

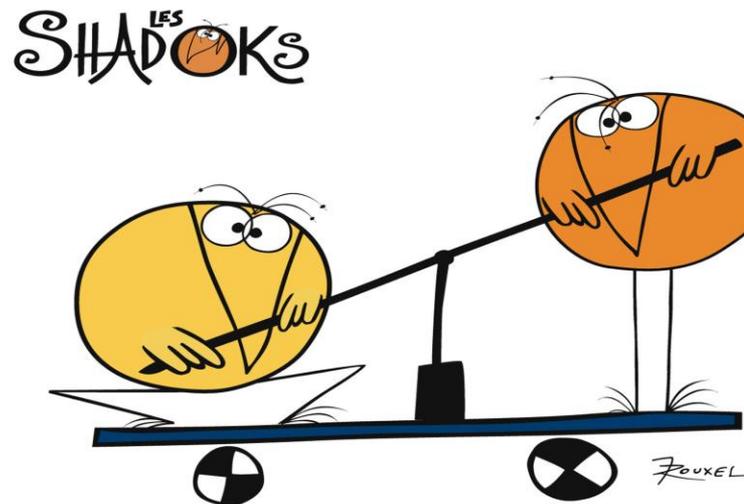
Sursauts gamma longs : plus mous

Différents progéniteurs

Une "explosion" qui signale la formation d'un trou noir stellaire

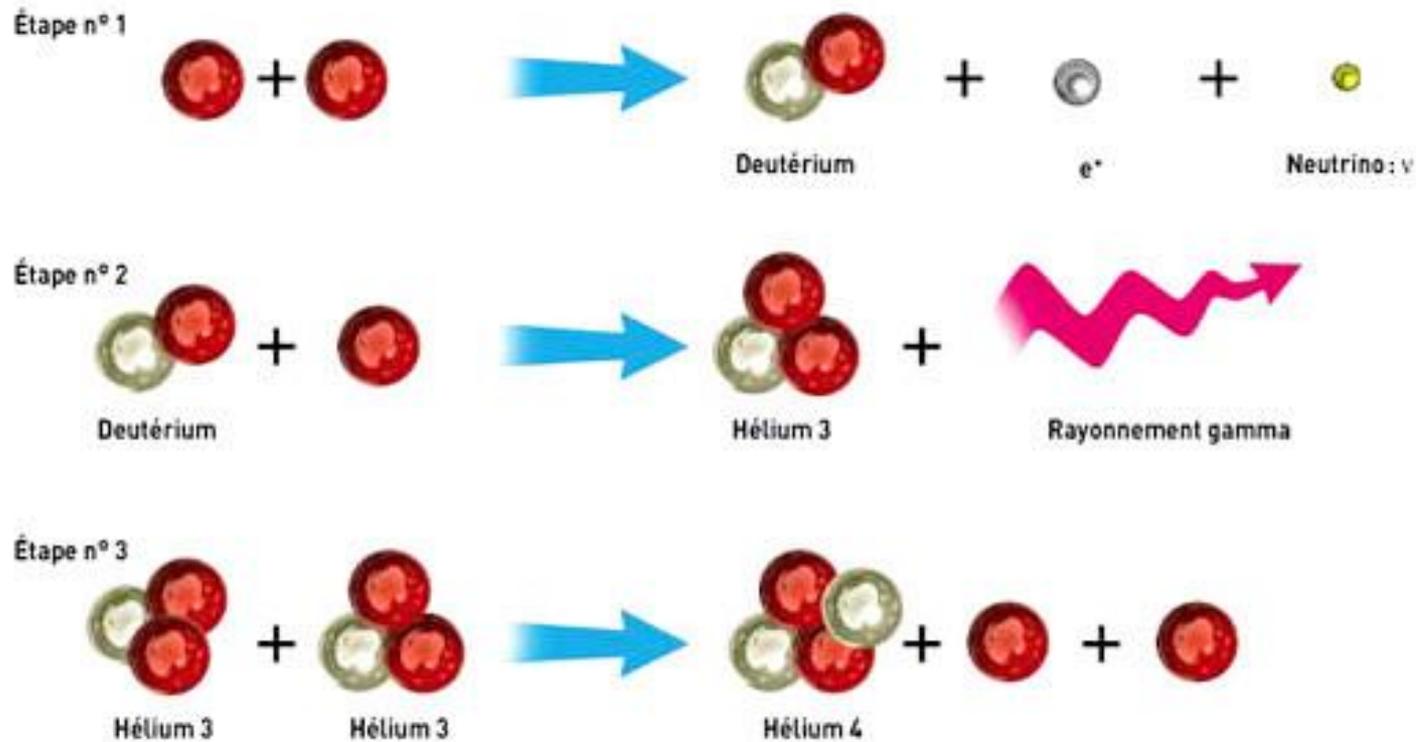
- soit par la mort d'une étoile massive
- soit par la fusion de deux objets compacts

Pour bien comprendre cela, revoyons les bases de la physique stellaire ...



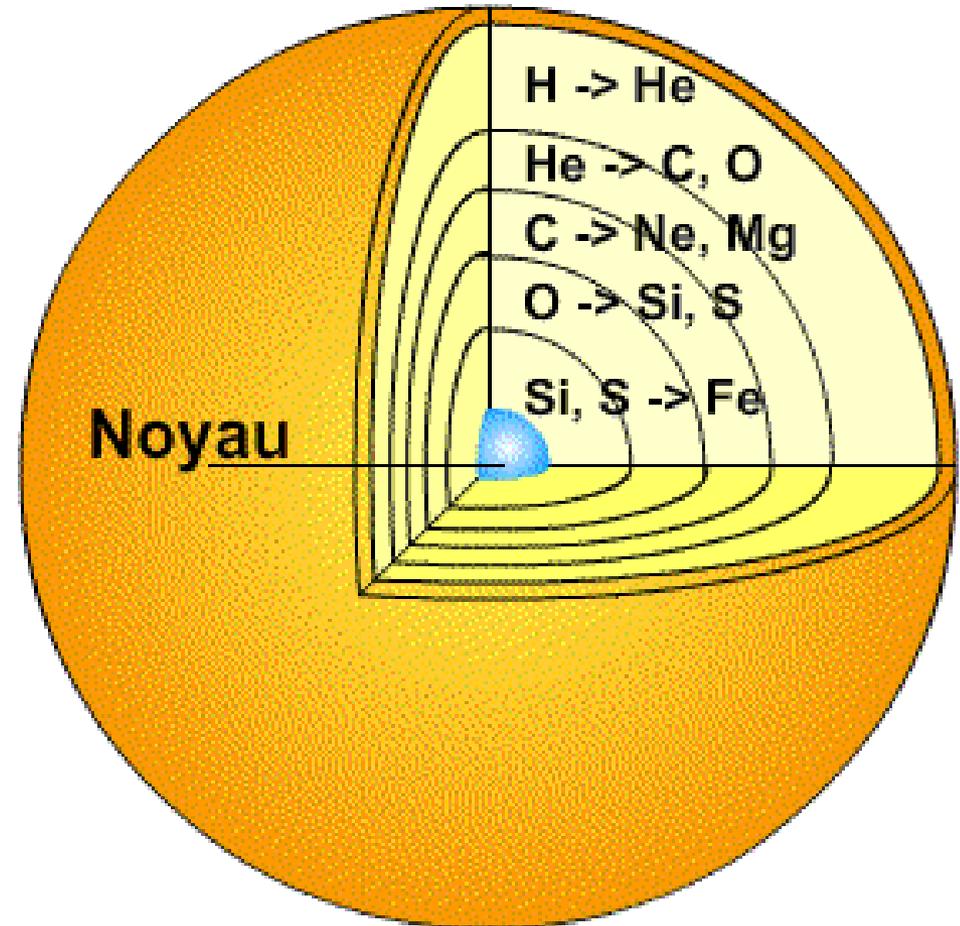
La fusion au cœur des étoiles

- Étoiles = réacteurs nucléaires à fusion : atomes légers => gros noyaux + énergie (pression qui résiste à la gravitation)
- On parle de fusion car petits atomes donnent de plus gros



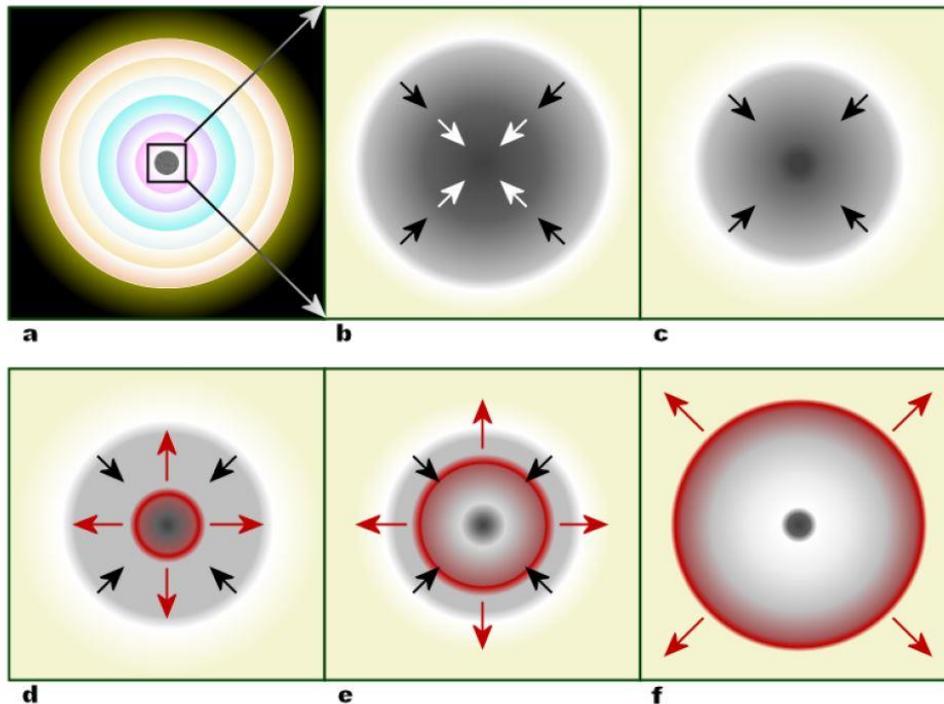
La structure en oignon

- Dans les étoiles massives, des éléments de plus en plus lourds sont formés
- Les plus lourds vont au centre (tout comme mélange huile/eau)
- Le plus lourd de tous est le fer : il est inerte (ne peut pas réagir)

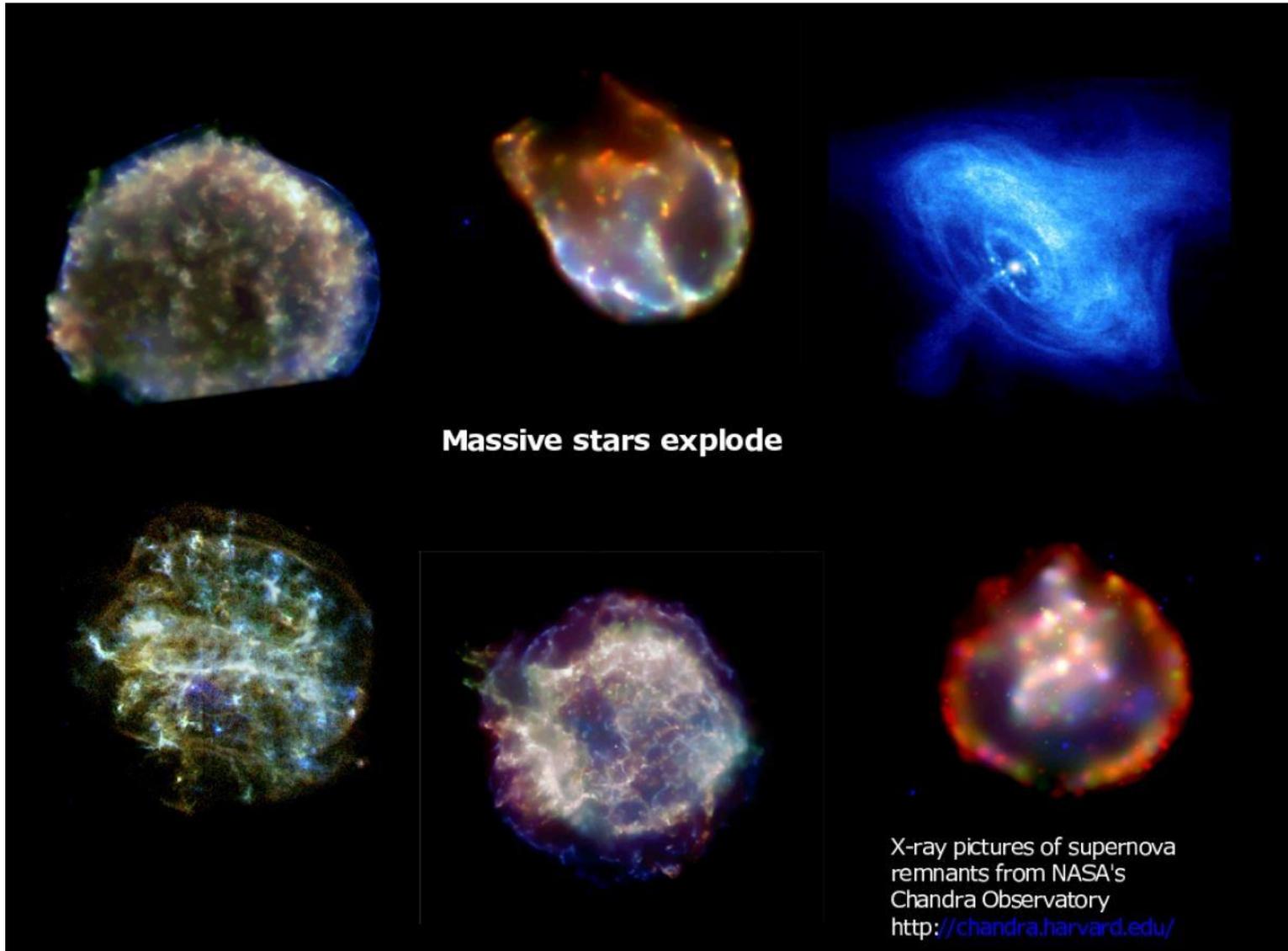


Supernovae

- Masse du cœur de fer trop élevée (environ 1,4 masses solaire) => Effondrement gravitationnel (Chandrasekhar 1930)
- Effondrement rapide du cœur de fer et chute plus lente du reste
- Durcissement du cœur => rebond avec couches externes toujours en chute => choc et expulsion des couches externes
- **Formation d'une supernova gravitationnelle**

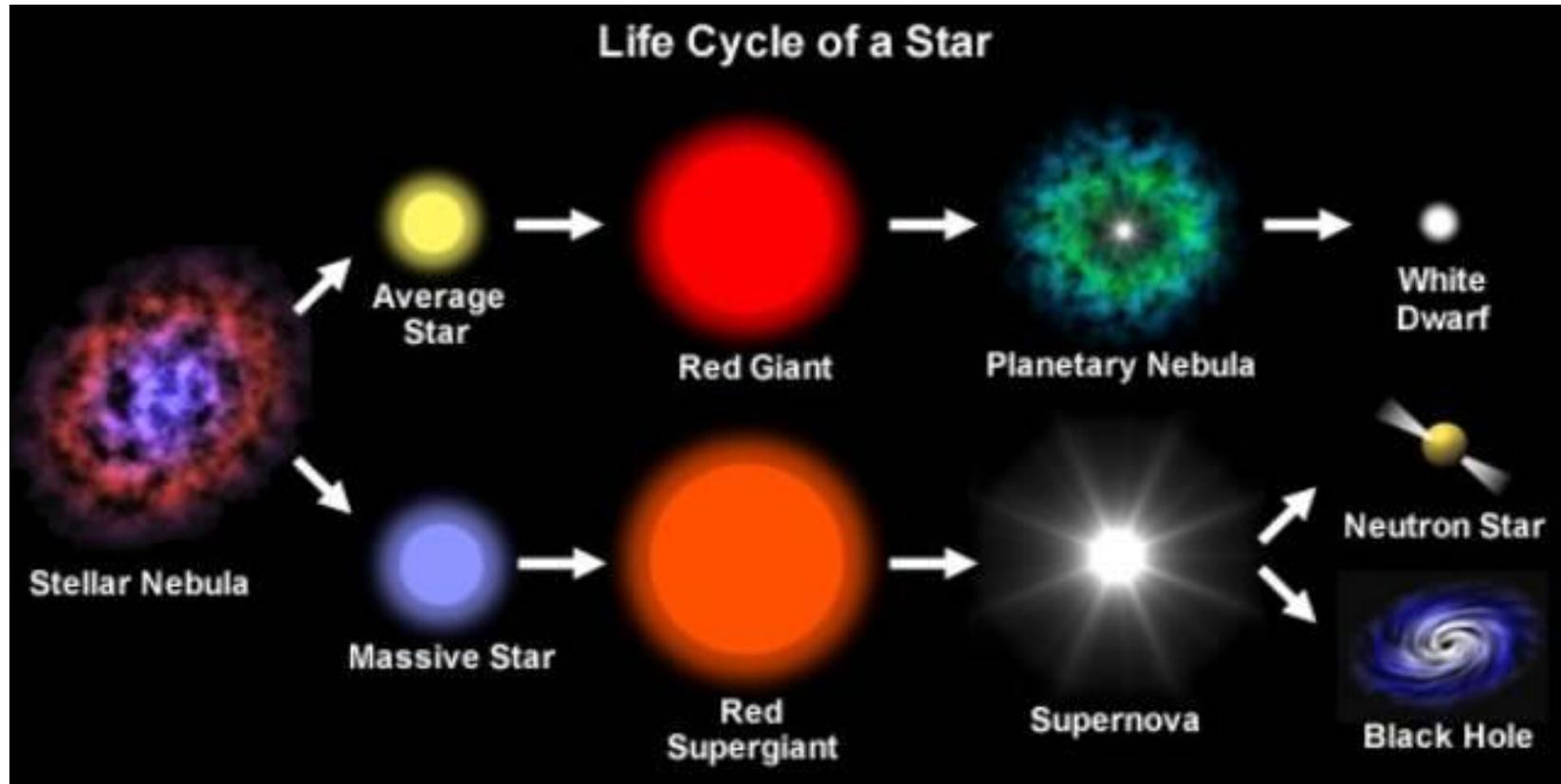


Quelques photos

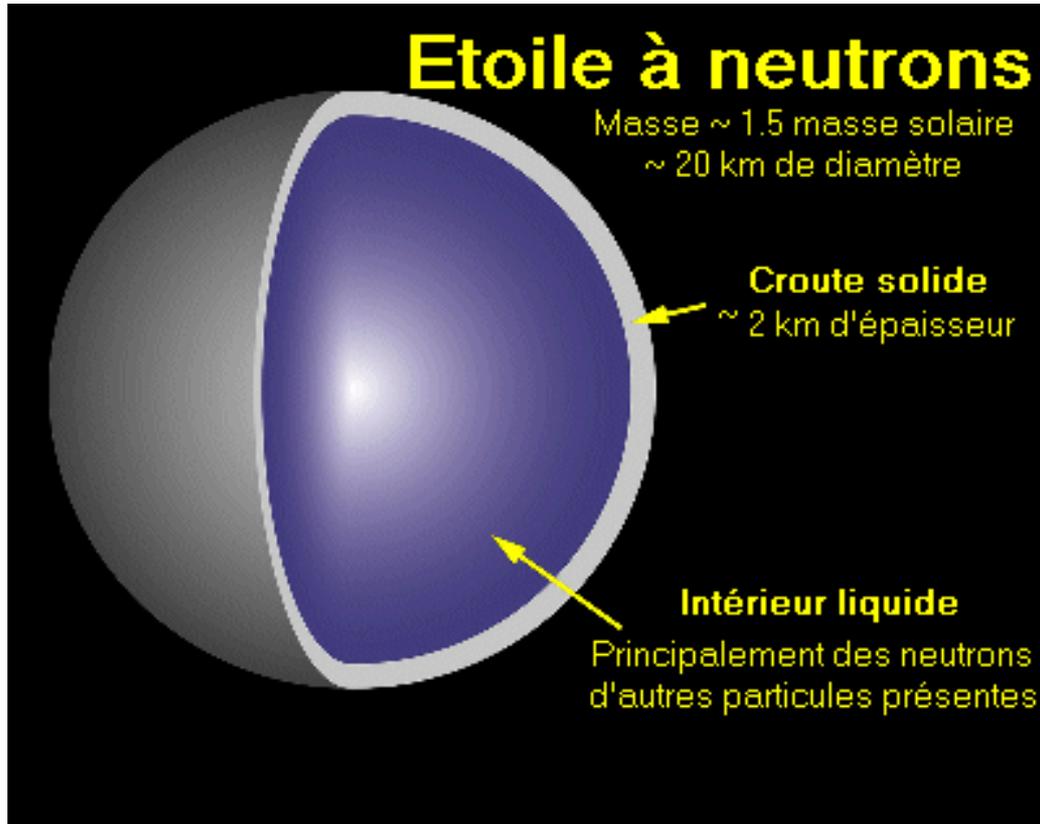


Le cœur de la SN : une étoile à neutron

Résidu central = cœur de fer « brisé » + matière environnante qui n'a pas été expulsée => trou noir ou étoile à neutrons



Une étoile à neutron



10 milliards de tonnes !

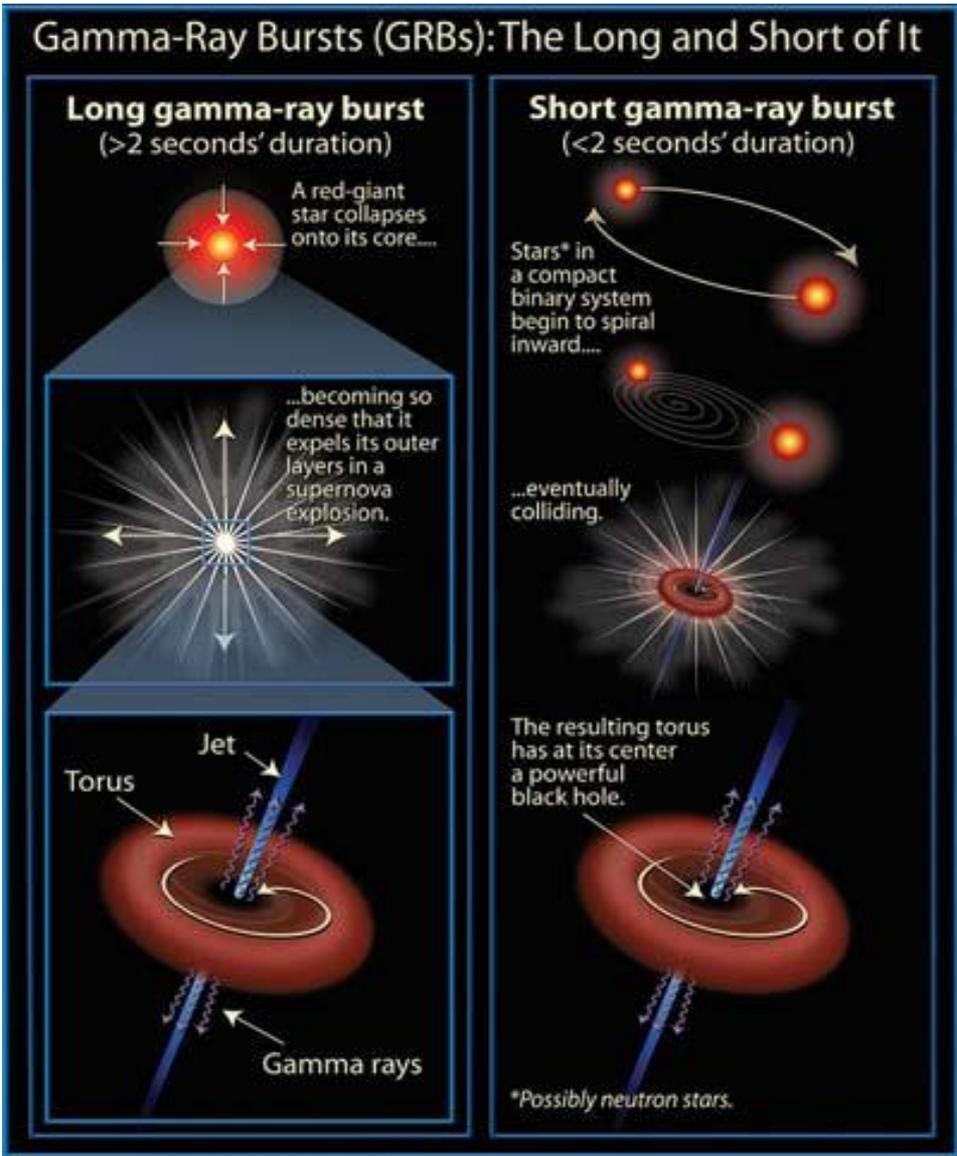
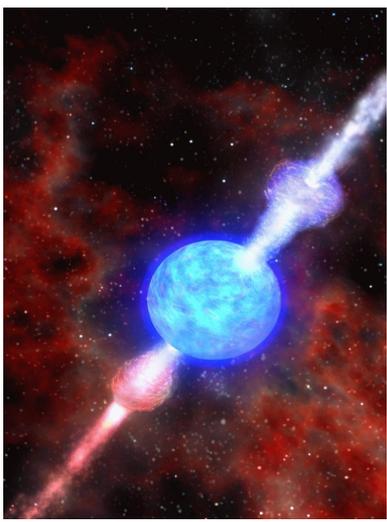
- vitesse de rotation : jusqu'à plus de 1000 tours par seconde
- Champ magnétique très intense
=> milliards de fois celui de la Terre
- Orienté vers nous => pulsars

Différents progéniteurs

Sursauts Gamma

Longs :

Explosion d'étoiles massives



Sursauts Gamma

Courts :

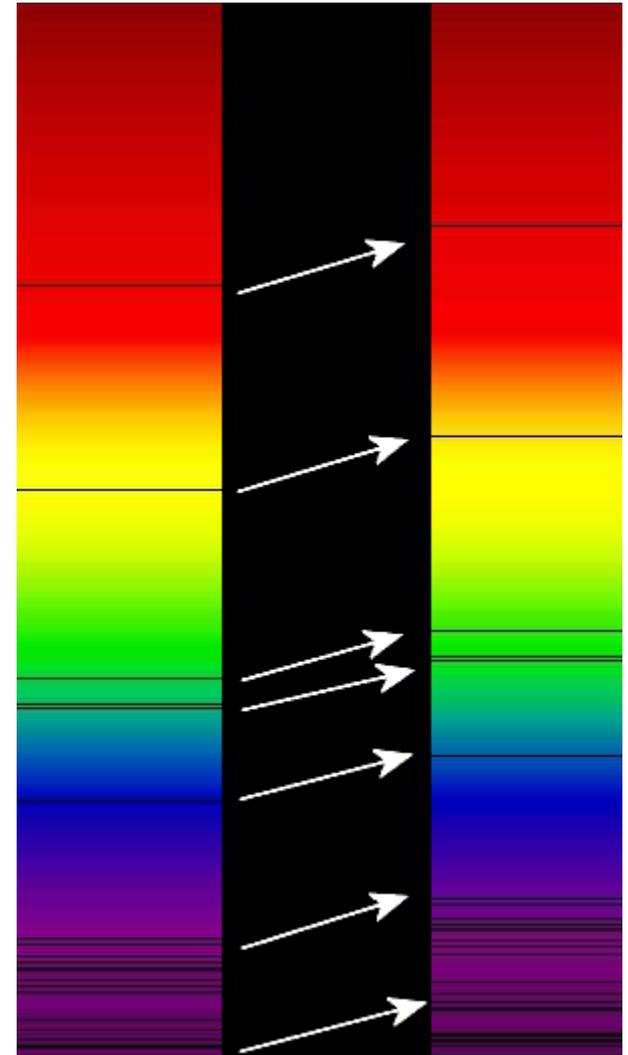
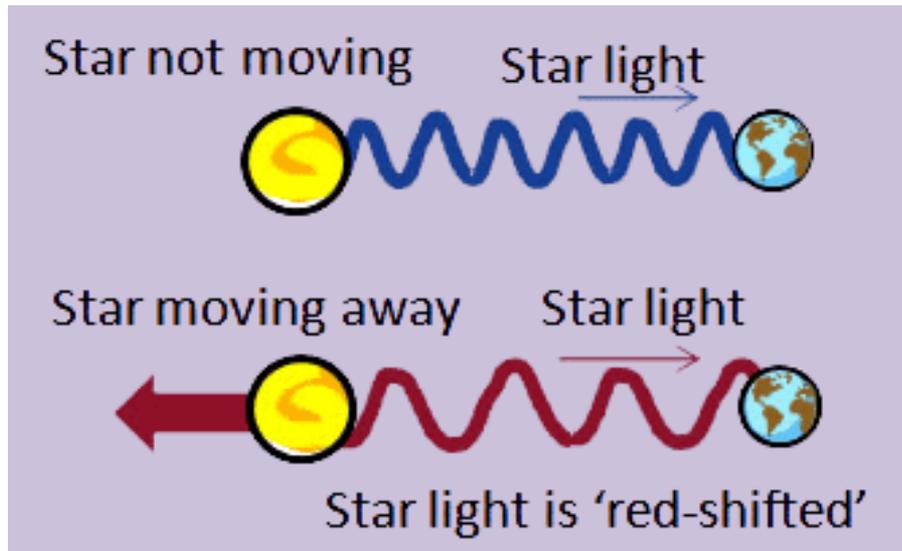
Coalescence de binaires d'étoiles à neutrons



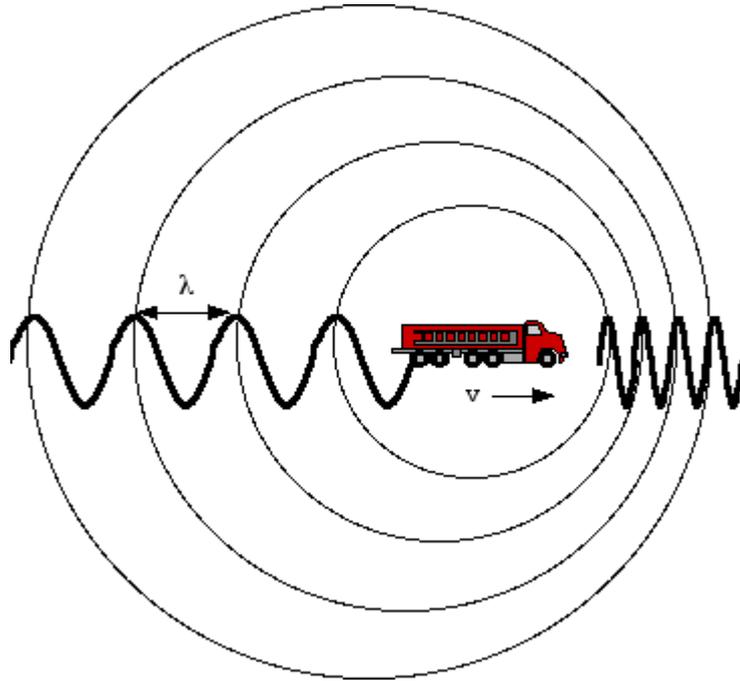
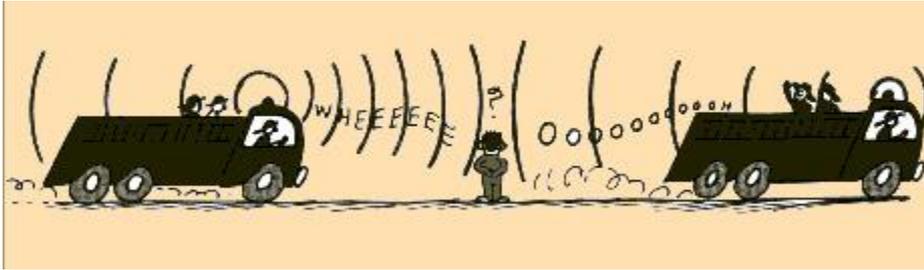
Le redshift

Redshift = décalage vers le rouge des raies spectrales pour le spectre visible du à l'expansion de l'univers et l'éloignement des sources les unes des autres

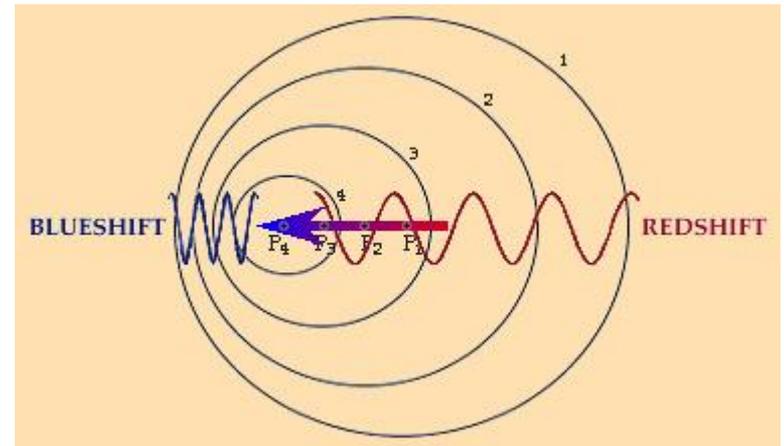
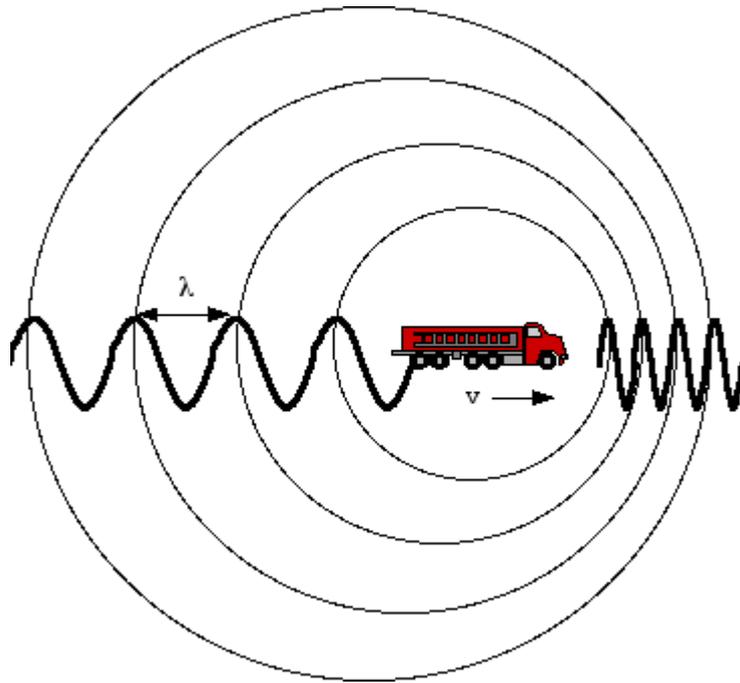
=> Analogie avec le camion de pompier



Le redshift



Le redshift



Nos fermes de télescope



Tarot/zadko Avantages :

- Bas couts
- Facilement transportable
- Reproductibles de part le monde.
- très bonne localisation
- Envoi des données aux grands télescopes pour obtenir z

Mesure de la distance

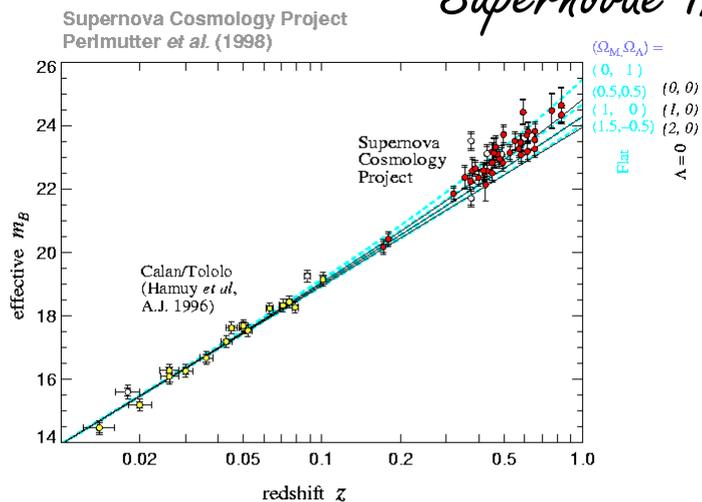
Sur nos cahiers ...



Éléments plus lointain comme la Lune ...

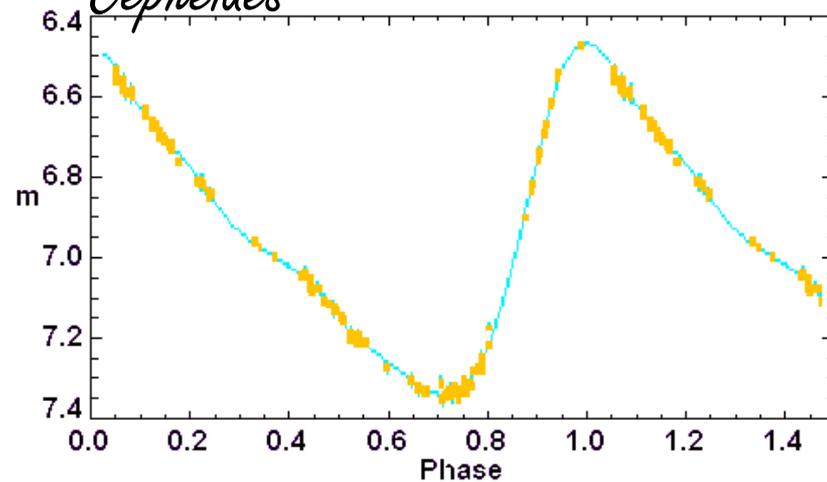


Supernovae Ia



In flat universe: $\Omega_M = 0.28 [\pm 0.085 \text{ statistical}] [\pm 0.05 \text{ systematic}]$
 Prob. of fit to $\Lambda = 0$ universe: 1%

Céphéïdes

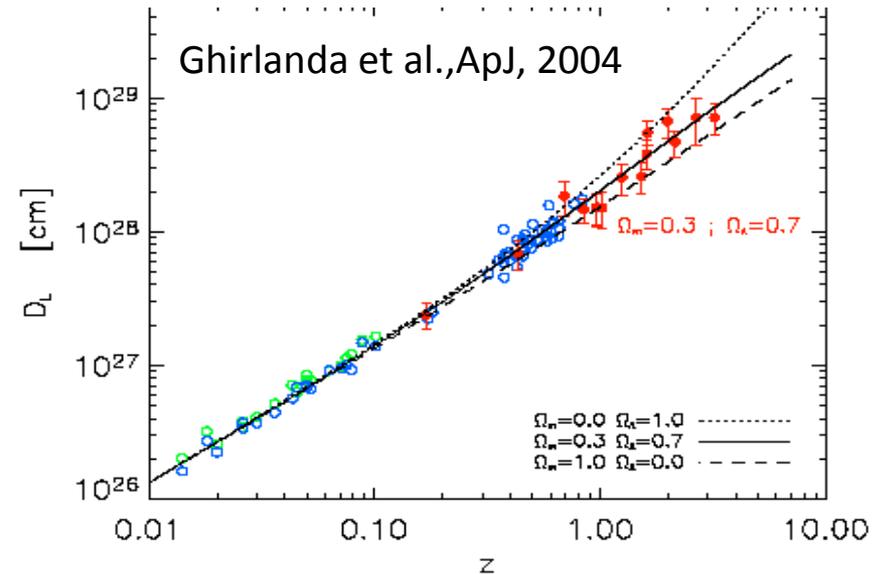
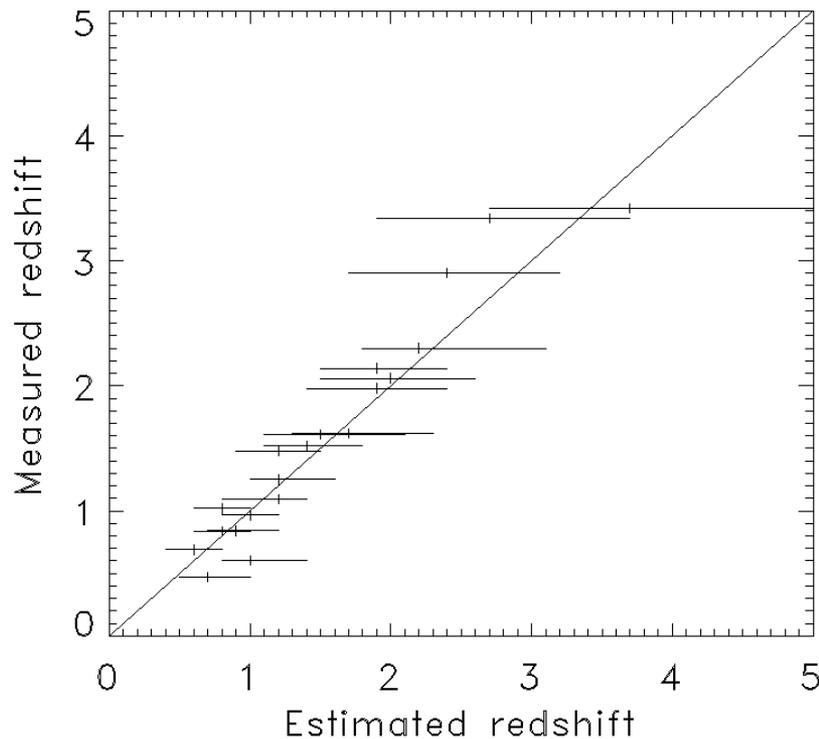


$$m - M = 5 \log d - 5 \quad M \sim \log P$$

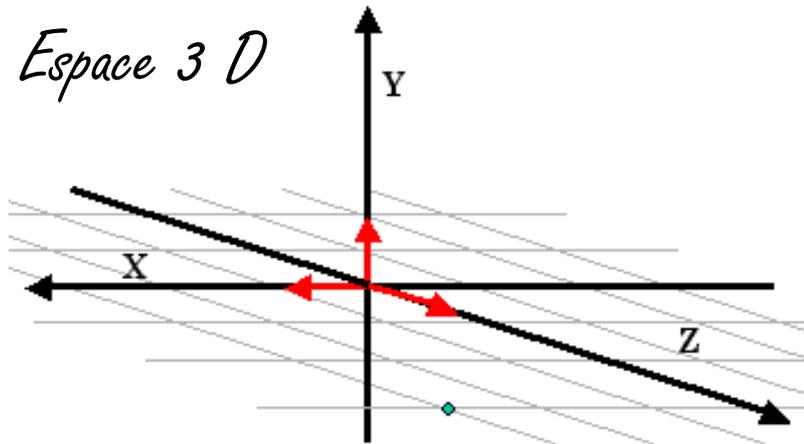
Mesure de la distance à $z > 1$???

Un sursaut gamma est peut être une chandelle standard de par son émission rémanente :

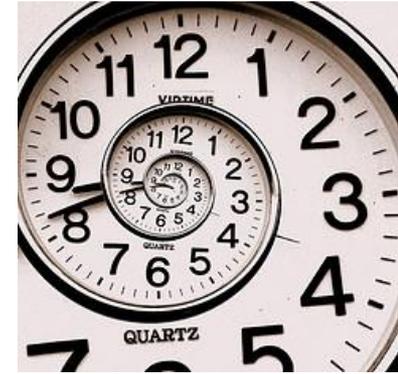
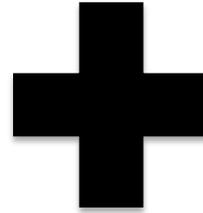
=> **Estimateur de distance**



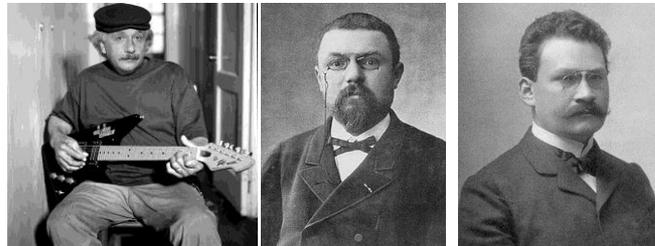
L'espace - temps



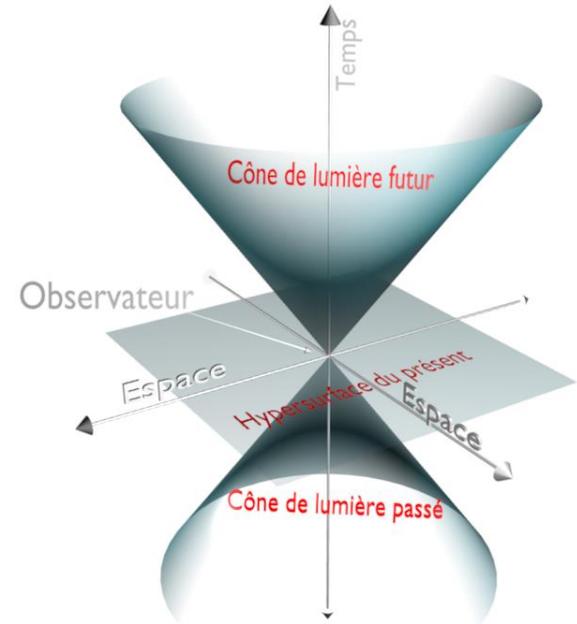
Temps 1D



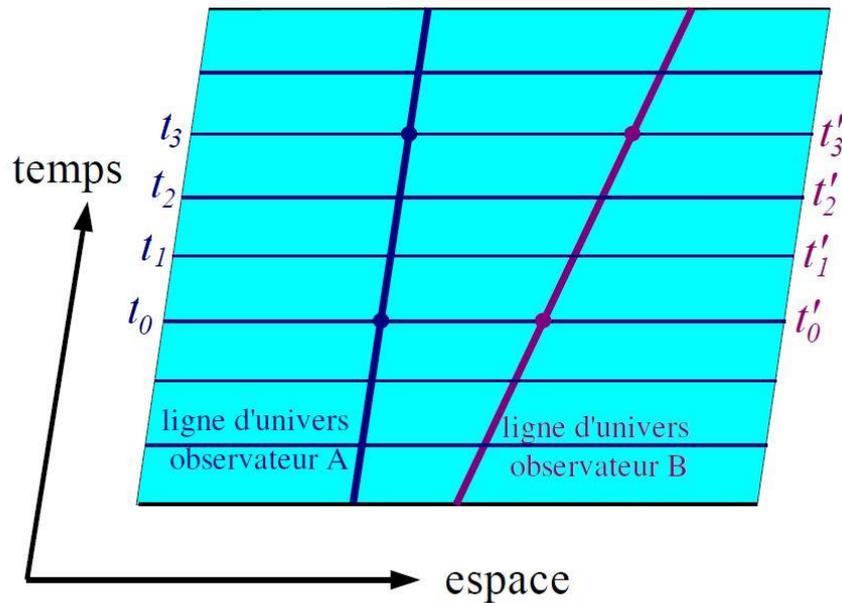
Continuum Espace - Temps
à 4 Dimensions



Einstein, Poincaré et Minkowski,
début XX^{ème} siècle



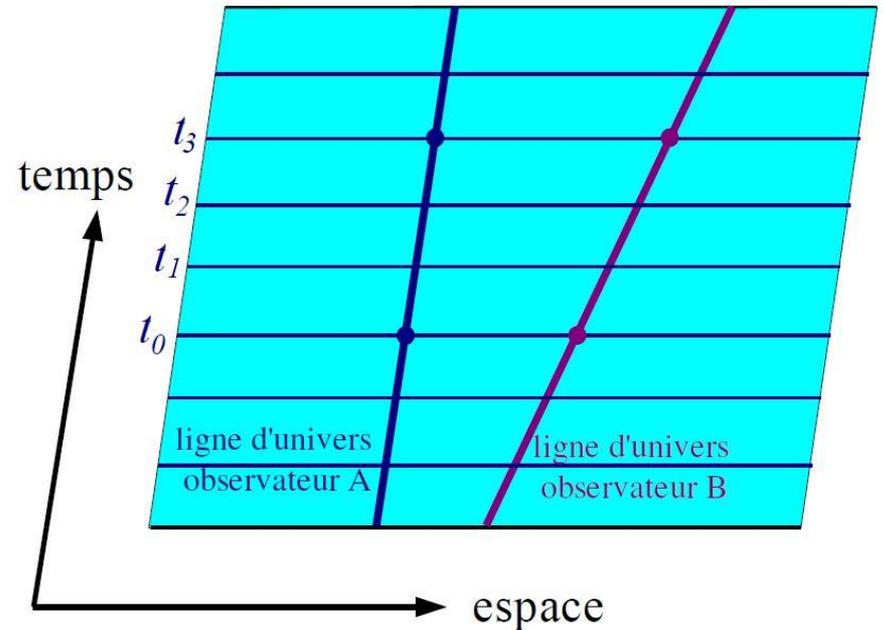
Différence entre espace temps Newtonien et relativiste



Espace-temps newtonien

structure absolue: temps universel

Tous les observateurs mesurent le même temps

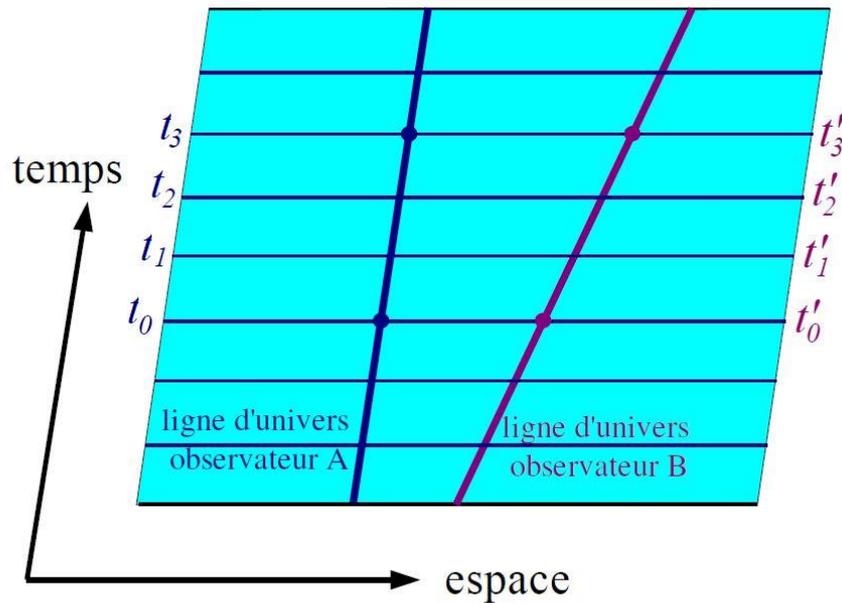


Espace-temps de la relativité restreinte

il n'y a plus de temps universel, chaque observateur définit son propre temps

Source : Eric Gourgoulhon

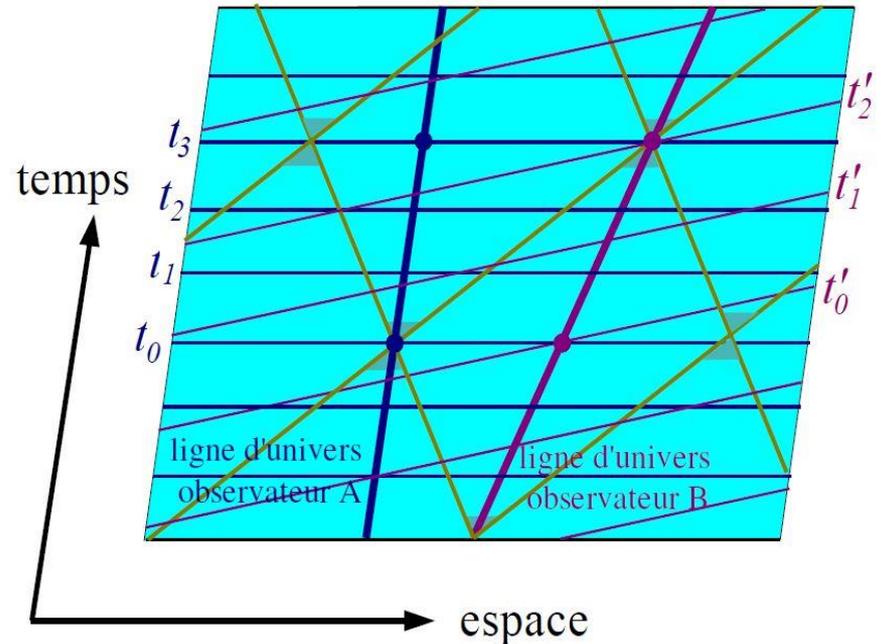
Différence entre espace temps Newtonien et relativiste



Espace-temps newtonien

structure absolue: temps universel

Tous les observateurs mesurent le même temps



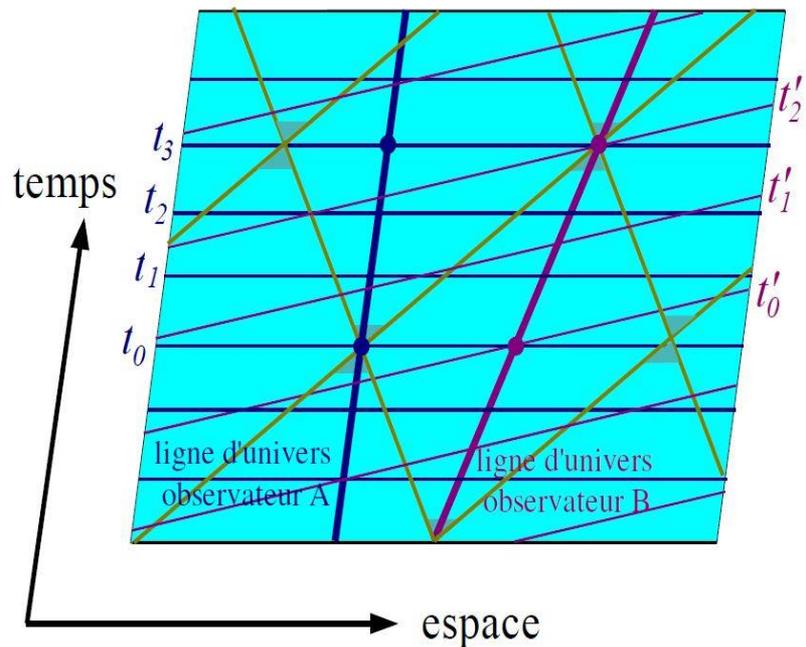
Espace-temps de la relativité restreinte

structure absolue: cônes de lumière

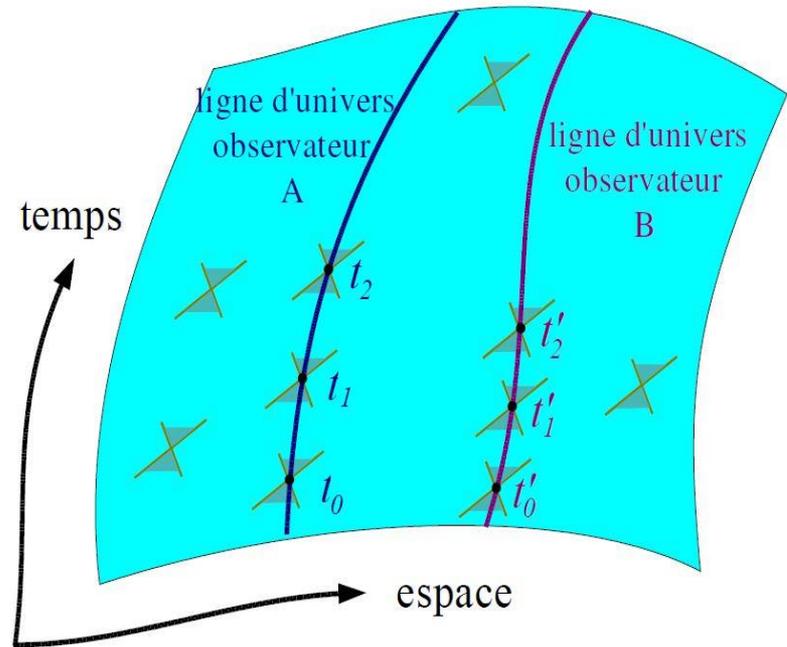
il n'y a plus de temps universel, chaque observateur définit son propre temps
⇒ la simultanéité n'est plus universelle
⇒ phénomène de *dilatation des temps*

Source : Eric Gourgoulhon

Différence entre espace temps Newtonien et relativiste



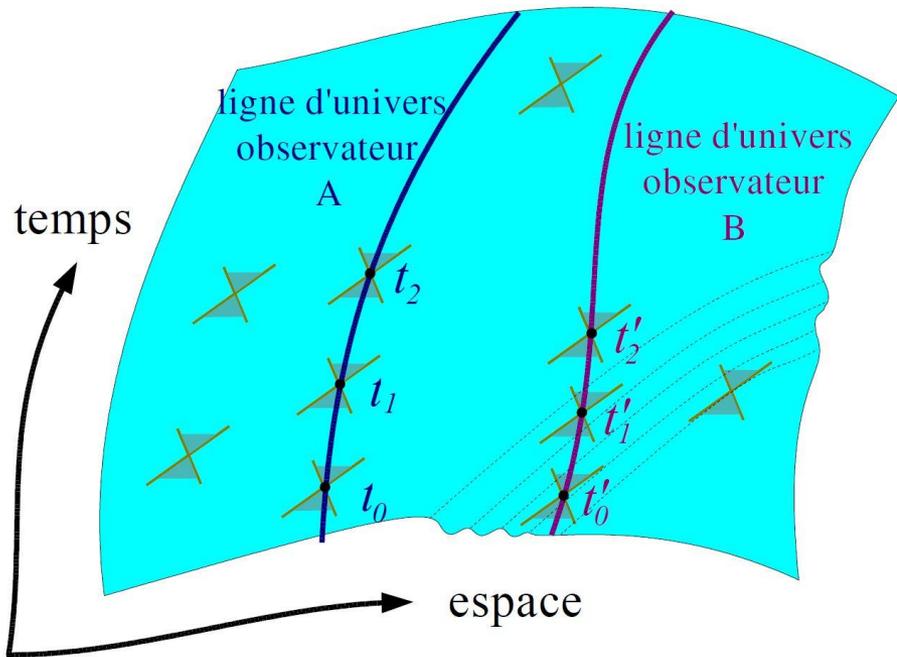
Espace-temps de la relativité restreinte
espace-temps **plat** et **inerte**
OK pour l'électromagnétisme
ne convient pas pour la gravitation



Espace-temps de la relativité générale
espace-temps **courbe** et **dynamique**
OK pour l'électromagnétisme
OK pour la gravitation

Source : Eric Gourgoulhon

Ondes gravitationnelles



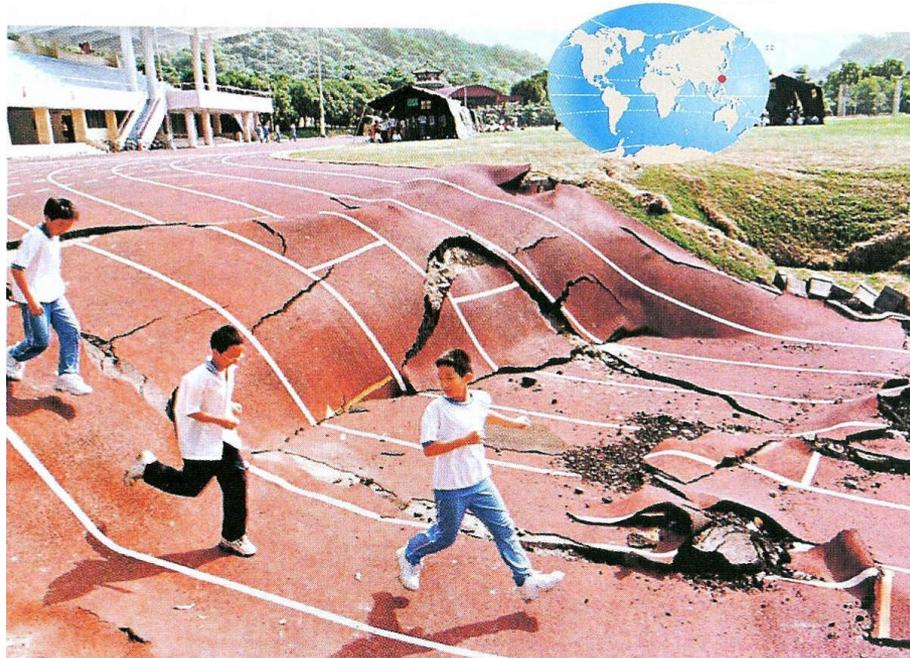
OG = perturbations dans la courbure de l'espace-temps

- Dynamisme de l'espace temps
 - Dûes à l'accélération de la matière
 - Vitesse de la lumière
-
- NB: les ondes électromagnétiques (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent *dans* l'espace-temps, alors que les ondes gravitationnelles sont des ondes de l'espace-temps *lui même*

Source : Ericourgoulhon

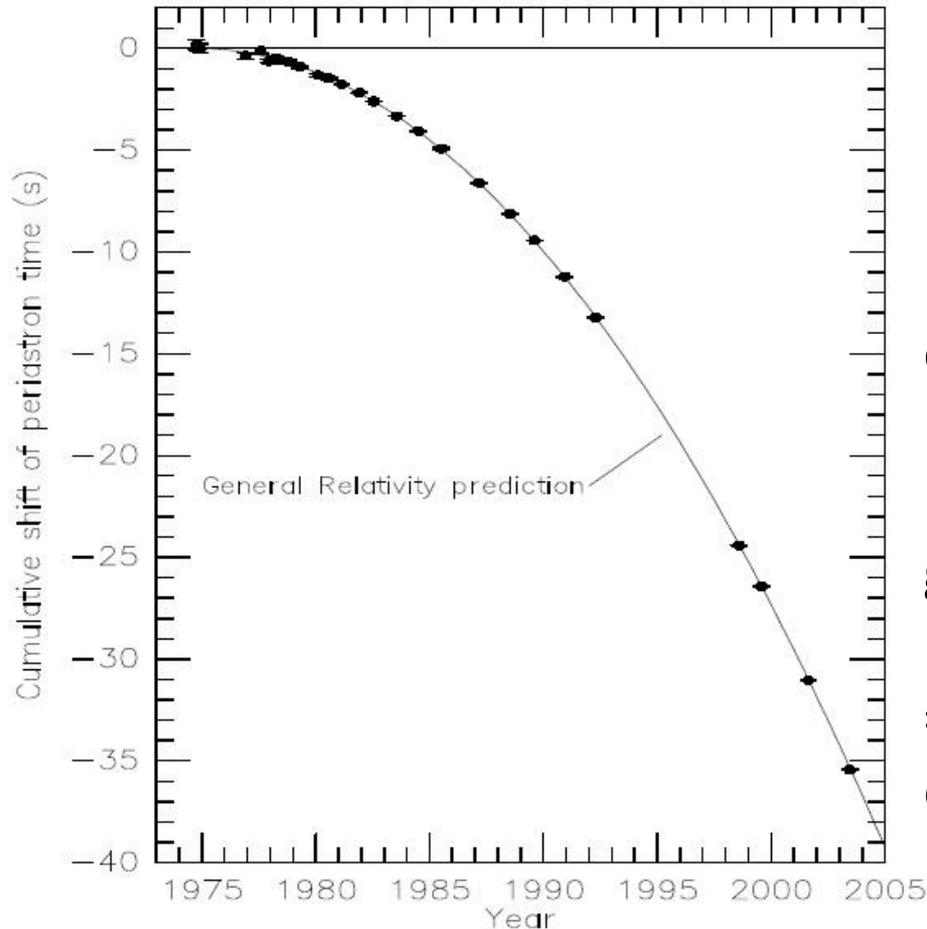
Différence Electromagnétisme - Gravitation

- Electromagnétisme: Charges accélérées qui produisent des radiations électromagnétiques.
- Gravitation: Masses accélérées qui produisent des radiations gravitationnelles



Détection Indirecte d'une OG

PSR 1913+16



[Weisber & Taylor (2002)]

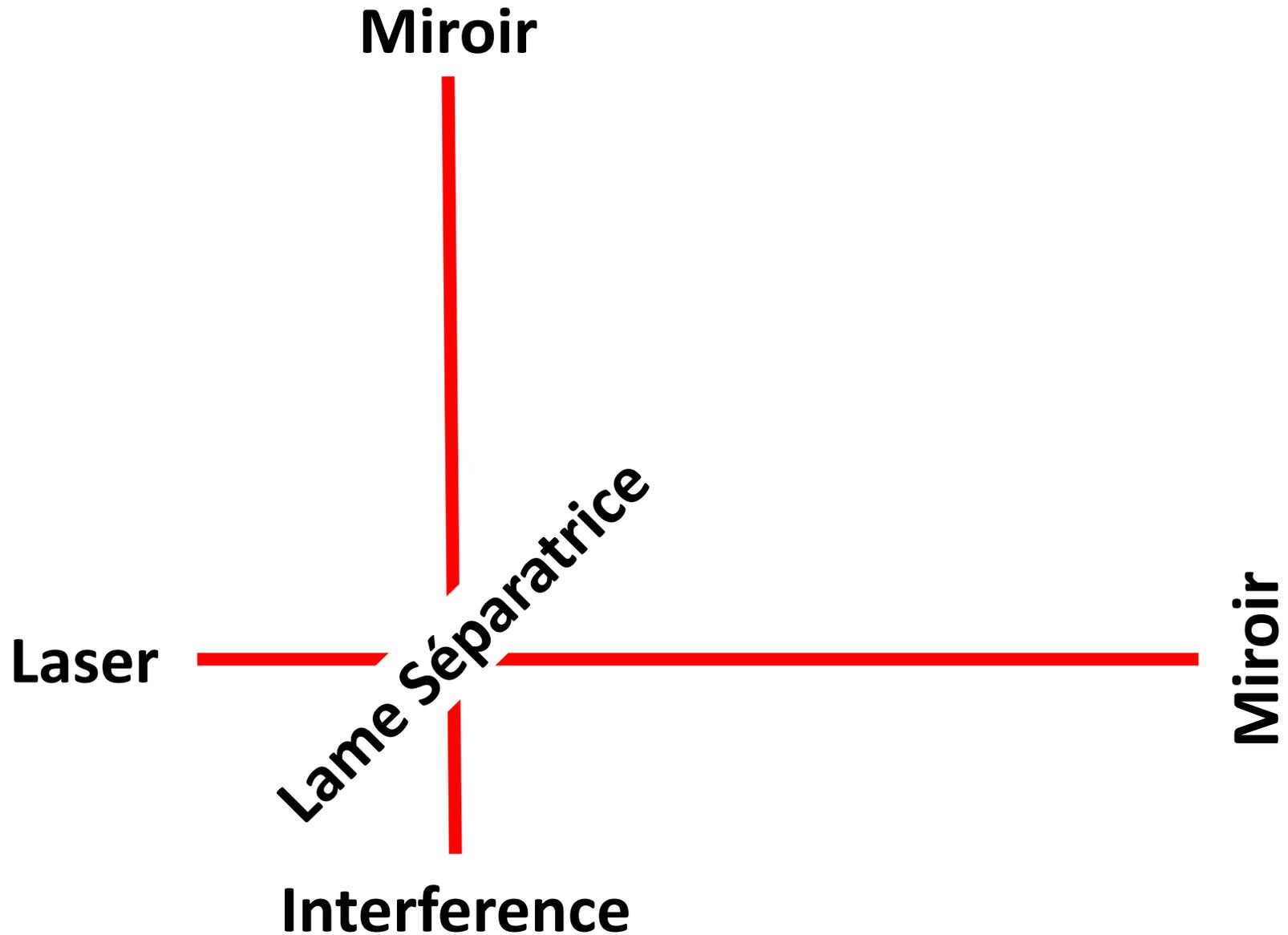
Emission d'ondes gravitationnelles par le système binaire d'étoiles à neutrons (pulsar binaire)

Décroissance observée de la période orbitale $P = 7$ h 45 min du pulsar binaire PSR B1913+16 sous l'effet de la réaction au rayonnement gravitationnel

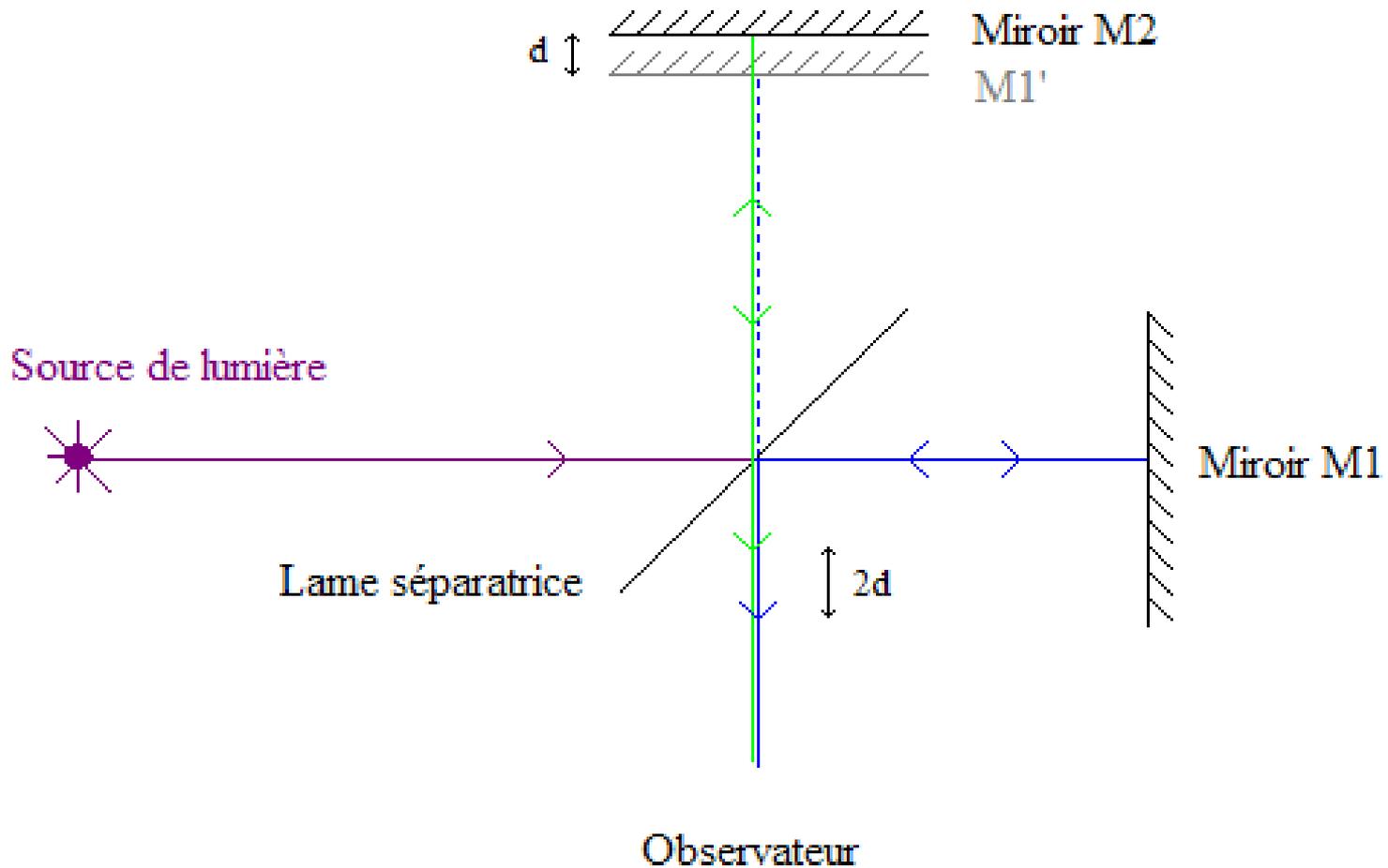
=> Coalescence dans 140 millions d'années !

**Prix Nobel de Physique 1993
à R. Hulse & J. Taylor**

Détection Directe avec interféromètre de Michelson



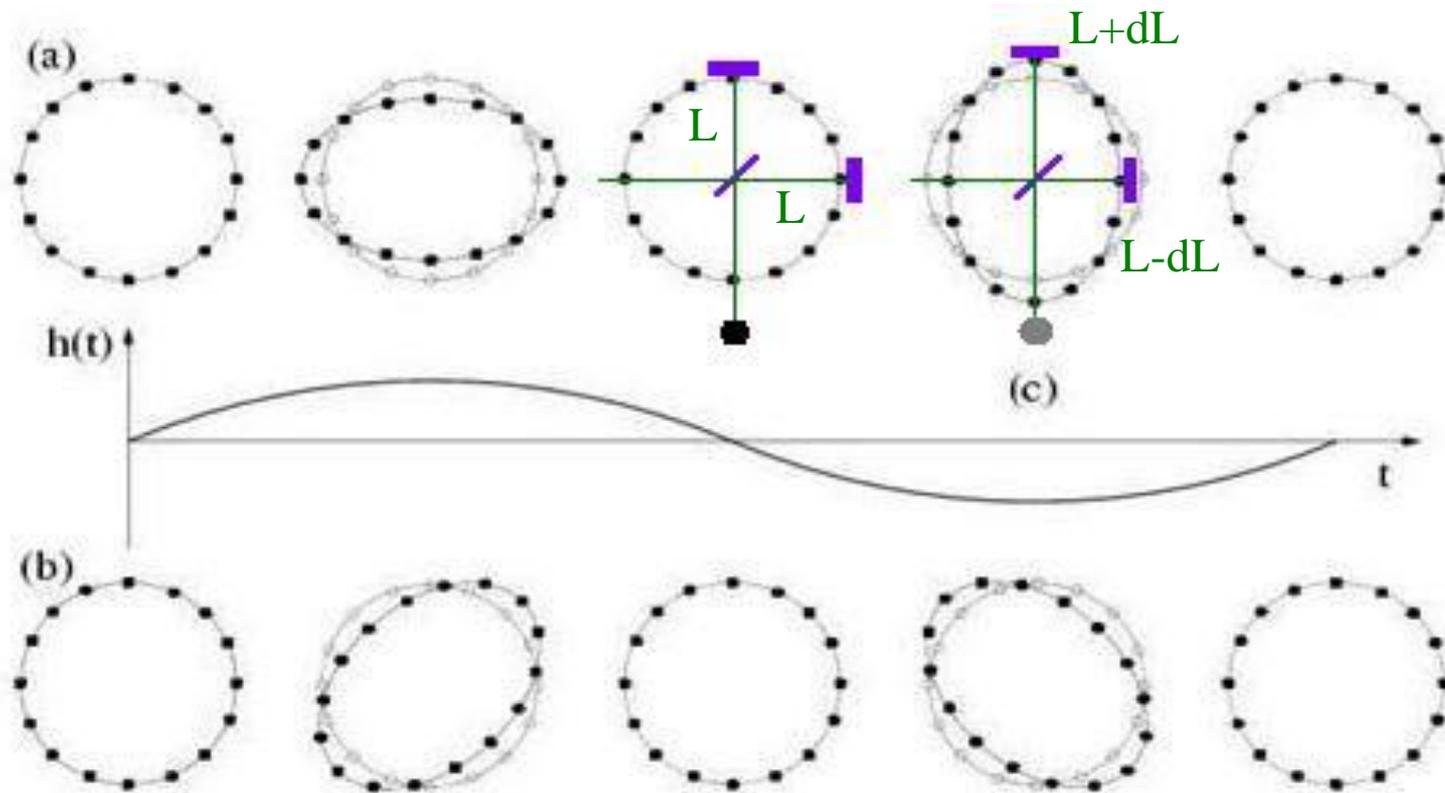
Détection Directe avec interféromètre de Michelson



Implication d'une O_G sur un ensemble de masses libres

Déformation relative :

$$h = dL/L$$



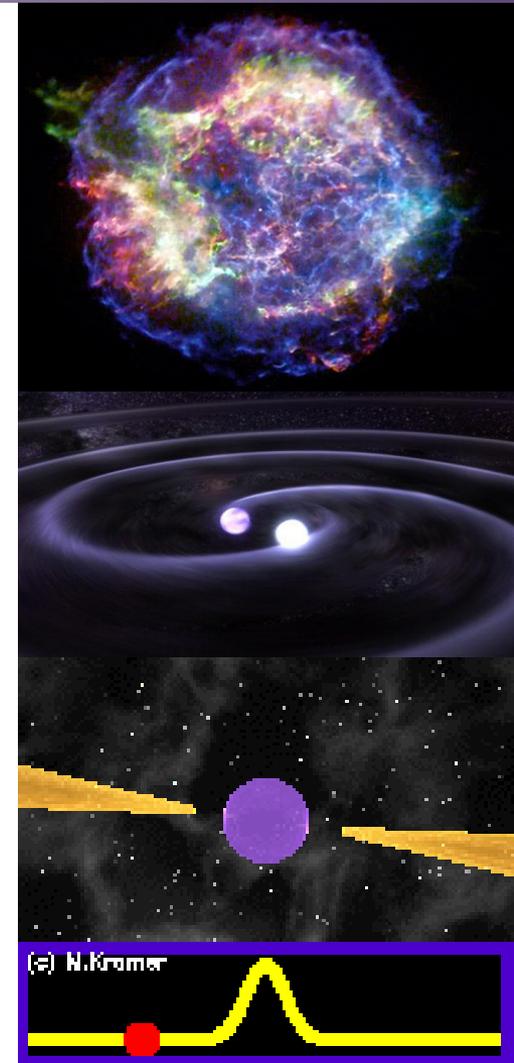
Le son de l'univers...



Onde gravitationnelle : $10^{-17} < f < 10\text{k Hz}$
Oreille humaine : 20 Hz à 20 kHz

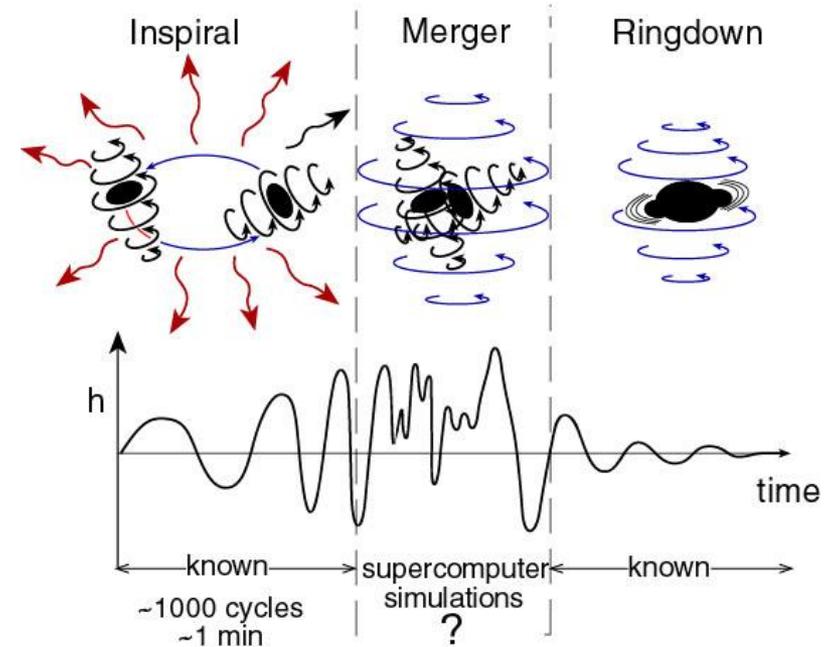
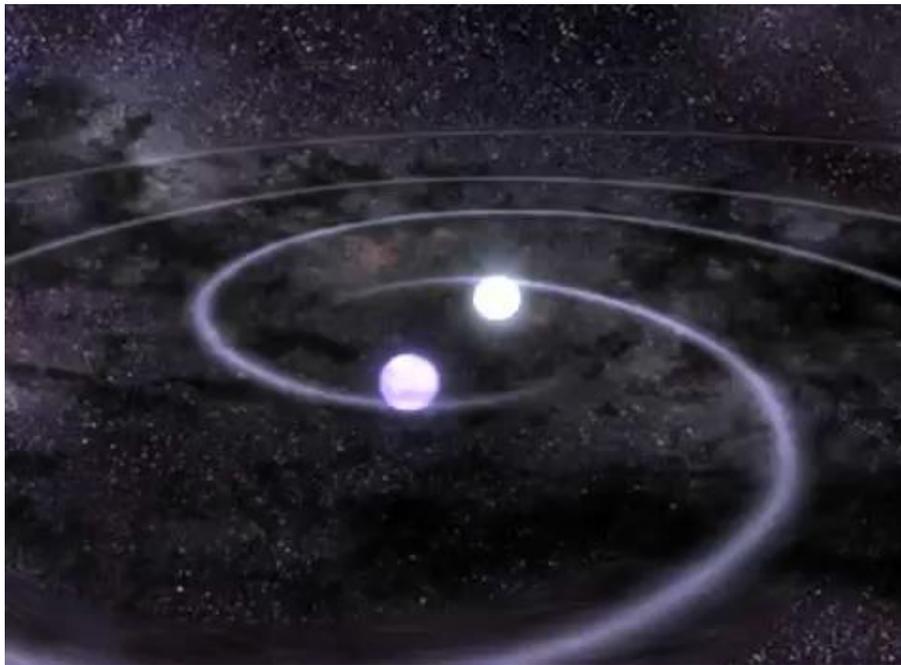
Sources d'OG

- Bursts :
 - Supernovae
 - désexcitation de trous noirs
- Systèmes binaires spiralants :
 - étoiles à neutrons
 - trous noirs
- Sources périodiques (pulsars)
- Fond stochastique
- Autres? Nouvelle physique

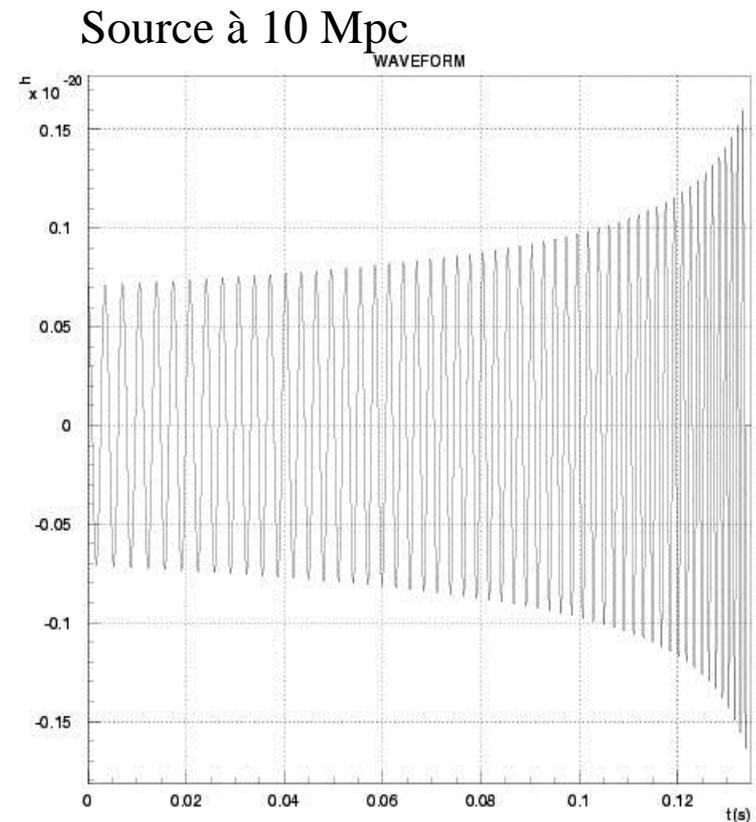
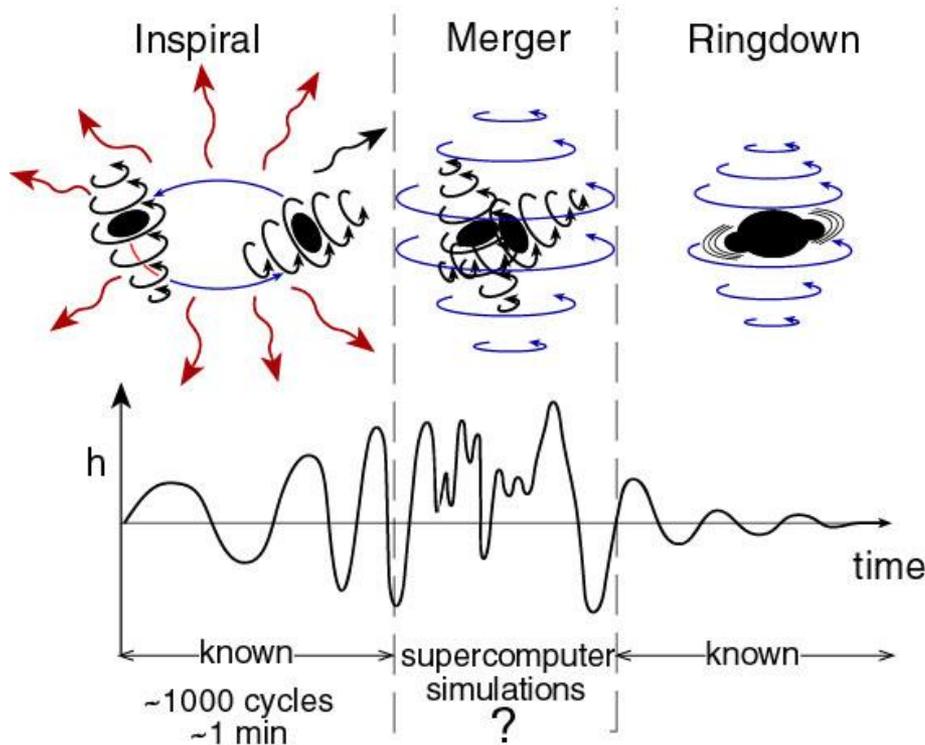


Coalescences de systèmes binaires

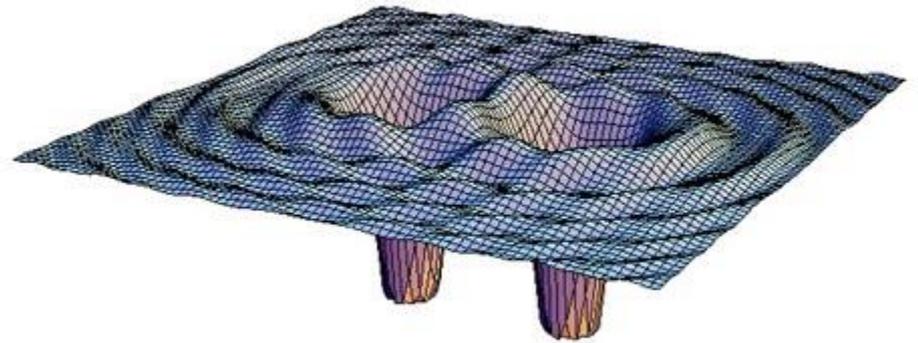
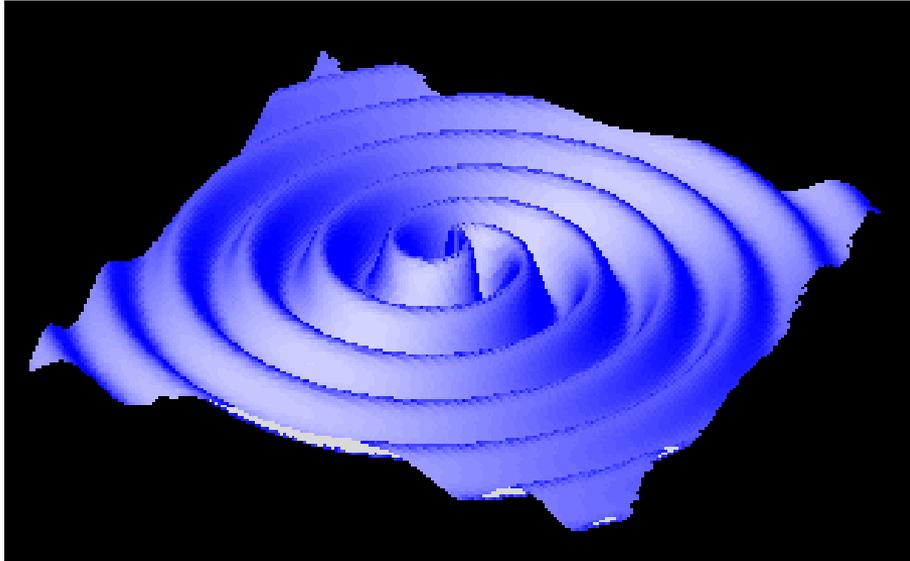
- Étoile à neutrons / Étoile à neutrons
- Étoile à neutrons / Trou Noir
- Trou Noir / Trou Noir



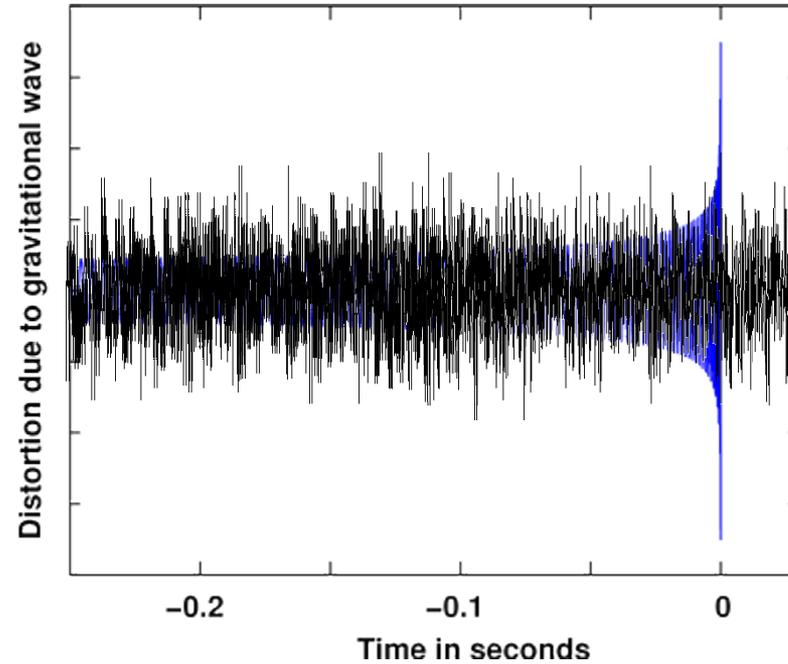
Signal très bien connu théoriquement (Partie I et III)
Durée : de quelques secondes à plusieurs minutes



BH-BH

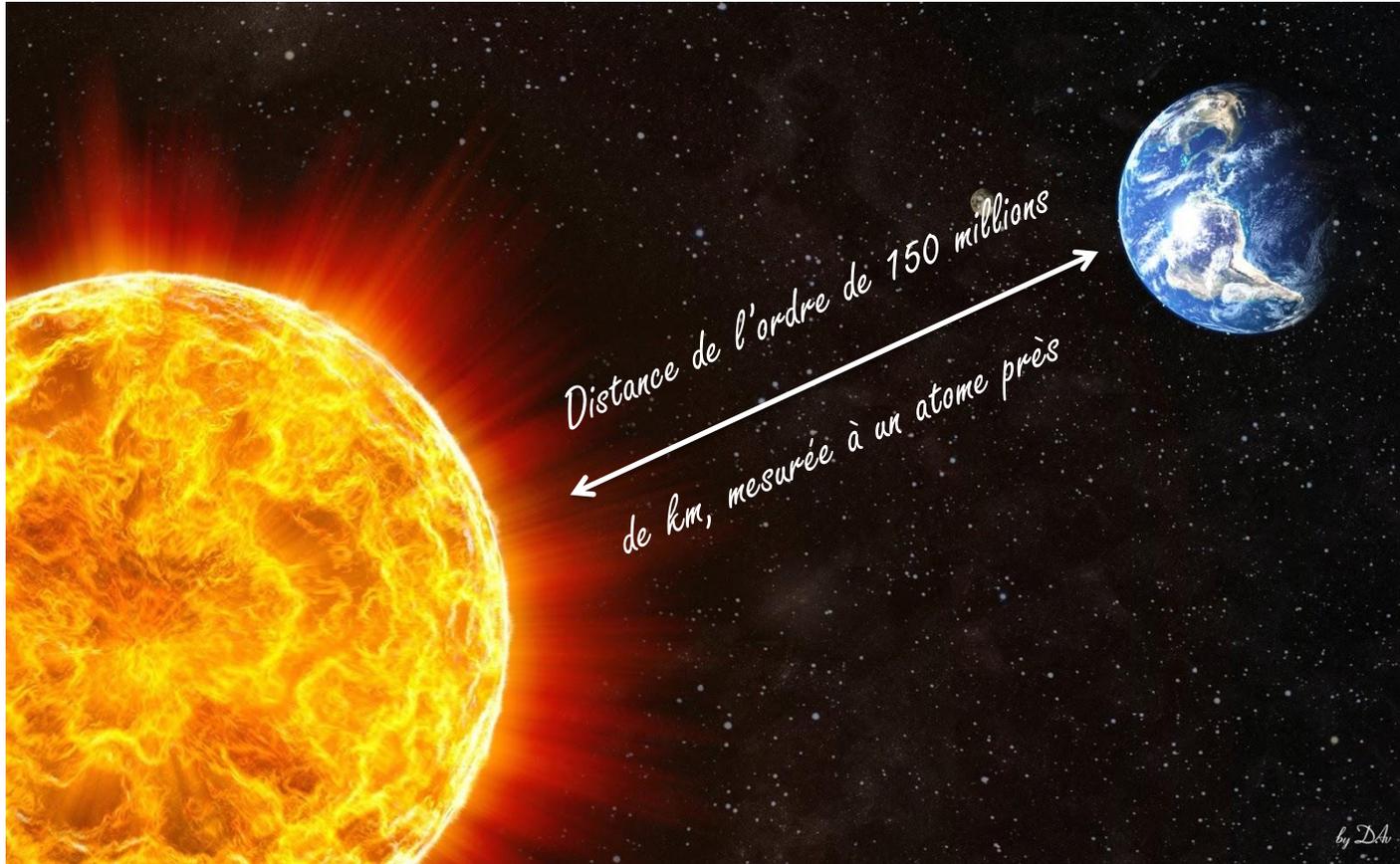


Le problème : c'est le bruit !

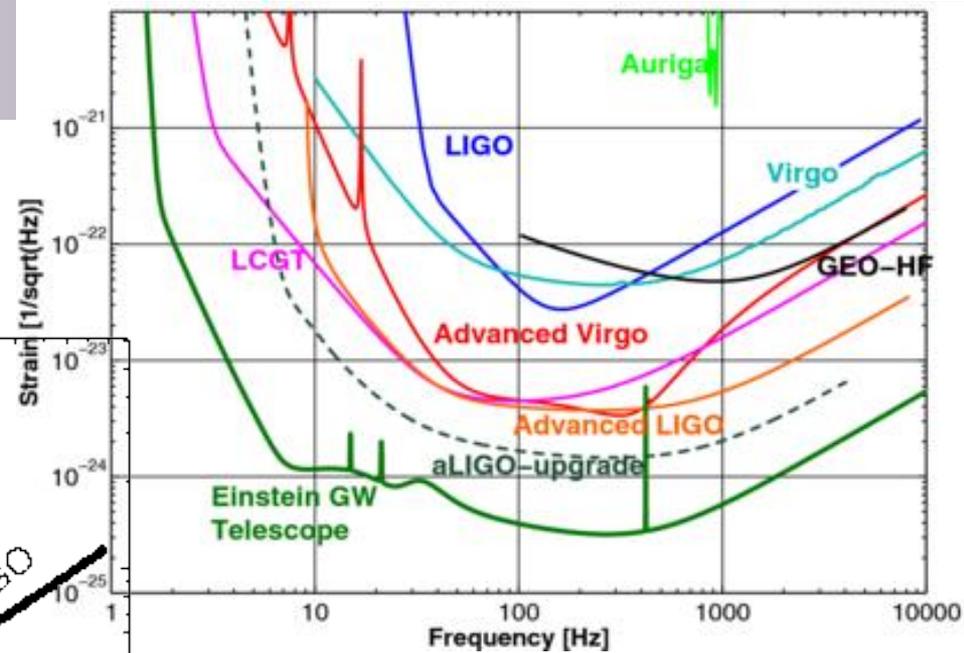
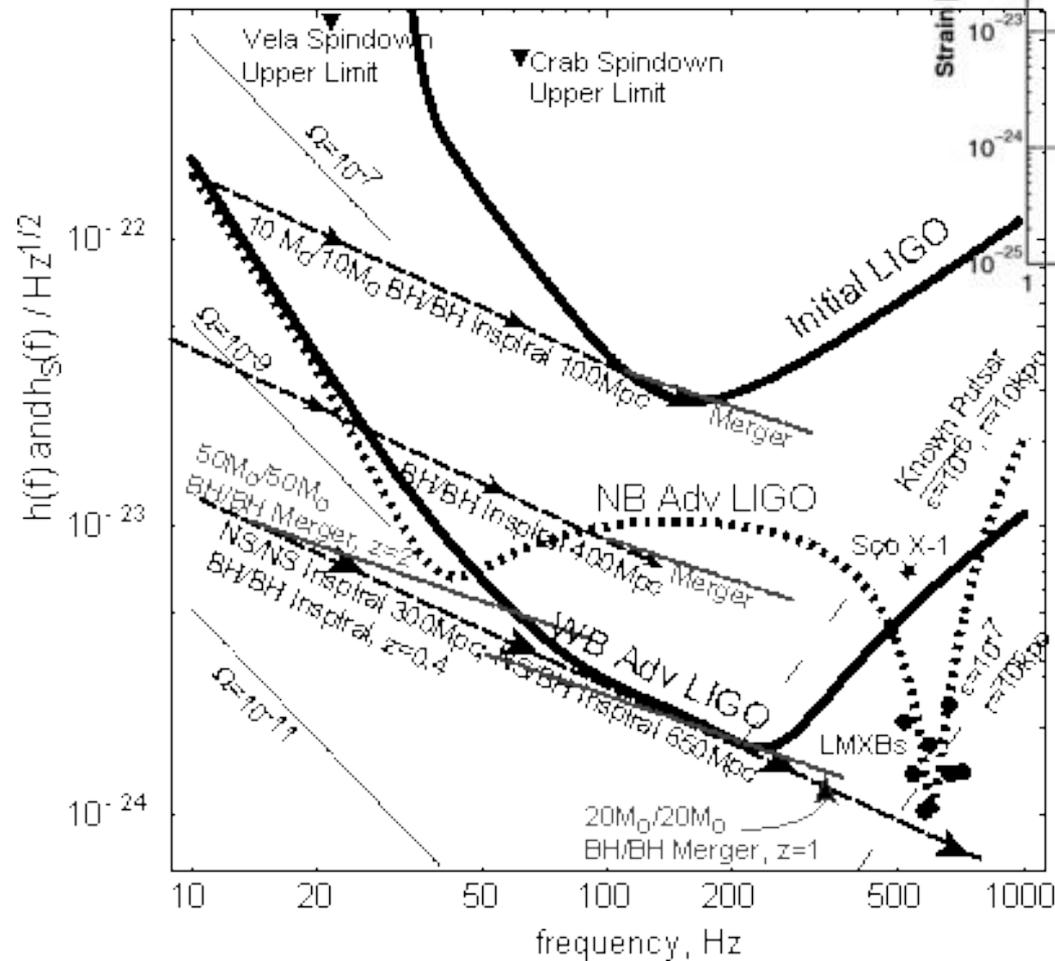


Comment les détecter ?

Il faut mesurer des longueurs avec une précision relative de 10^{-22} près



Sensibilité du détecteur

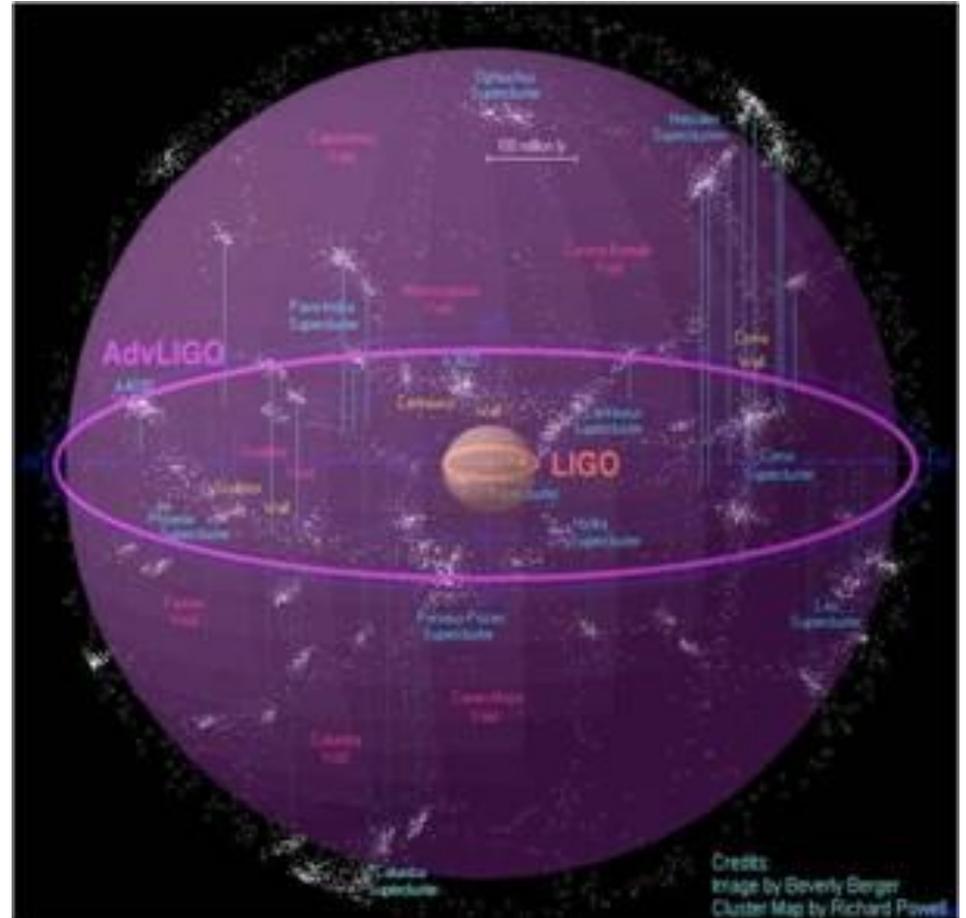


Taux de détection

Virgo : $h \sim 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$

AdV : $h \sim 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$

- 10 fois plus sensible
- 1000 fois plus volumineux
- 1000 fois plus de détection



A moins de 400 km : Advanced VIRGO



Calcul des taux en coïncidence

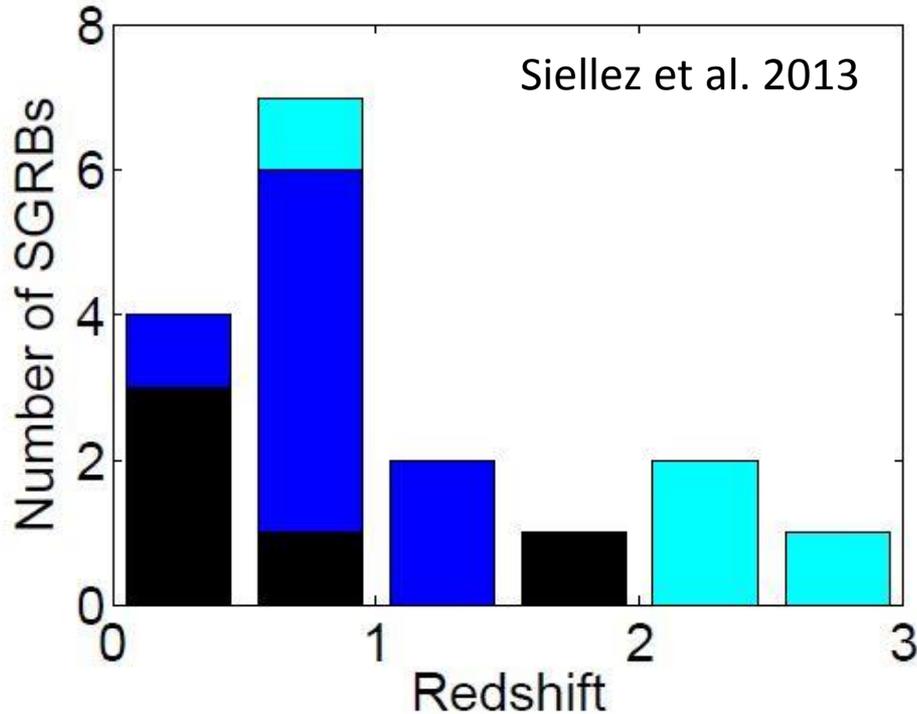
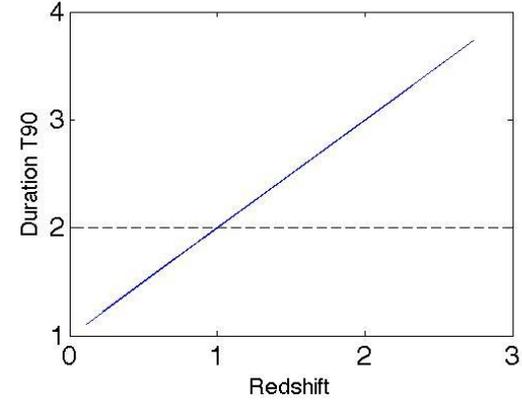


Figure 1. Redshift distribution of the rate of sGRBs by year. We indicate in dark blue the "classical" short bursts, and in cyan the 4 events we added. The black ones are canonical sGRBs with no conclusions on the presence of the plateau phase (see electronic version for colors).

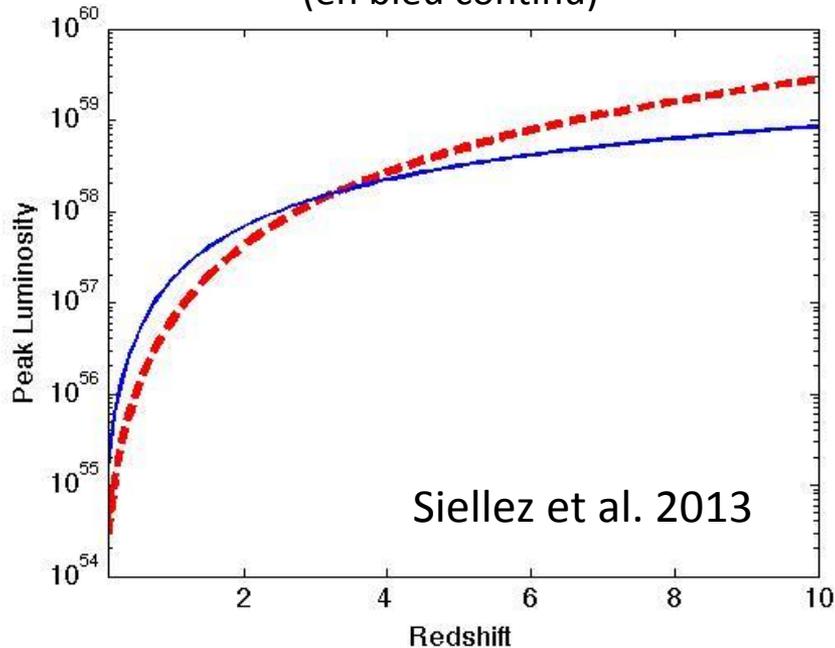
- Sélection d'un échantillon significatif de sursauts courts



- Biais instrumental de Swift pris en compte
 - Champ de vue ($\approx 10\%$)
 - Taux corrigés de détection simultanée pour Swift:
 $2.7 \pm 0.9 \text{ sGRB Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$

Correction d'autres biais

Luminosité du pic en fonction du redshift pour Swift (en pointillé rouge) comparé avec celle d'un sursaut gamma court représentatif (en bleu continu)



• Sensibilité de Swift

- Induit une limite de détection à haut redshift ($z > 3.3$)
- Chaque instrument a sa propre sensibilité et ses spécifications

• Biais du au redshift z

- 31.6% de sGRB avec z connu
Taux: 2.7 ± 0.9 sGRB $\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$
- Extension pour tous les sursauts courts :
Taux: 9 ± 3 sGRB $\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$

Taux de coïncidence entre OG et sGRB

Entre Swift et des détecteurs d'OG

| Detectors | Horizon (MPc) | Horizon (z) | Comobile volume (Gpc ³) | Occurrence rate EM (events / year) |
|--------------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------------|--|
| Advanced VIRGO | 150 | 0.035 | 0.013 | 0.05 ^{+0.03} _{-0.02} |
| Adv. LIGO/ Adv. VIRGO combined | 355 | 0.08 | 0.154 | 0.11 ^{+0.3} _{-0.2} |

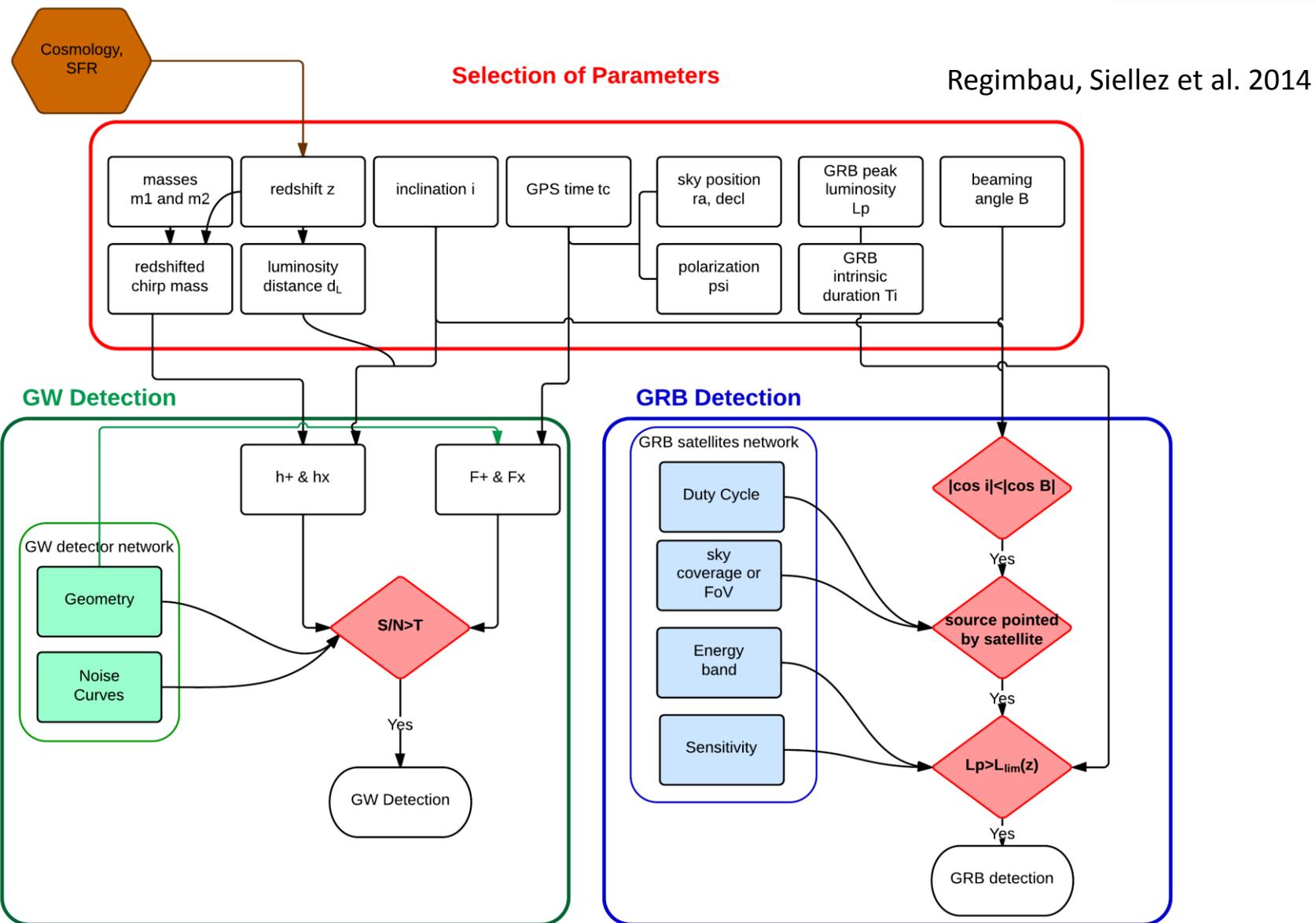
Pour AdV/aLIGO

| Missions | Swift | BATSE | FERMI | SVOM |
|---|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| F.o.V. | 1.4 sr | π sr | 9.5 sr | 2 sr |
| Energy band | 15-150 keV | 25 – 1800 keV | 8 keV – 40 MeV | 4 – 250 keV |
| Estimated rate (events yr ⁻¹) | 0.11 \pm 0.04 | 0.8 \pm 0.3 | 0.63 \pm 0.21 | 0.14 \pm 0.05 |

Méthode de Monte Carlo



Simulation Monte Carlo



ALV-Swift

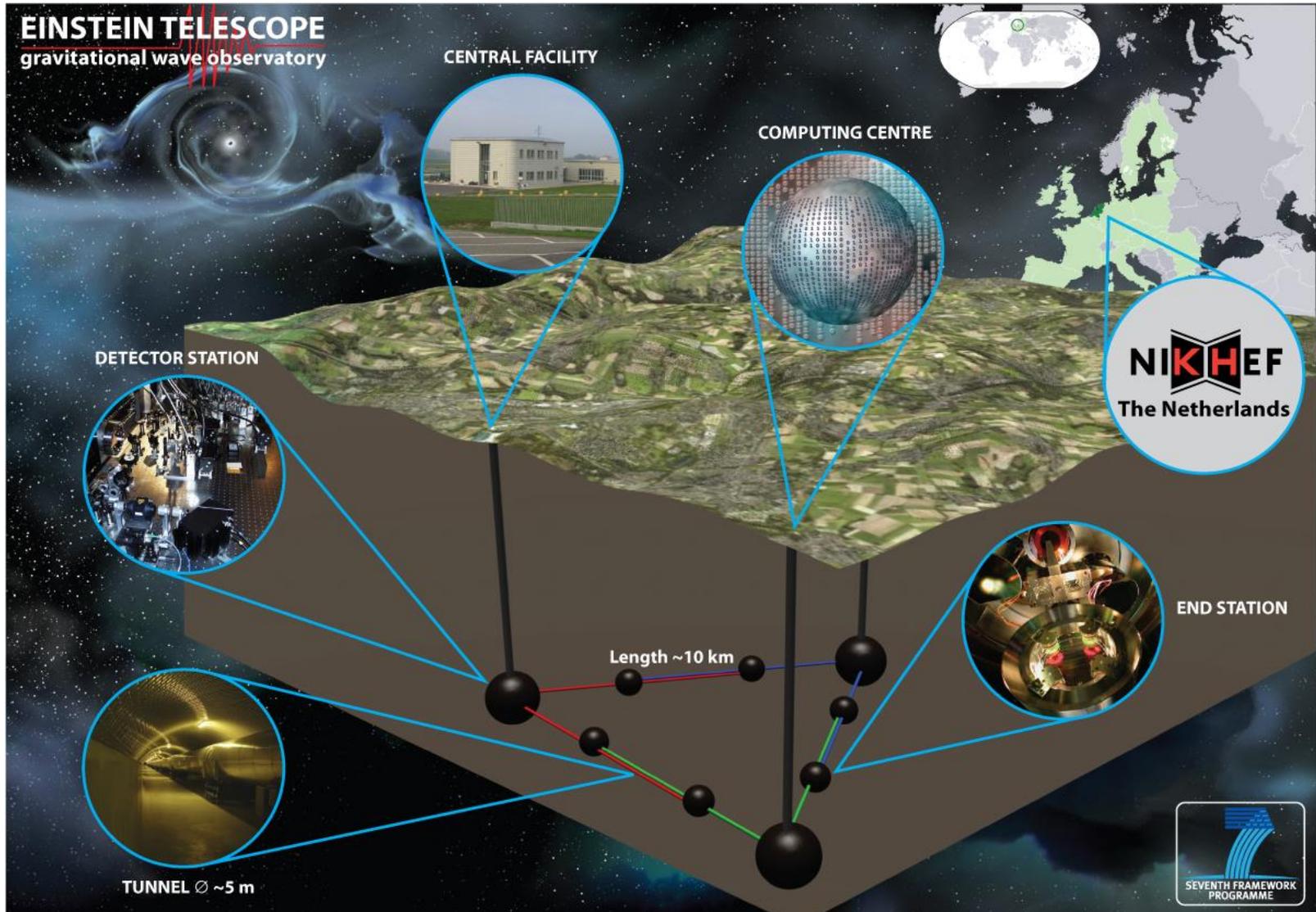
Regimbau, Siellez et al. 2014

| | 5° | 10° | 15° | 20° | 30° | GW |
|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| BNS | | | | | | |
| $\rho_T = 12$ | 0.004 – 0.005 | 0.01 – 0.02 | 0.03 – 0.04 | 0.06 – 0.07 | 0.11 – 0.13 | 2.5 – 3.0 |
| $\rho_T = 8$ | 0.01 – 0.02 | 0.05 – 0.07 | 0.10 – 0.13 | 0.17 – 0.23 | 0.35 – 0.46 | |
| NS-BH | | | | | | |
| $\rho_T = 12$ | 0.001 – 0.002 | 0.006 – 0.008 | 0.01 – 0.02 | 0.02 – 0.03 | 0.04 – 0.06 | 1.5 – 2.0 |
| $\rho_T = 8$ | 0.004 – 0.007 | 0.02 – 0.03 | 0.04 – 0.05 | 0.06 – 0.10 | 0.12 – 0.19 | |

ET – perfect detector

| | 5° | 10° | 15° | 20° | 30° | GW |
|-------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| BNS | $(0.8 - 1.8) \times 10^2$ | $(3 - 7) \times 10^2$ | $(0.7 - 1.6) \times 10^3$ | $(1.3 - 2.8) \times 10^3$ | $(2.5 - 5.8) \times 10^3$ | $(0.6 - 1.5) \times 10^4$ |
| NS-BH | 7 – 15 | 27 – 61 | 59 – 136 | 104 – 239 | 228 – 517 | $(1.3 - 2.4) \times 10^3$ |

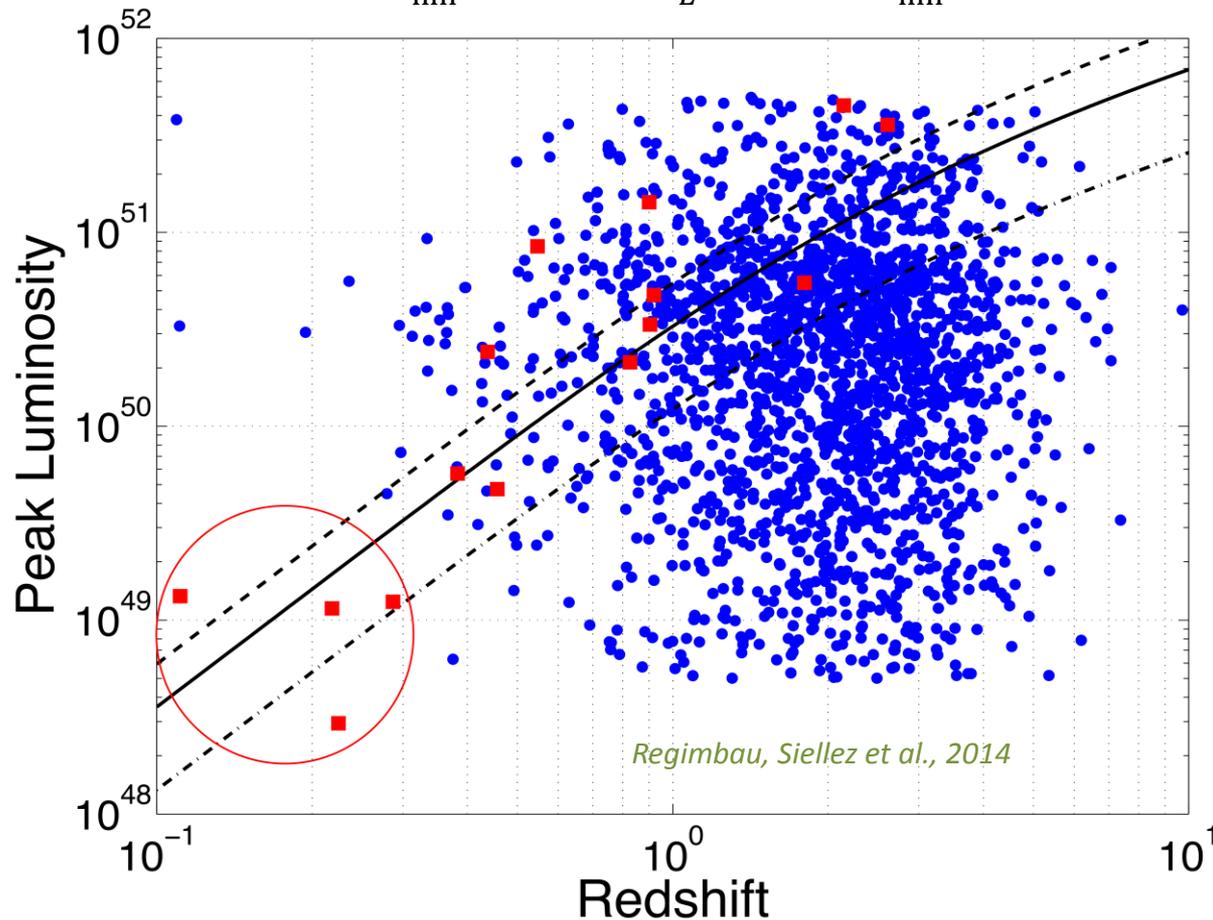
Einstein Detector



Luminosité en fonction du z pour Swift

Sources simulées et sursauts courts observés (Zhang, Z. B. et al. 2012, ArXiv: 1205.2411)

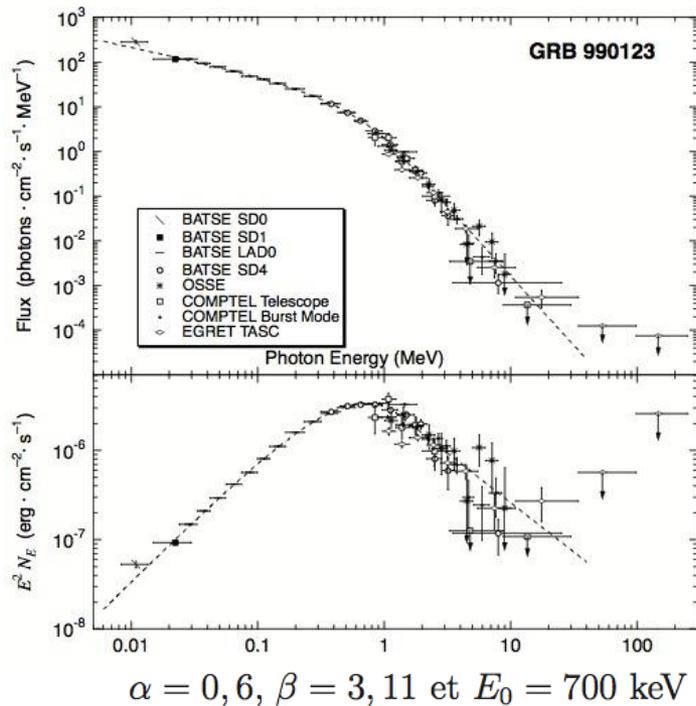
$$L_{\text{lim}}(z) = 4\rho d_L(z)k(z)F_{\text{lim}}$$



Pour observer 100%
[80%, 50%] des
sources avant $z \sim 1$,
nous devons atteindre:
 $F_{\text{lim}} = 0.025 \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
[0.26, 1.3]

Analyse de données des sursauts courts

Spectral properties : Band model



Low Energy :

harder

$$N(E) \propto E^{-\alpha}$$

$$0,6 \lesssim \alpha \lesssim 1,5$$

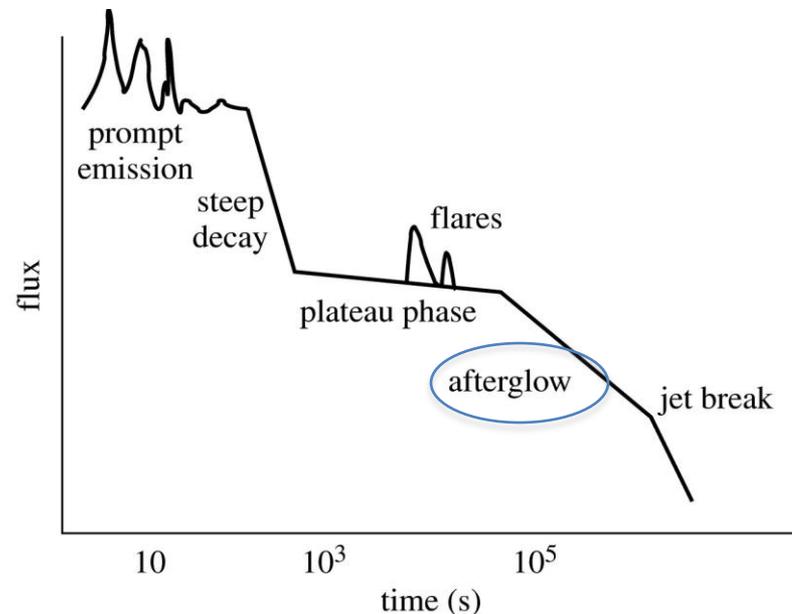
Hight Energy :

softer

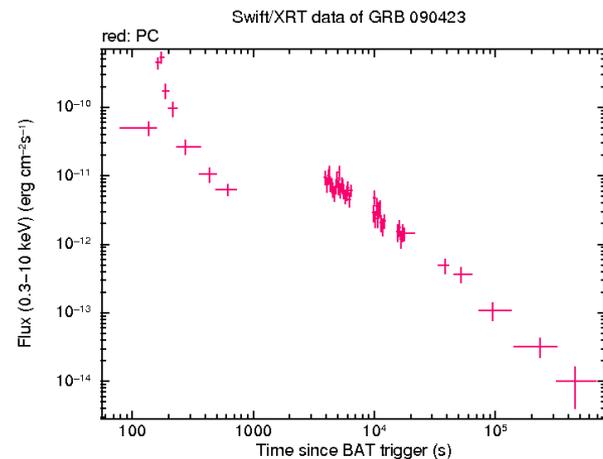
$$N(E) \propto E^{-\beta}$$

$$2 \lesssim \beta \lesssim 4$$

Curve of light

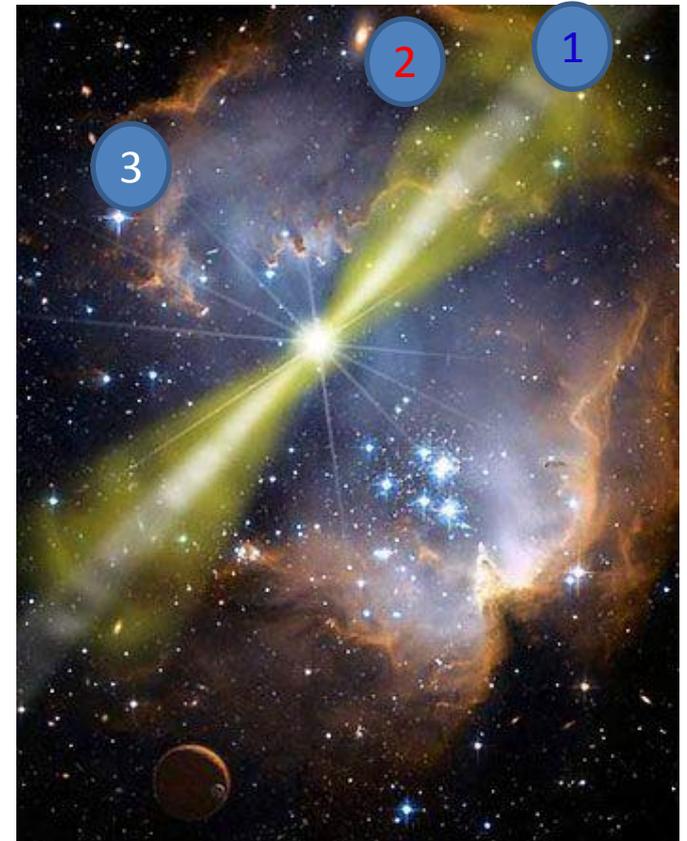
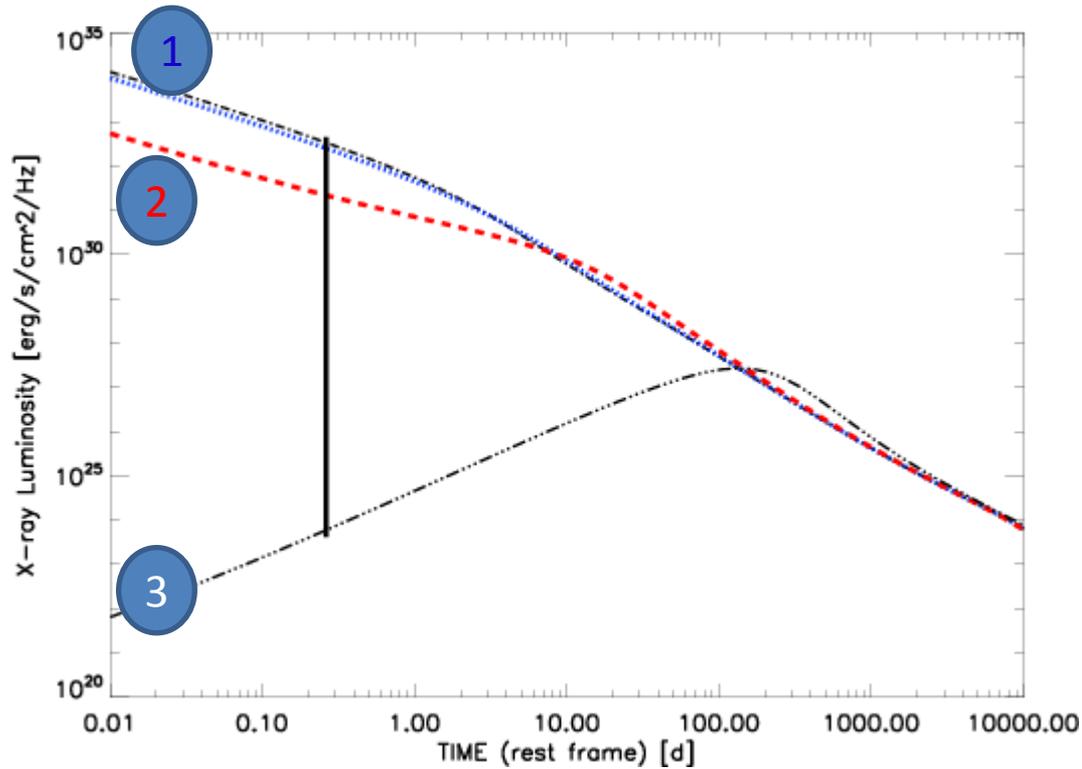


Example



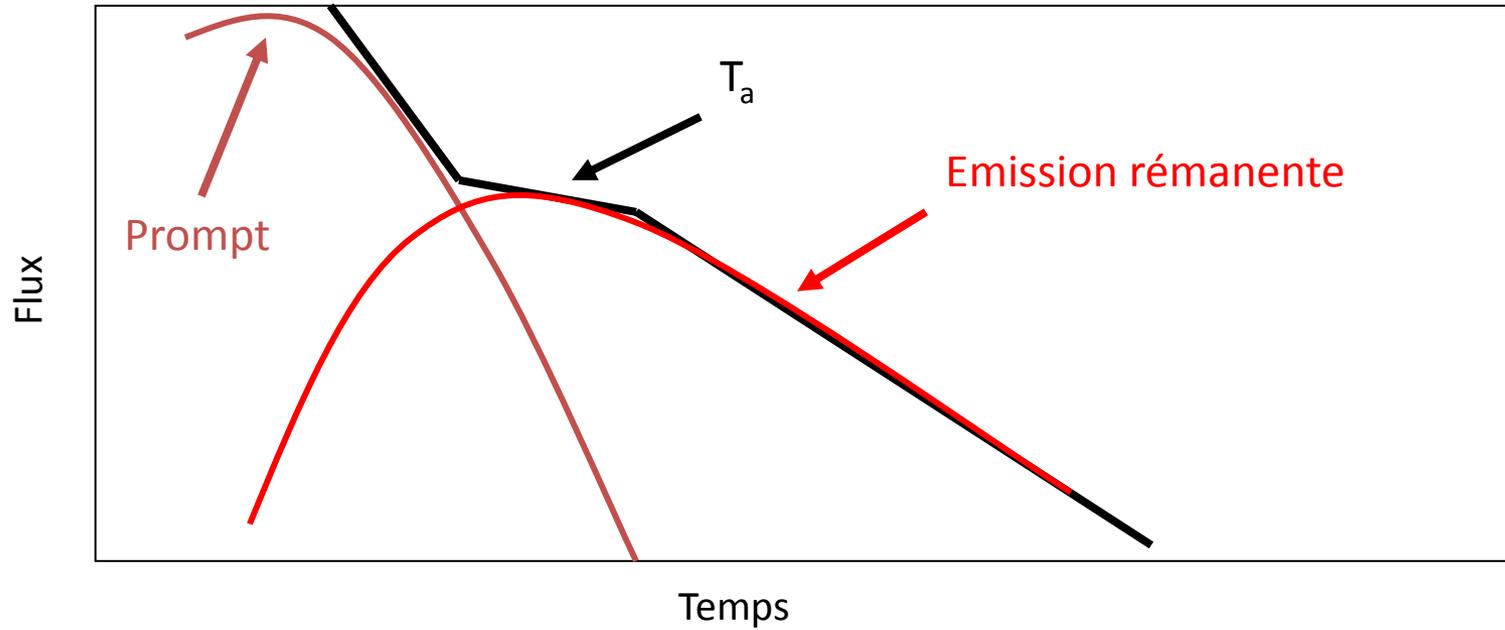
D'autres objectifs

- Observations hors axe



D'autres objectifs

- Observations du prompt



Les sursauts importants sur Terre ?

- Explosion Cambrienne

Apparition soudaine des métazoaires
(animaux pluricellulaires)

Did Gamma Ray Burst Induce Cambrian Explosion?

Pisin Chen

*Department of Physics and Graduate Institute of Astrophysics,
National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617*
*Leung Center for Cosmology and Particle Astrophysics (LeCosPA),
National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 10617 and
Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology,
SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.*

Remo Ruffini

*Department of Physics, University of Rome, La Sapienza, Rome, Italy and
International Center for Relativistic Astrophysics Network, Pescara, Italy*
(Dated: March 31, 2014)

One longstanding mystery in bio-evolution since Darwin's time is the origin of the Cambrian explosion that happened around 540 million years ago (Mya), where an extremely rapid increase of species occurred. Here we suggest that a nearby GRB event 500 parsecs away, which should occur about once per 5 Gy, might have triggered the Cambrian explosion. Due to a relatively lower cross section and the conservation of photon number in Compton scattering, a substantial fraction of the GRB photons can reach the sea level and would induce DNA mutations in organisms protected by a shallow layer of water or soil, thus expediting the bio-diversification. This possibility of inducing genetic mutations is unique among all candidate sources for major incidents in the history of bio-evolution. A possible evidence would be the anomalous abundance of certain nuclear isotopes with long half-lives transmuted by the GRB photons in geological records from the Cambrian period. Our notion also imposes constraints on the evolution of exoplanet organisms and the migration of panspermia.

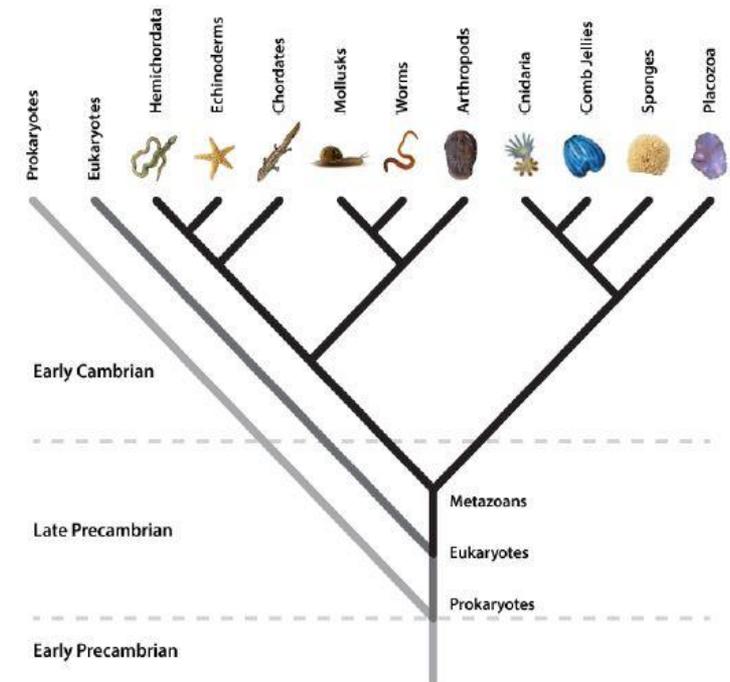


FIG. 1: Figure 1. Cambrian Explosion: Evidence in fossil records show that all major phyla were established around 540 Mya in the Cambrian period.

Les sursauts importants sur Terre ?

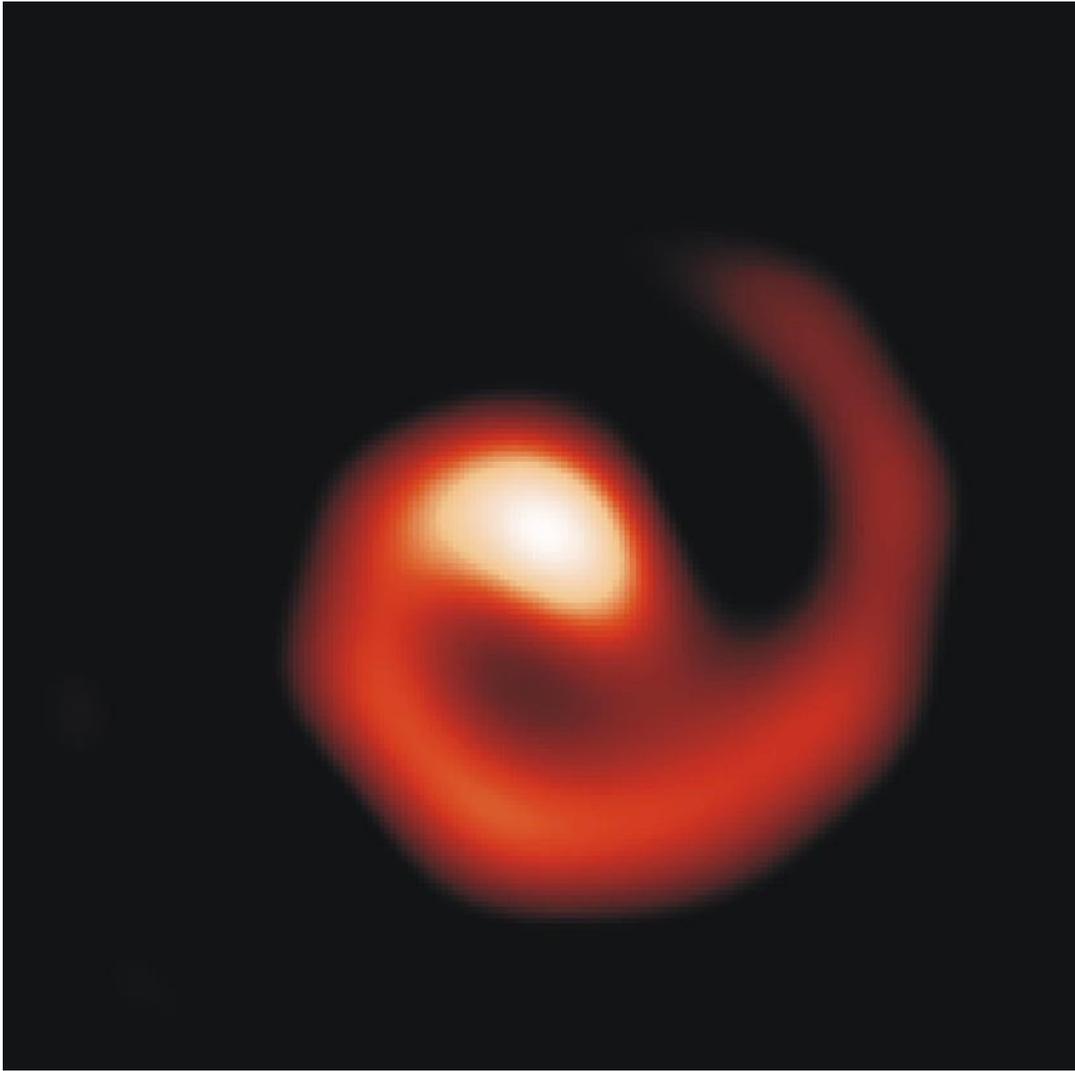


- **Un sursaut gamma aurait épargné la Terre au huitième siècle**
 - De 774 à 775
 - Flux de rayons cosmiques => augmentation spectaculaire du taux de carbone 14 dans l'atmosphère.
 - Révélé en 2012 par l'étude des cernes de cèdres du Japon
 - Résultat d'un sursaut gamma court survenu dans la Voie lactée, mais heureusement suffisamment loin pour épargner la vie sur Terre.

Les sursauts importants sur Terre ?

WR104

- Découverte en 98
- Située à 8475 al de la Terre
- Constellation du sagitaire



WR 104 avec son disque de poussières spiralé ([téléscope Keck](#), [Hawaj](#), 1999)

Crédit: [W.M. Keck Observatory](#)

Merci pour votre attention !

That's all Folks!

Coalescence
d'étoiles à neutrons

Ondes Gravitationnelles