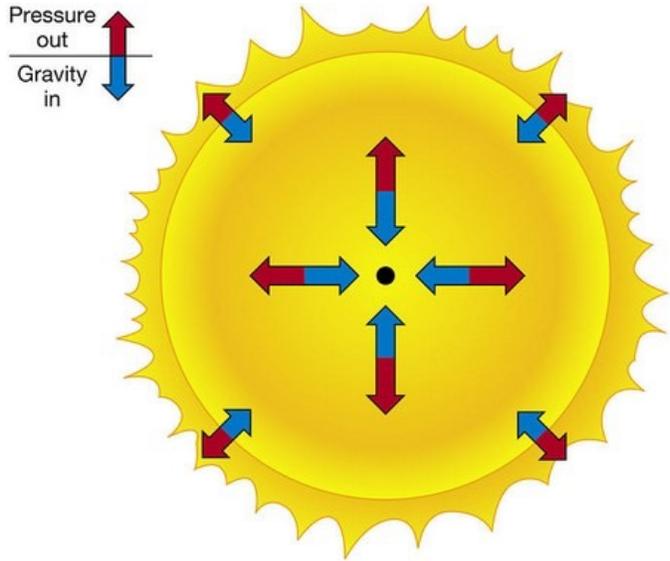


# Supernovae et neutrinos

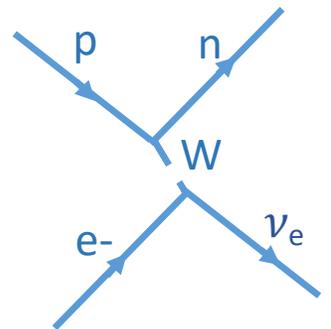
(Et  dans tout ça ?)

Pablo DEL AMO SANCHEZ

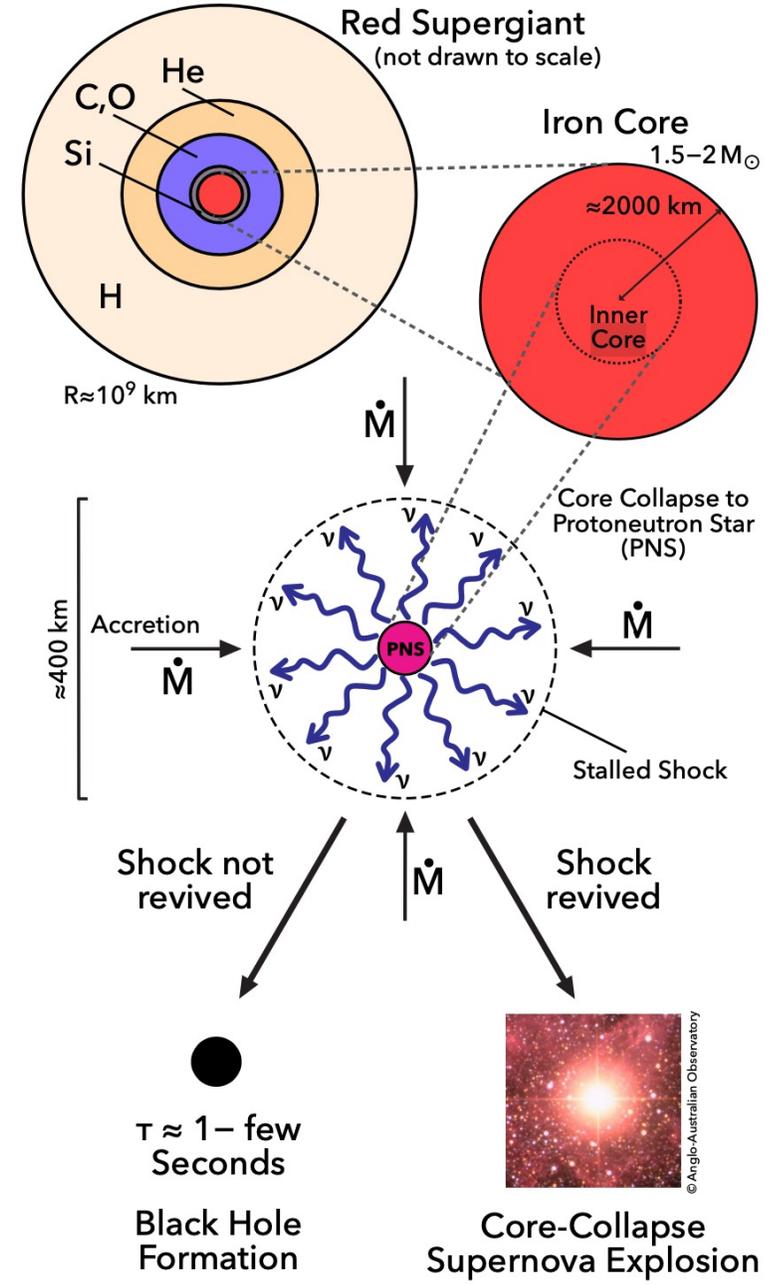
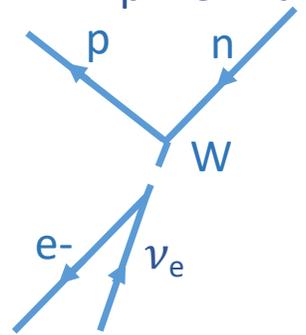
# Qu'est-ce qu'une supernova?



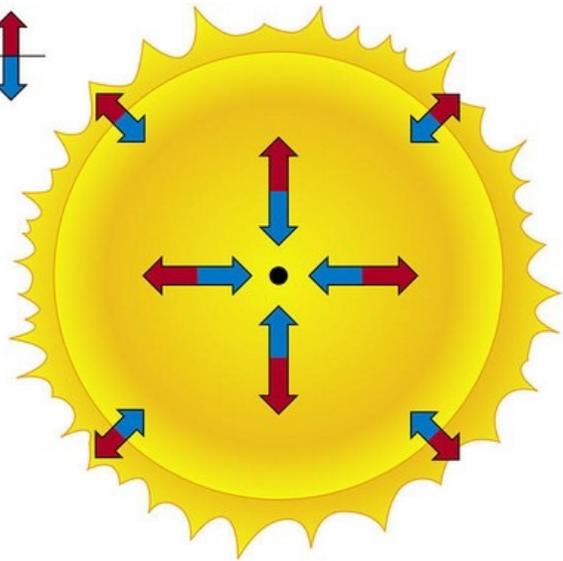
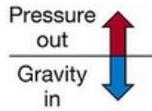
- Etoiles en équilibre : gravité compensée par pression maintenue au cœur par réactions de fusion nucléaire
- Collapse
- Gravité pousse p et e- ensemble :



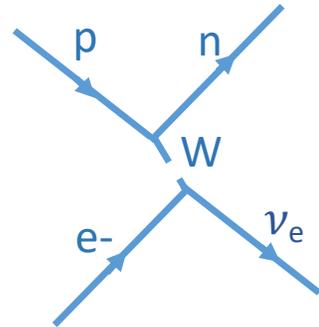
(l'inverse de la désintégration du neutron :  $n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu_e$ )



# Qu'est-ce qu'une supernova?

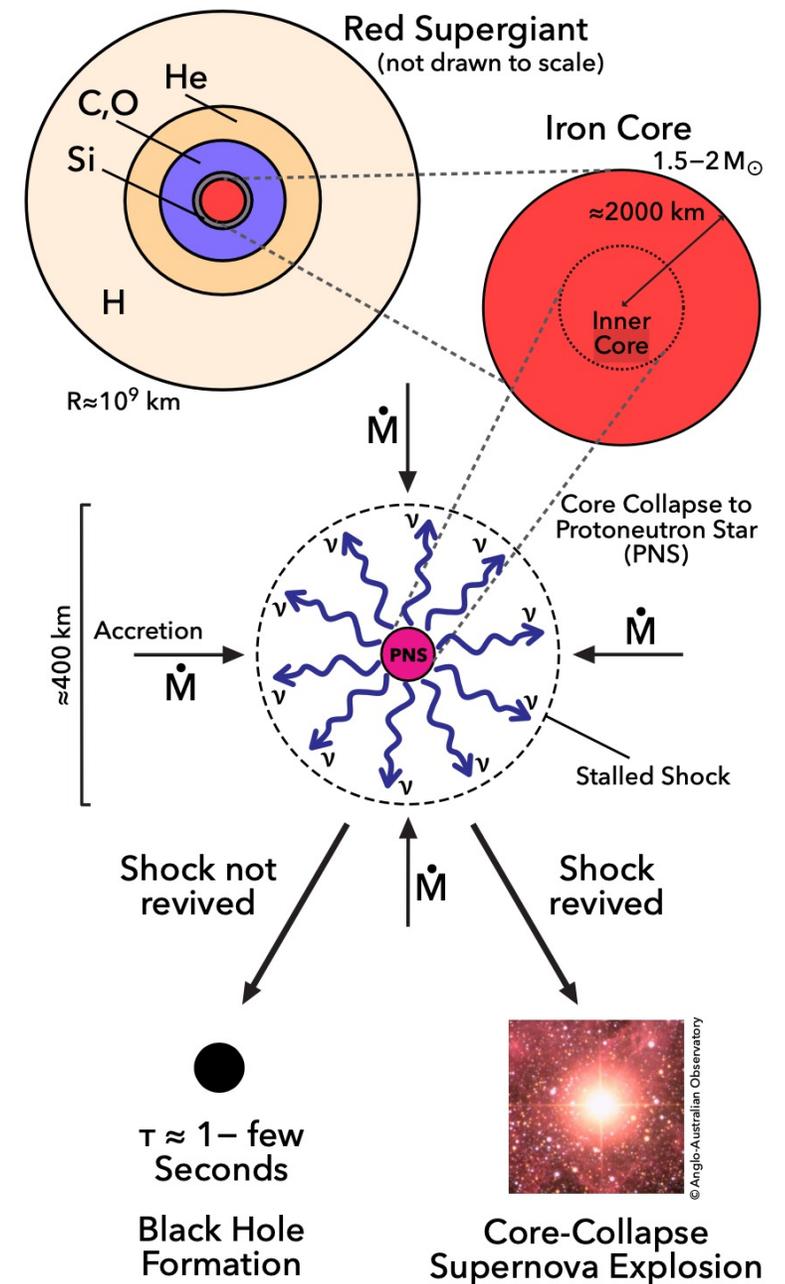


- Etoiles en équilibre : gravité compensée par pression maintenue au cœur par réactions de fusion nucléaire
- Collapse
- Gravité pousse p et e- ensemble :

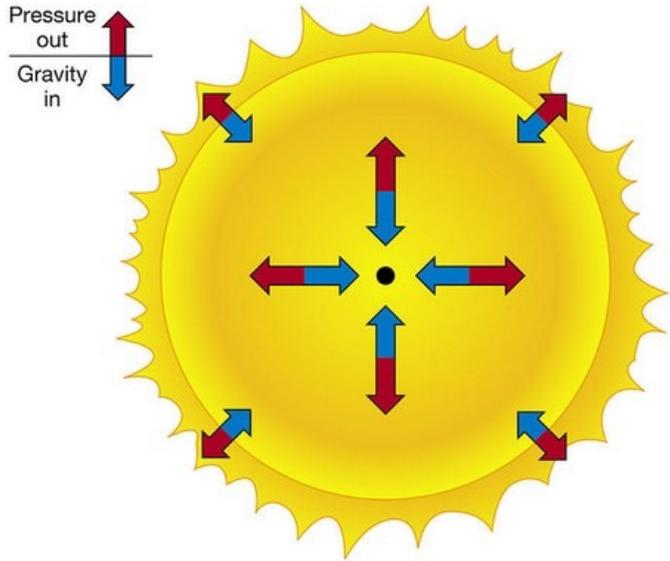


- Energie libérée sous forme de  $\nu_e$  ?  $E_{\text{pot avant}} - E_{\text{pot après}}$   $E_{\text{pot}} = GMm/R$

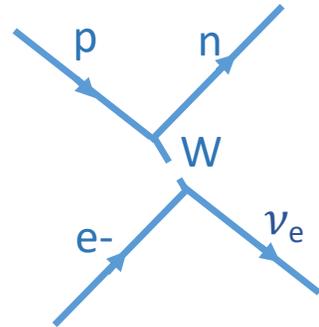
$$G \simeq 6,7 \times 10^{-11} \text{ unités SI}, \quad M_{\text{coeur}} \sim 1,5 M_{\text{soleil}} \sim 3 \times 10^{30} \text{ kg}, \quad R_f \sim 10 \text{ km}$$



# Qu'est-ce qu'une supernova?



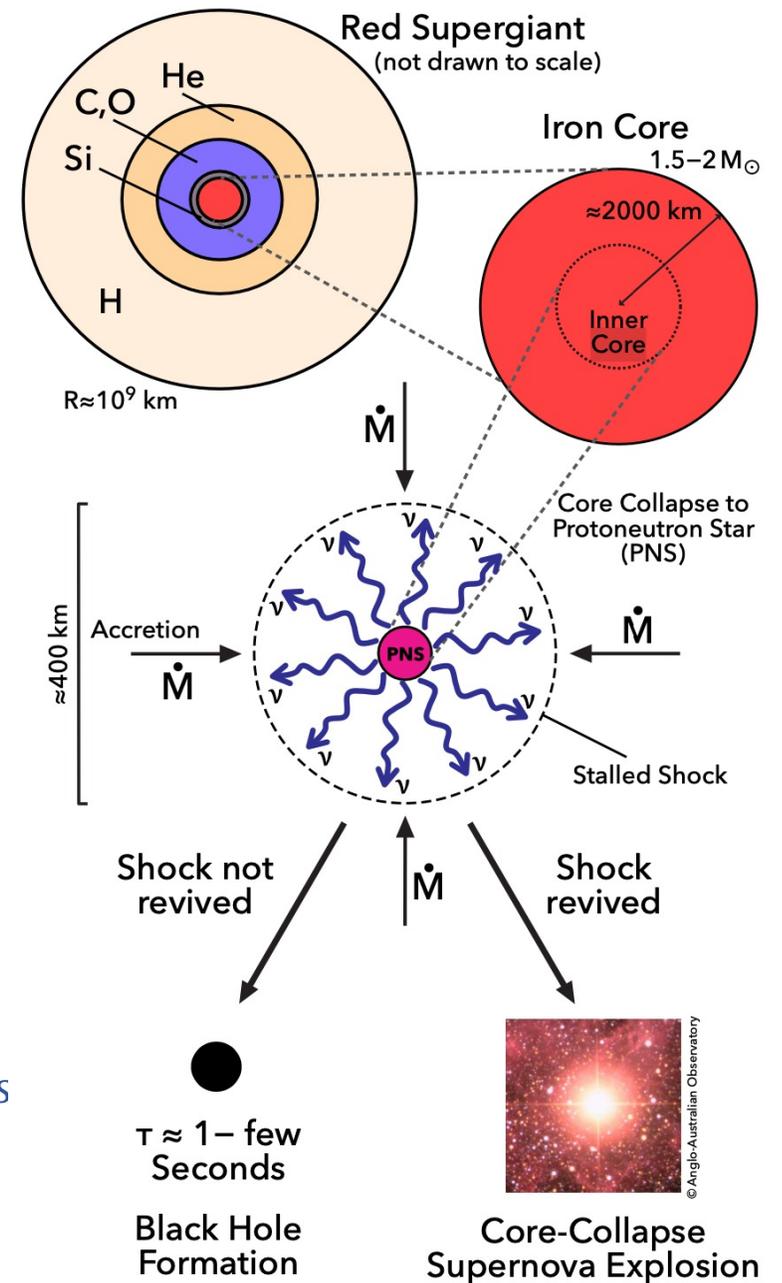
- Etoiles en équilibre : gravité compensée par pression maintenue au cœur par réactions de fusion nucléaire
- Collapse
- Gravité pousse p et e- ensemble :



- Energie libérée sous forme de  $\nu_e$  ?  $E_{\text{pot avant}} - E_{\text{pot après}}$   $E_{\text{pot}} = GMm/R$

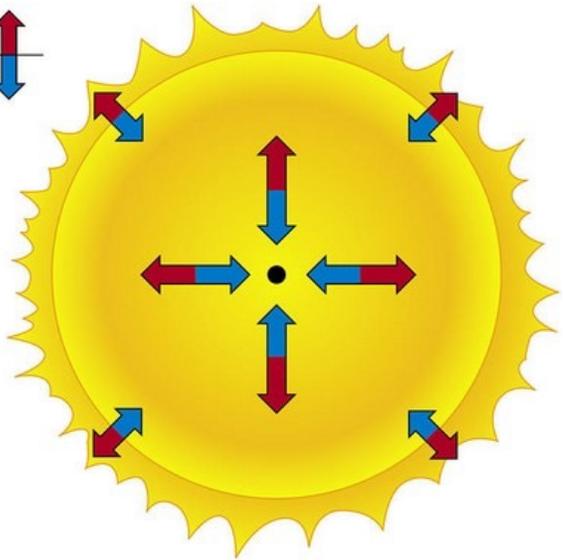
$$E_{\nu} \sim G \frac{M_{\text{coeur}}^2}{R_f} - G \frac{M_{\text{coeur}}^2}{R_i} \sim 6 \times 10^{46} \text{ J} \quad \text{à comparer p.ex. avec } P_{\gamma}^{\text{soleil}} \sim 4 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

$$G \simeq 6,7 \times 10^{-11} \text{ unités SI}, \quad M_{\text{coeur}} \sim 1,5 M_{\text{soleil}} \sim 3 \times 10^{30} \text{ kg}, \quad R_f \sim 10 \text{ km}$$

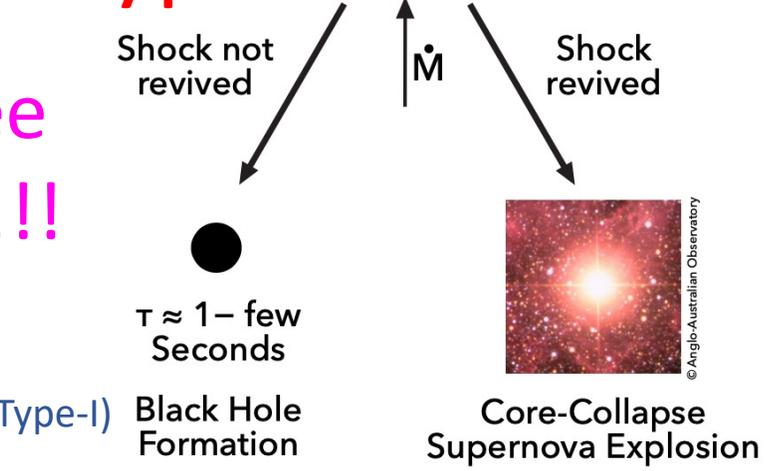
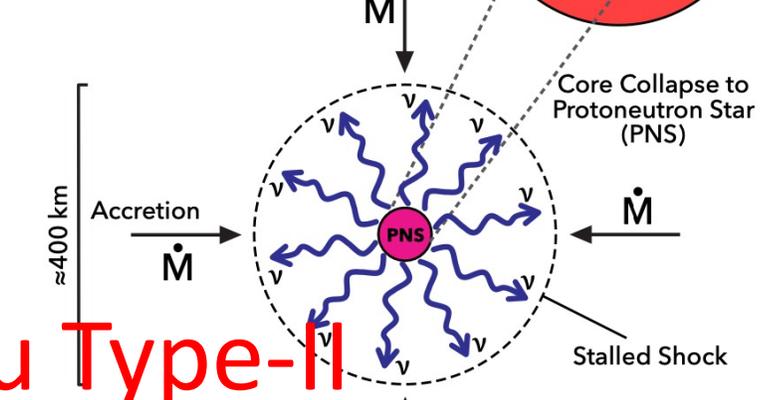
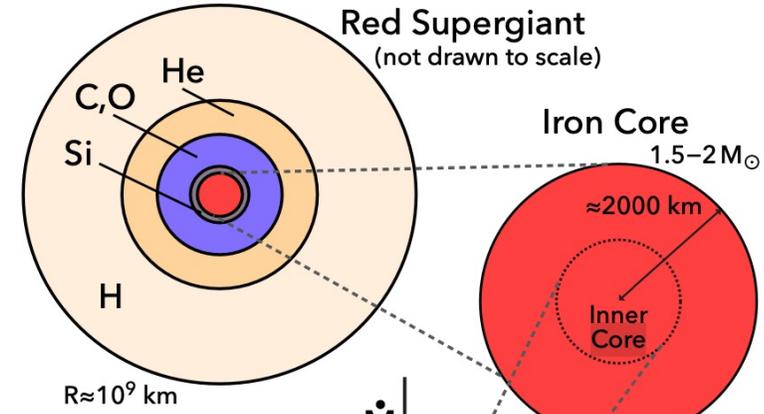


# Qu'est-ce qu'une supernova?

Pressure out  
Gravity in



- Etoiles en équilibre : gravité compensée par pression maintenue au cœur par réactions de fusion nucléaire
- Collapse
- Gravité pousse p et e- ensemble :



## Supernova à effondrement de cœur ou Type-II

99% de l'énergie rayonnée sous forme de neutrinos!!!

SN 2023ixf, galaxie du Moulinet 21 M ly

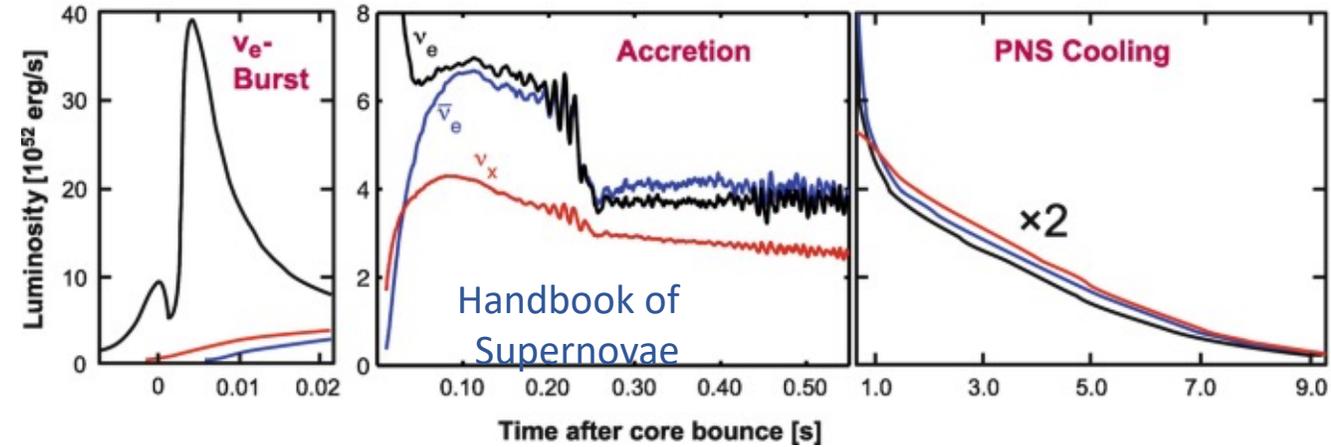
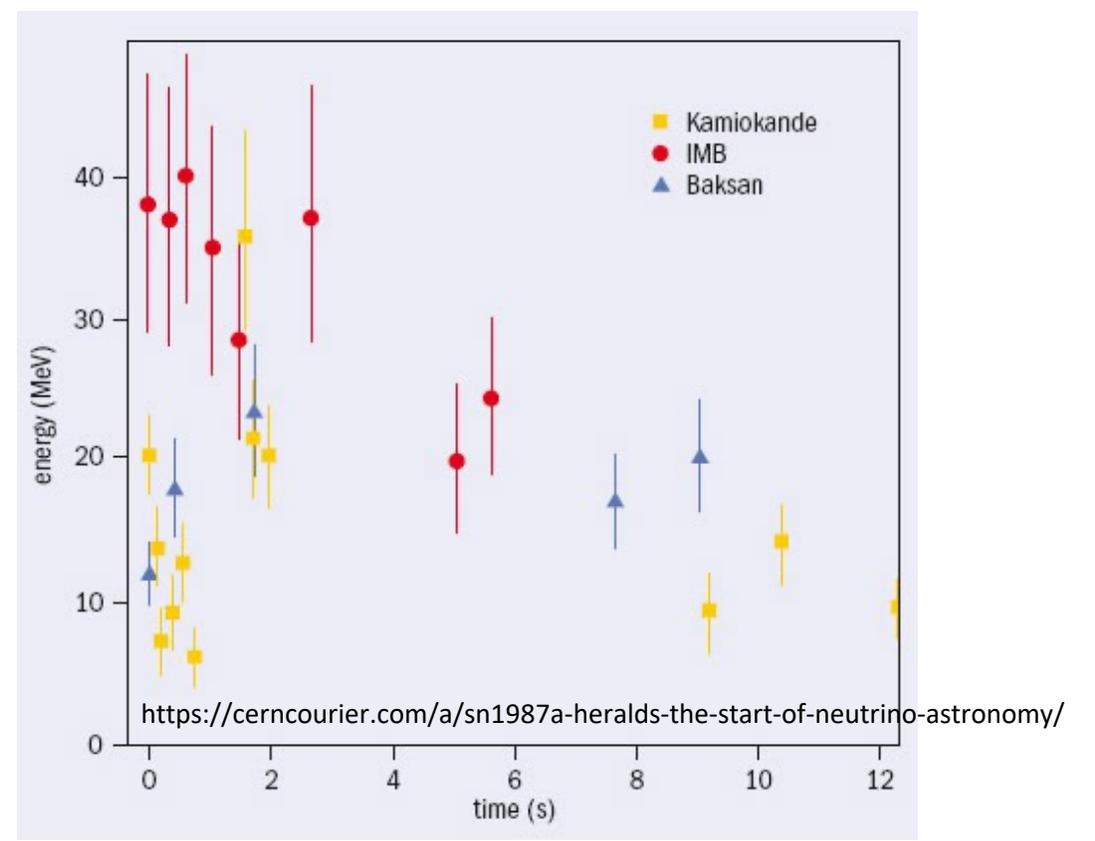
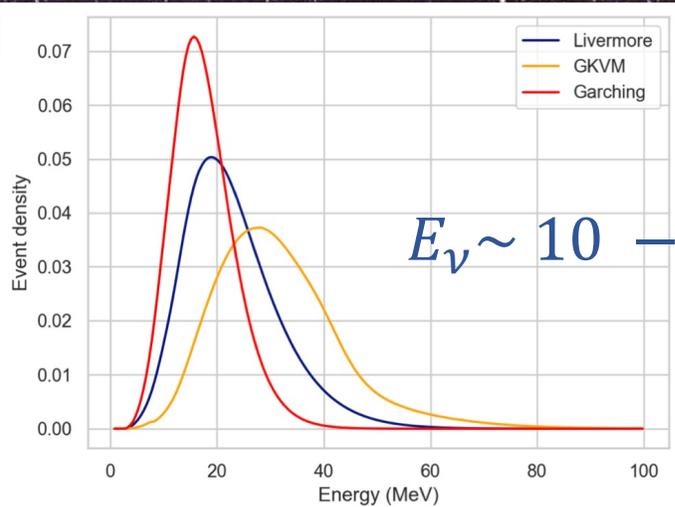
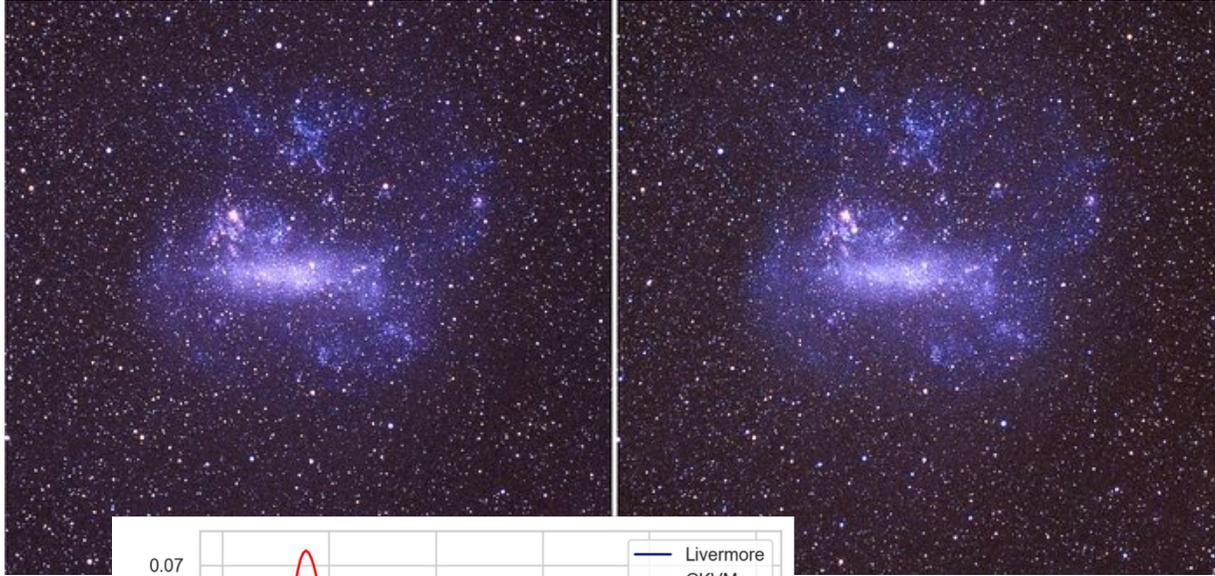


©tomato from Shropshire

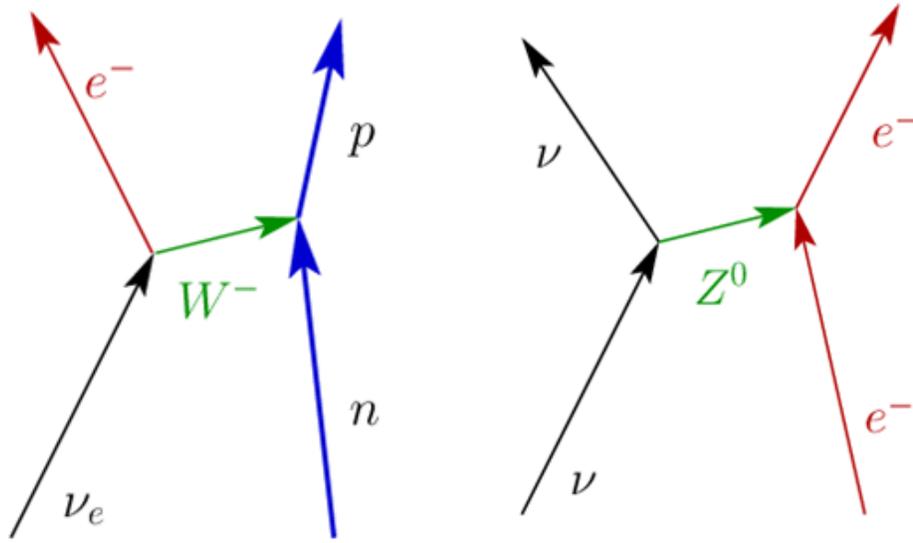
Attention: une autre variété de supernova (thermonucléaire ou Type-I) ne dégage pas de neutrino

# Neutrinos de supernova

- DéTECTÉS pour SN 1987A (Grand Nuage de Magellan)



# Détection de neutrinos de supernova



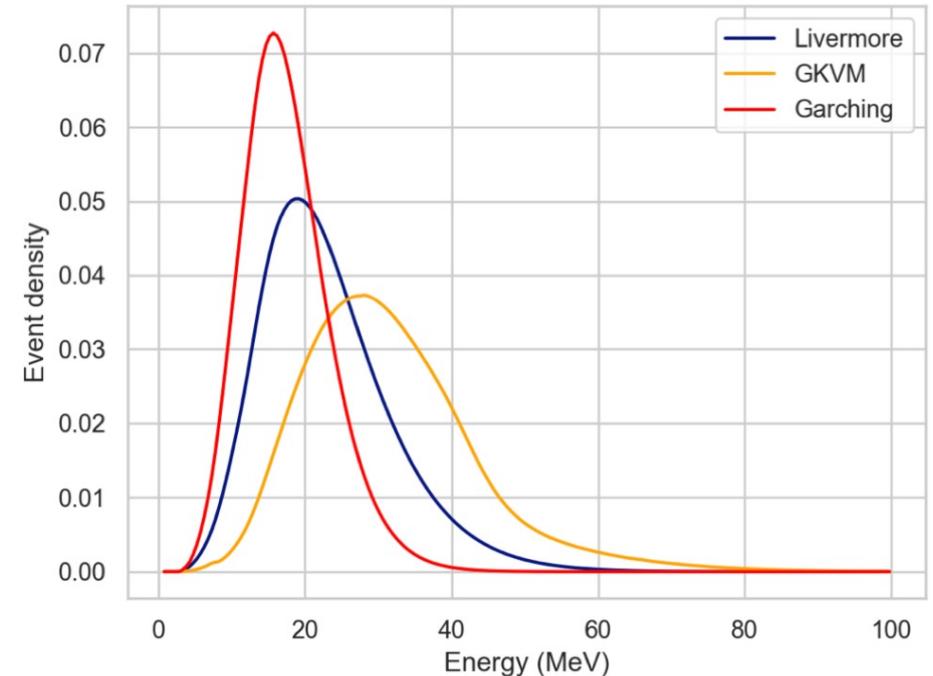
Charged current

Neutral current

*40 kton LAr, 10 kpc SN*

Channel	Liver-more	GKVM	Garching
$\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$	2648	3295	882
$\bar{\nu}_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^+ + {}^{40}\text{Cl}^*$	224	155	23
$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$	341	206	142
<b>Total</b>	<b>3213</b>	<b>3656</b>	<b>1047</b>

- Par Courant Chargé et Elastic Scattering
- Des milliers d'évts attendus pour une supernova dans la galaxie (~10 kpc)
- Physique : pointage, physique des supernovae, propriétés des neutrinos...



# Physique avec les neutrinos de supernova

- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$

# Physique avec les neutrinos de supernova

- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$
- $p = \gamma m \beta$  et  $E = \gamma m$  donc  $1/\beta = E/p$  où  $p = f(E, m) \rightarrow$  développement en série (Taylor)
- Rappel :  $\sqrt[n]{1+x} \approx 1 + nx$

# Physique avec les neutrinos de supernova

- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$
- $p=\gamma m\beta$  et  $E=\gamma m$  donc  $1/\beta=E/p$  où  $p = f(E,m) \rightarrow$  développement en série (Taylor)
- Rappel :  $\sqrt[n]{1+x} \approx 1 + nx$

$$t = \frac{D}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{m_\nu}{E} \right)^2 \right)$$

# Physique avec les neutrinos de supernova

- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$
- $p = \gamma m \beta$  et  $E = \gamma m$  donc  $1/\beta = E/p$  où  $p = f(E, m) \rightarrow$  développement en série (Taylor)
- Rappel :  $\sqrt[n]{1+x} \approx 1 + nx$

$$t = \frac{D}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{m_\nu}{E} \right)^2 \right)$$

Application numérique :

si  $m_\nu = 0,1$  eV et  $D = 10$  kpc = 33000 années lumière  
que vaut  $t_1 - t_2$  pour  $E_1 = 10$  MeV et  $E_2 = 20$  MeV ?

# Physique avec les neutrinos de supernova

- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$
- $p=\gamma m\beta$  et  $E=\gamma m$  donc  $1/\beta=E/p$  où  $p = f(E,m) \rightarrow$  développement en série (Taylor)
- Rappel :  $\sqrt[n]{1+x} \approx 1 + nx$

$$t = \frac{D}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{m_\nu}{E} \right)^2 \right)$$

Application numérique :

si  $m_\nu = 0,1$  eV et  $D = 10$  kpc = 33000 années lumière  
que vaut  $t_1 - t_2$  pour  $E_1 = 10$  MeV et  $E_2 = 20$  MeV ?

$$t_1 - t_2 \sim 40 \mu s$$

# Physique avec les neutrinos de supernova

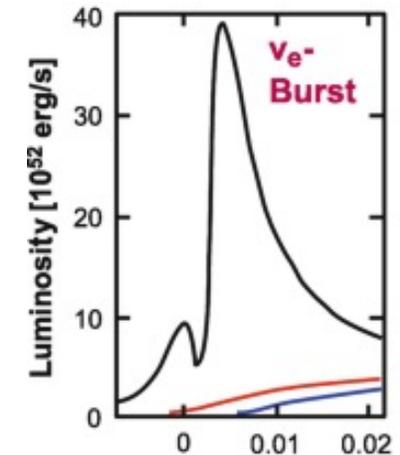
- Temps de parcours pour un neutrino massif ?
- $D/v \rightarrow v? \rightarrow \beta?$
- $p=\gamma m\beta$  et  $E=\gamma m$  donc  $1/\beta=E/p$  où  $p = f(E,m) \rightarrow$  développement en série (Taylor)
- Rappel :  $\sqrt[n]{1+x} \approx 1 + nx$

$$t = \frac{D}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{m_\nu}{E} \right)^2 \right)$$

Application numérique :

si  $m_\nu = 0,1$  eV et  $D = 10$  kpc = 33000 années lumière  
que vaut  $t_1 - t_2$  pour  $E_1 = 10$  MeV et  $E_2 = 20$  MeV ?

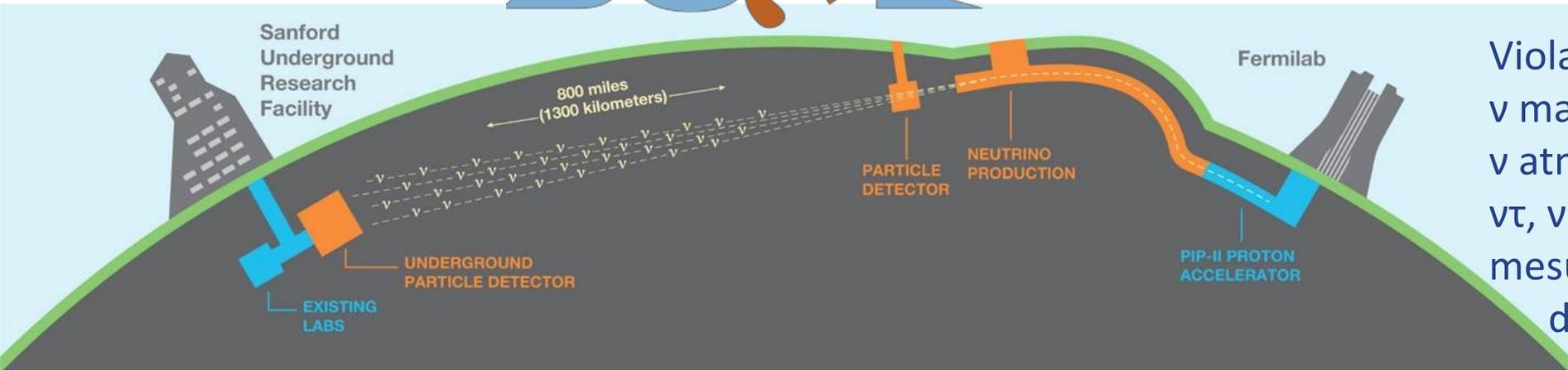
$$t_1 - t_2 \sim 40 \mu s$$



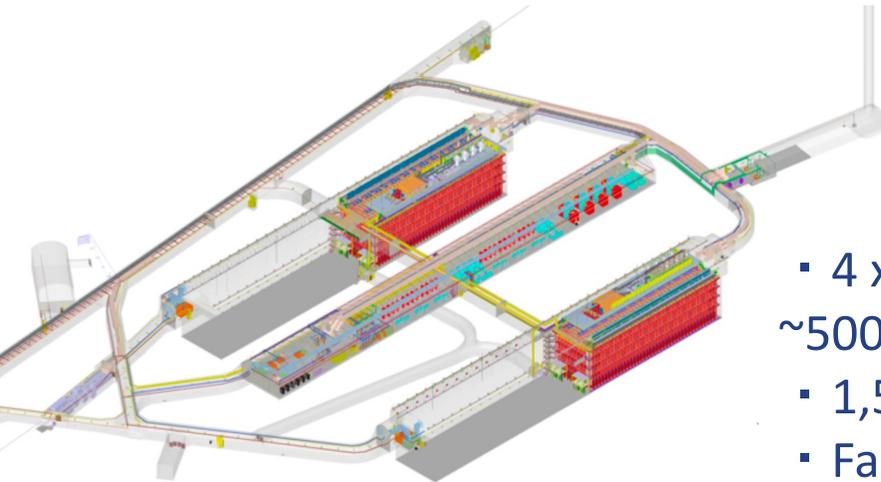
Sensibilité  $O(m \sim 0,1\text{eV})$

Phys.Rev.Lett.**129**,121802 (2022)

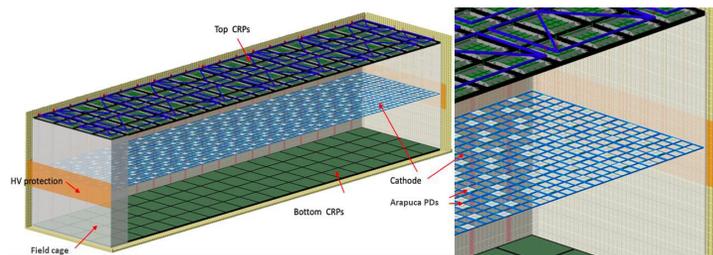
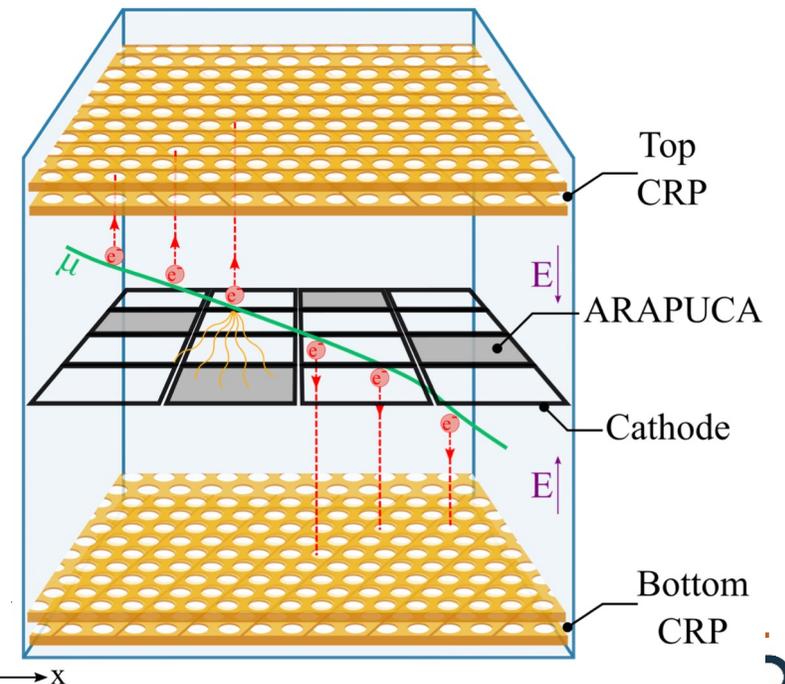
# DUNE



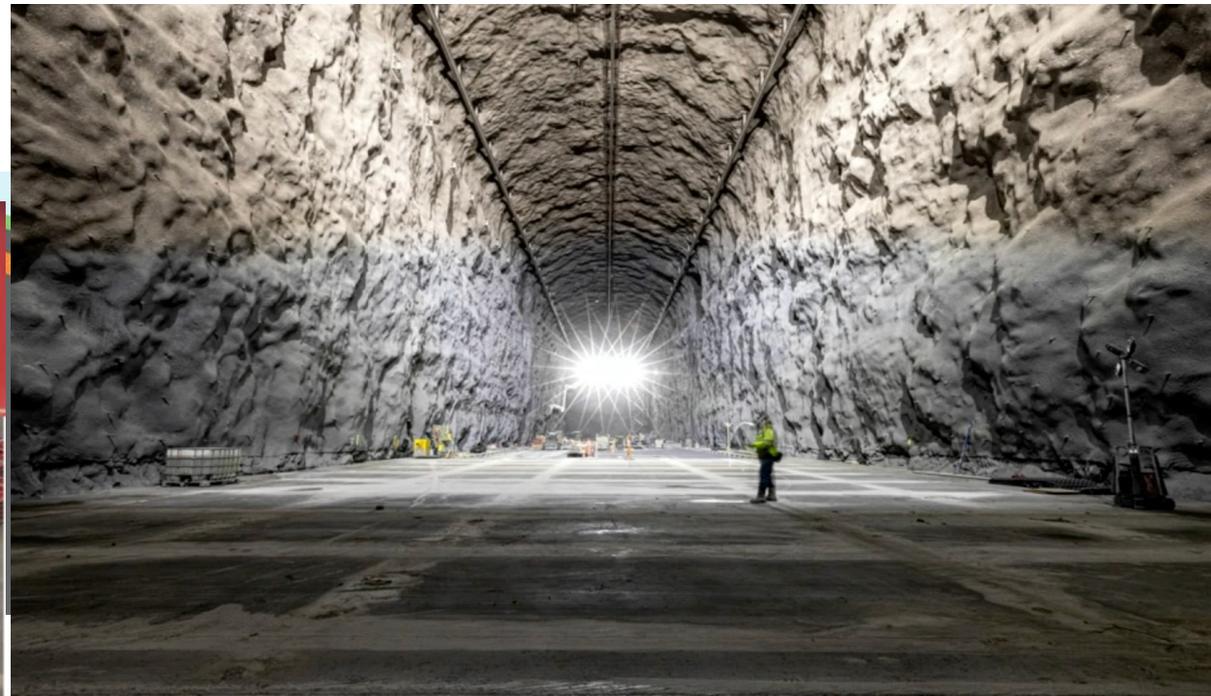
Violation de CP dans les neutrinos,  
 $\nu$  mass ordering, supernovae,  
 $\nu$  atmosphériques,  $\nu$  solaires,  
 $\nu_\tau$ ,  $\nu$  stériles,  
 mesures précision matrice PMNS,  
 désintégration nucléons...



- 4 x TPC 17 kt LAr (60 m x 12 m x 12 m),  $\sim 500$  V/cm, Photon Detection (ARAPUCA)
- 1,5 km sous la surface
- Faisceau  $\nu_\mu$  1,2 MW  $\rightarrow$  2,4 MW
- FD1 : Horizontal Drift
- FD2 : **Vertical Drift**
- FD3,4 : choix techno en cours



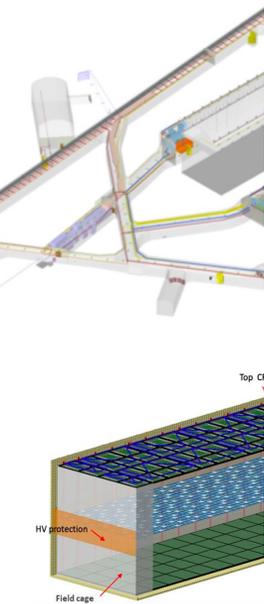
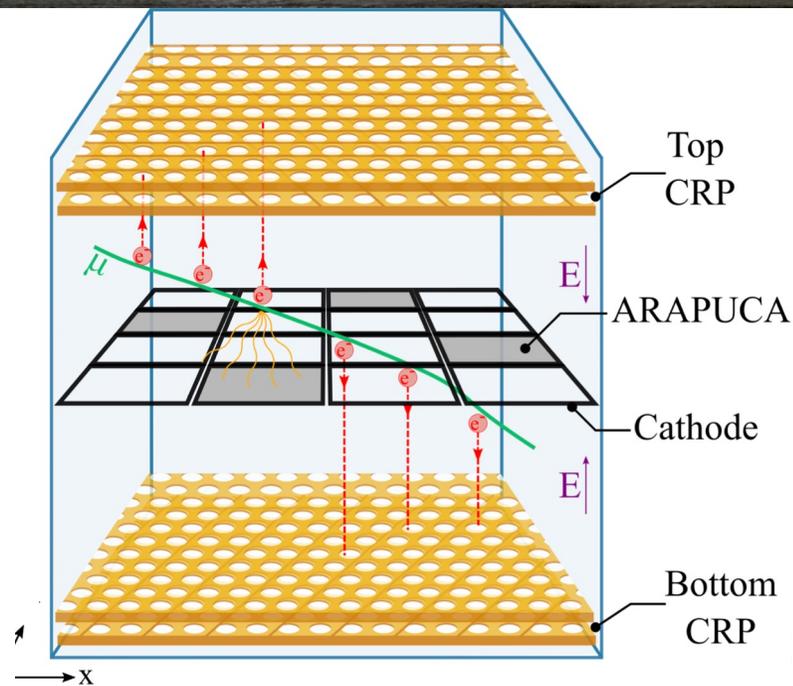
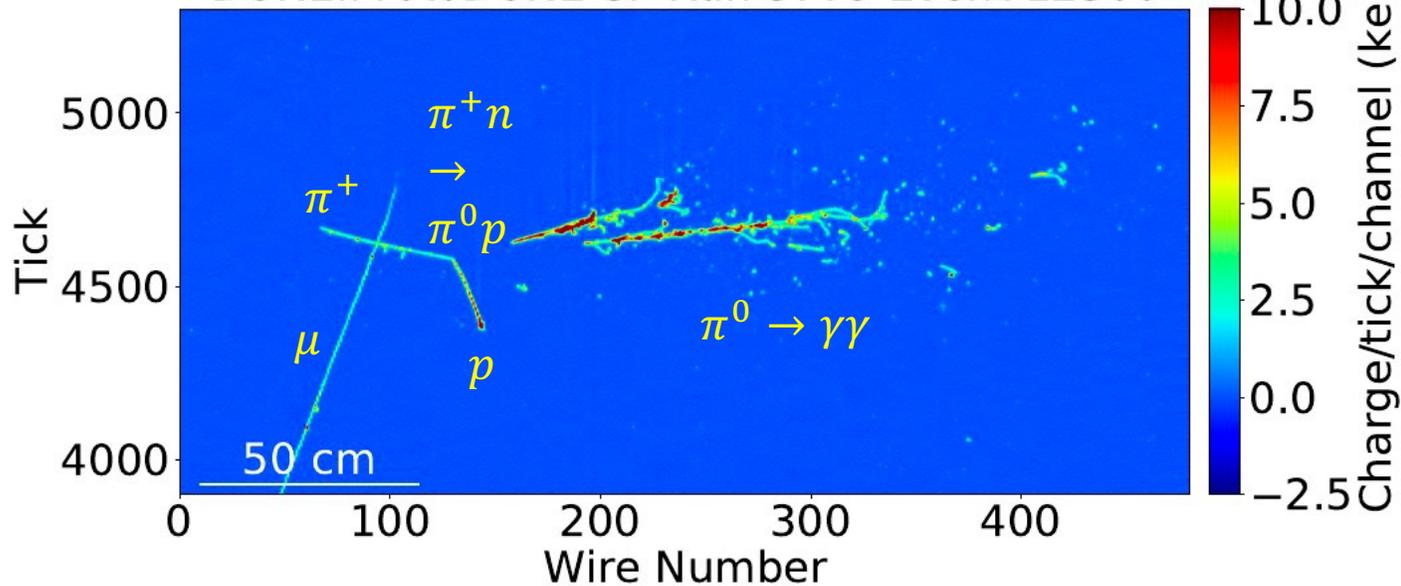
Pablo DEL AMO SANCHEZ, LAPP - IN2P3 - CNRS/ U. Savoie  
 Mont Blanc

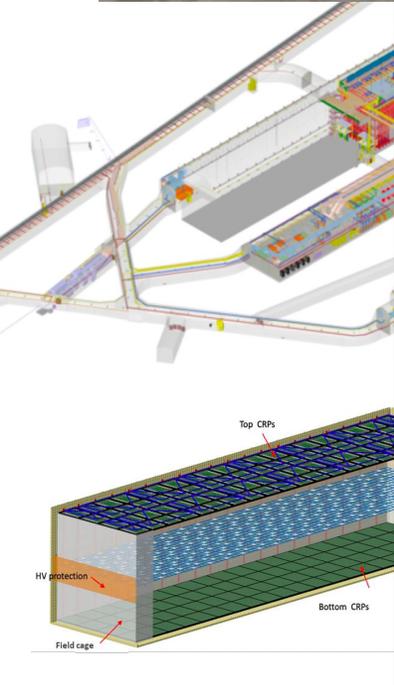
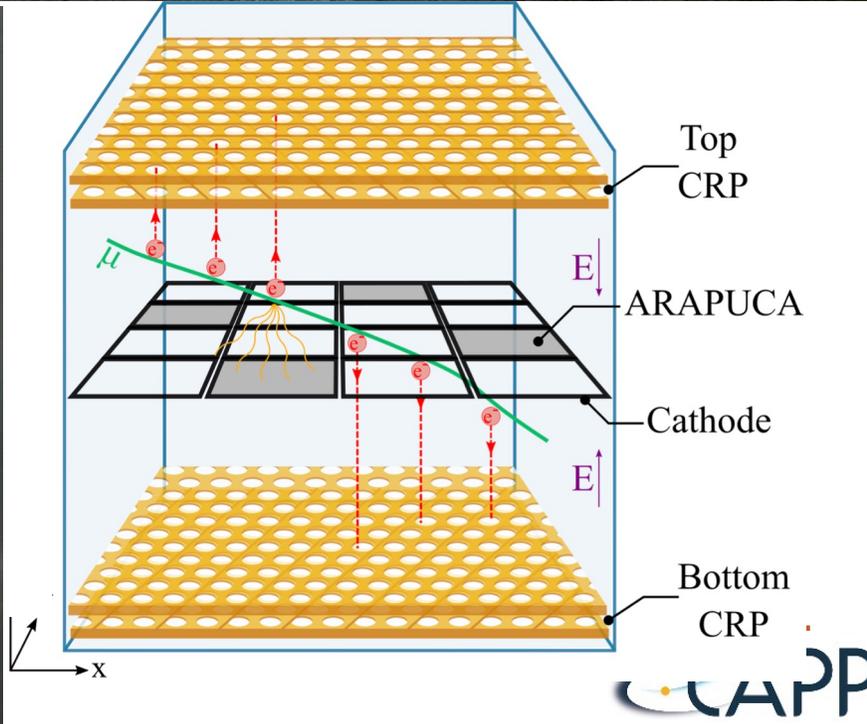
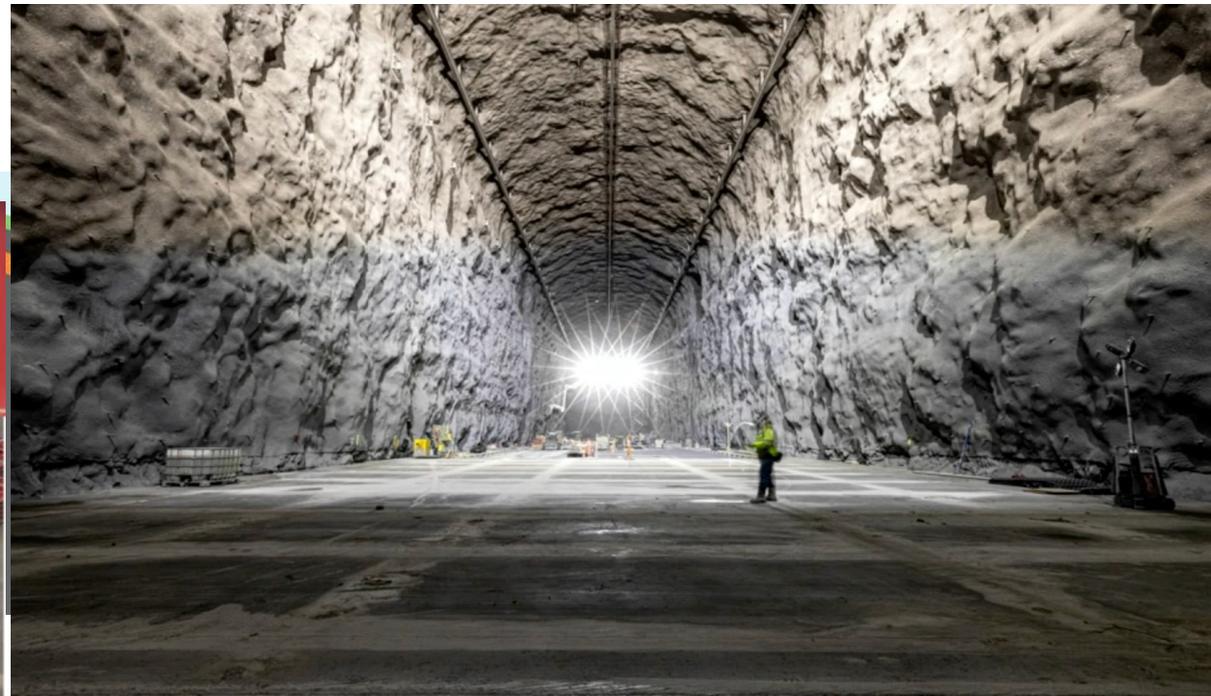


Transport to A Coruña harbour: April

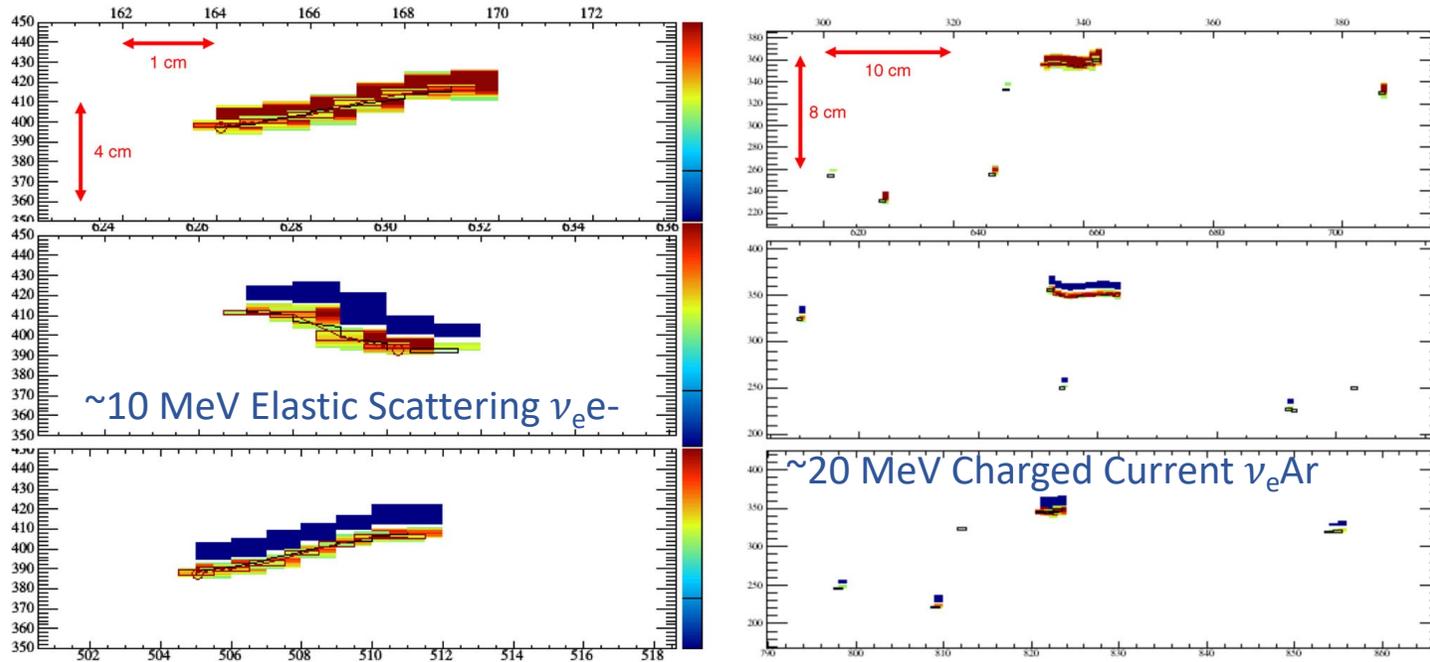


DUNE:ProtoDUNE-SP Run 5779 Event 12360





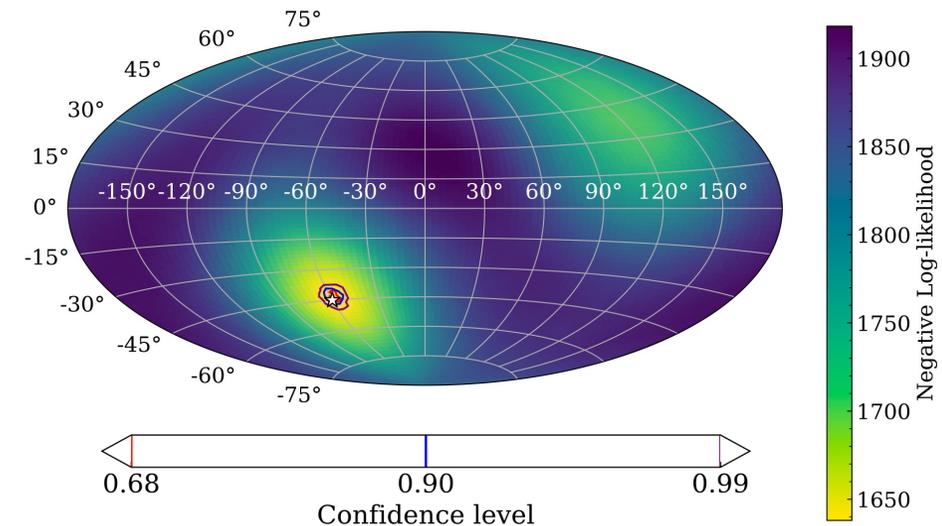
# Neutrinos de supernova dans DUNE



- Courant Chargé et Diffusion Élastique
  - Des milliers d'évts attendus pour une SN dans la galaxie ( $\sim 10$  kpc)
  - DUNE sensible flux  $\nu_e$  (pic neutronisation), complémentaire à HyperK, JUNO (plutôt anti- $\nu_e$ )
  - Diffusion Élastique  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$  permet pointage à  $\sim 5^\circ$  près
- alerte SN qq heures avant signal optique!

40 kton LAr, 10 kpc SN

Channel	Liver-more	GKVM	Garching
$\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$	2648	3295	882
$\bar{\nu}_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^+ + {}^{40}\text{Cl}^*$	224	155	23
$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$	341	206	142
<b>Total</b>	<b>3213</b>	<b>3656</b>	<b>1047</b>



Exemple de pointage de supernova dans DUNE

# Effets de matière

- $\nu$  se propagent à travers milieu dense (cœur étoile)
- propagation différente selon  $\nu_e$  ou  $\nu_{\mu,\tau}$  car différents canaux ouverts

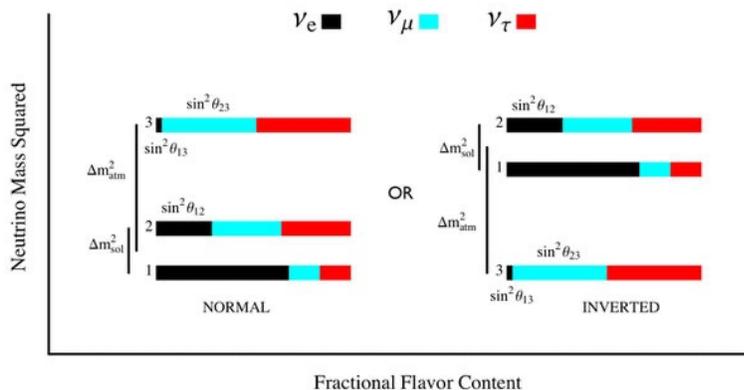
→ « Effets de matière »

- Signe d'une fréq oscillation  $\nu$  inconnu

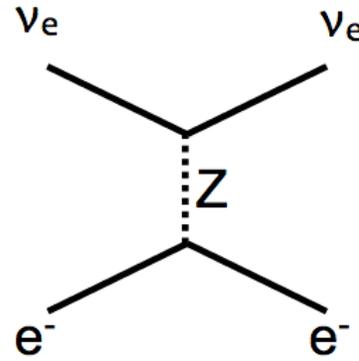
→ « ordre des masses »

- Comparer fréq oscillation aux effets de matière

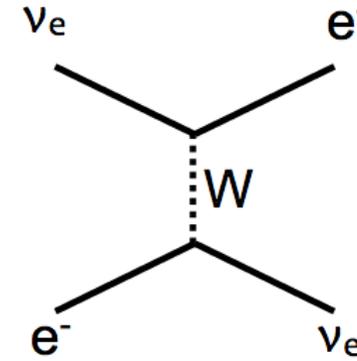
→ détermination ordre des masses



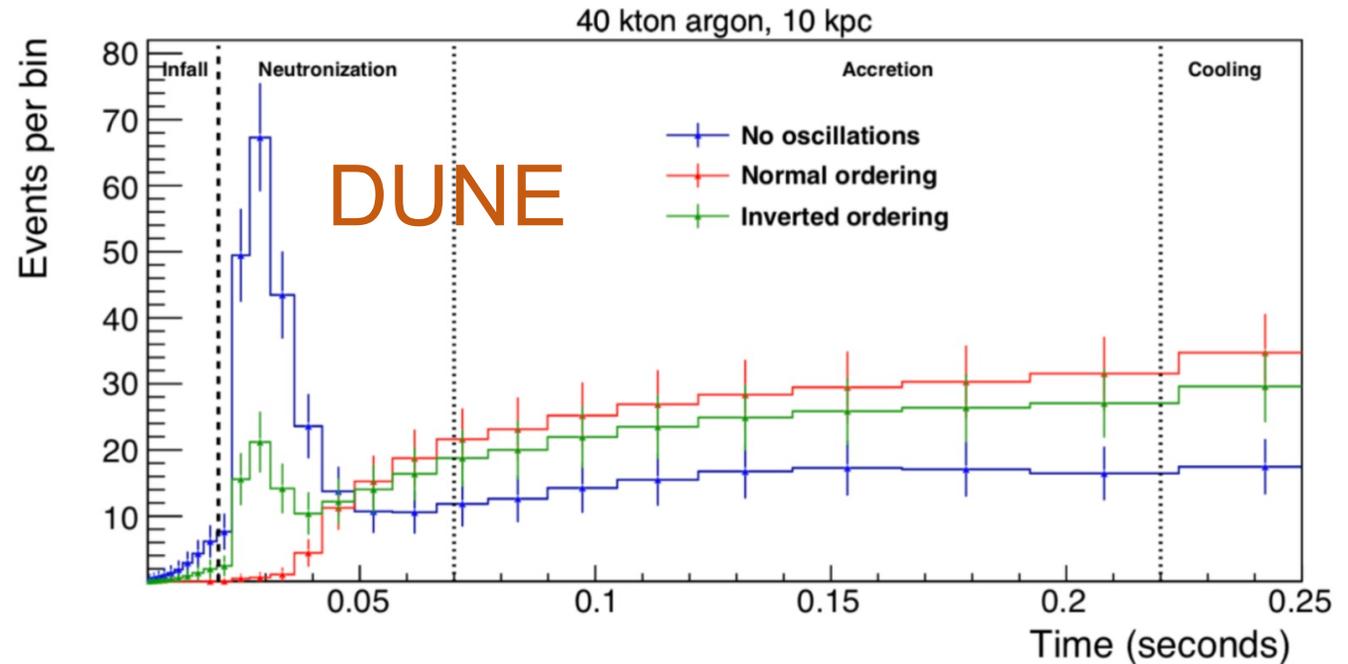
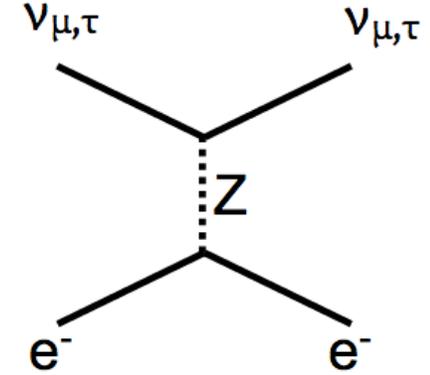
electron neutrinos



+

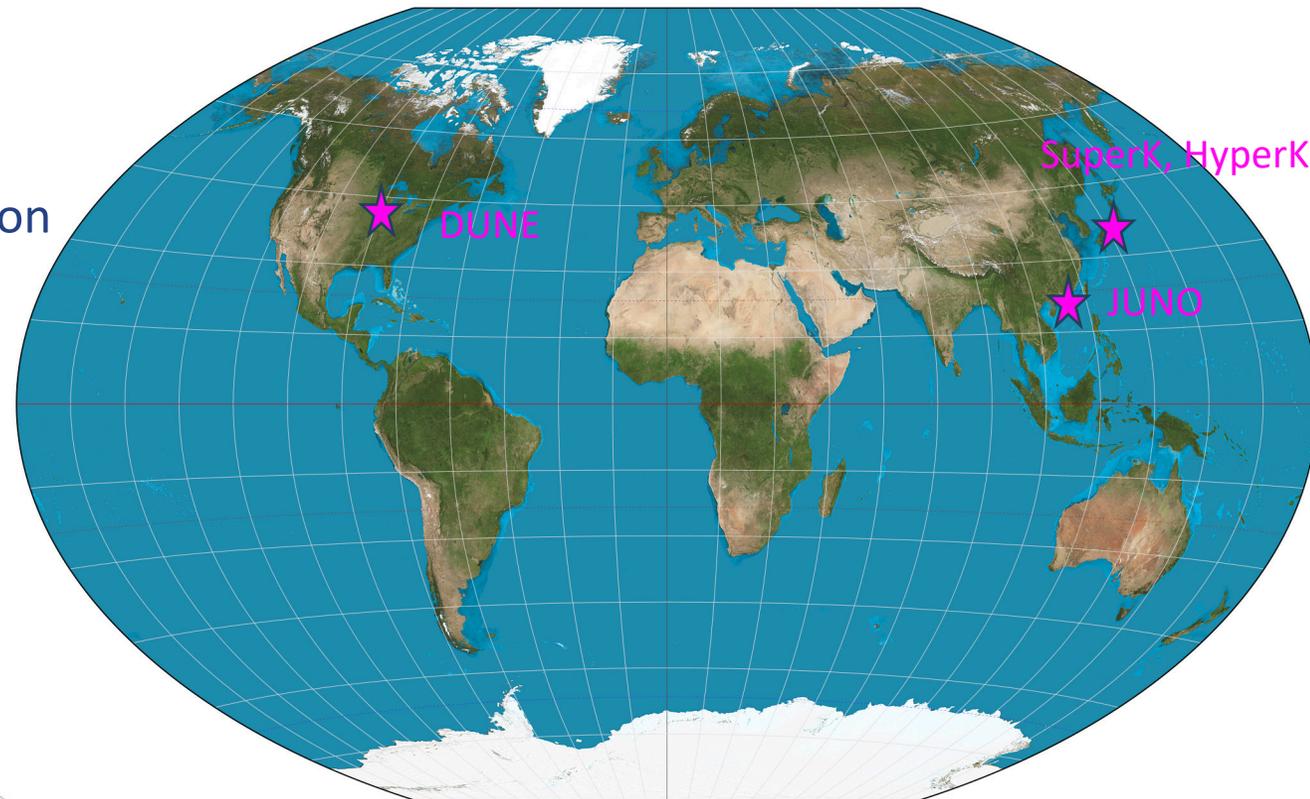


muon, tau neutrinos

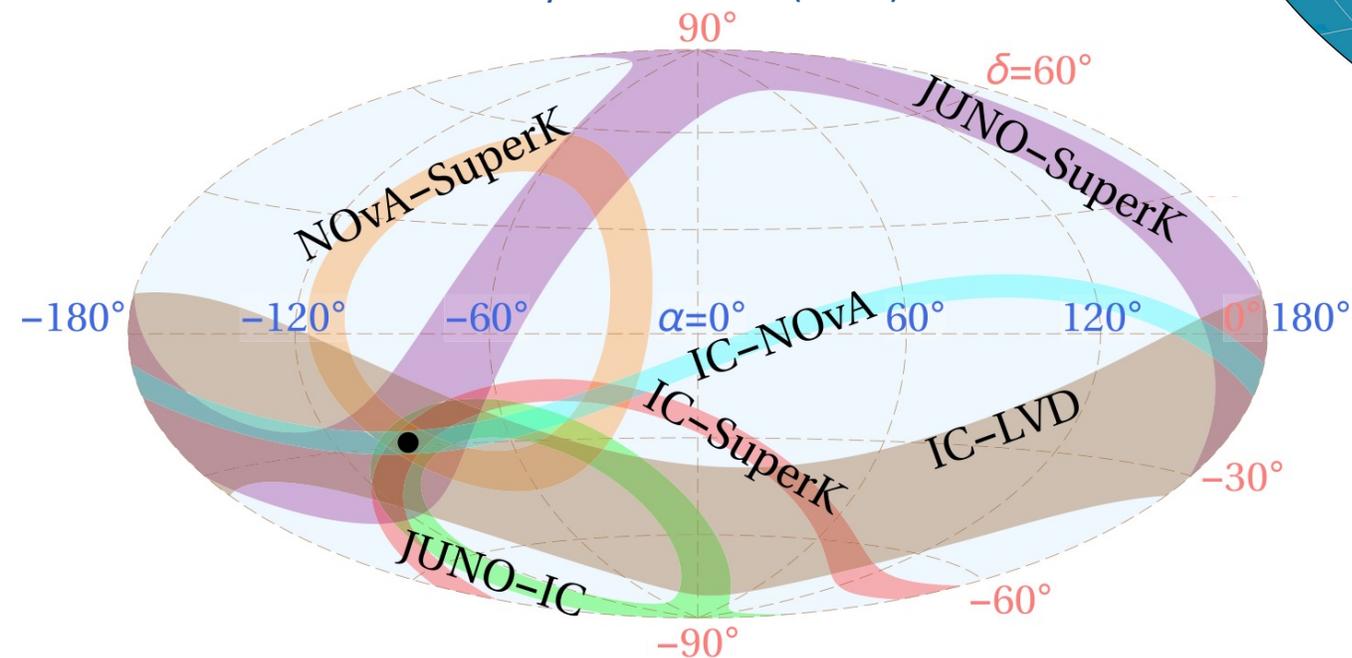


# Triangulation

- Plusieurs détecteurs massifs  $\nu$  et DM en opération  
→ triangulation!
- Intégré dans le système d'alerte SNEWS



New J.Phys. **23 031201** (2021)



# Phénomènes collectifs

- Densité  $\nu$  énorme lors du pic de neutronisation

$$n_\nu \sim \frac{N_\nu}{4\pi R_f^3/3} = \frac{E_\nu / \langle E_\nu \rangle}{4\pi R_f^3/3}$$

# Phénomènes collectifs

- Densité  $\nu$  énorme lors du pic de neutronisation

$$n_\nu \sim \frac{N_\nu}{4\pi R_f^3/3} = \frac{E_\nu / \langle E_\nu \rangle}{4\pi R_f^3/3} \sim 6 \times 10^{45} \frac{\nu}{m^3}$$

- Diffusion  $\nu$ - $\nu$  ?

$$\lambda \sim 1/G_F n_\nu$$

# Phénomènes collectifs

- Densité  $\nu$  énorme lors du pic de neutronisation

$$n_\nu \sim \frac{N_\nu}{4\pi R_f^3/3} = \frac{E_\nu / \langle E_\nu \rangle}{4\pi R_f^3/3} \sim 6 \times 10^{45} \frac{\nu}{m^3}$$

- Diffusion  $\nu$ - $\nu$  ?

$$\lambda \sim 1/G_F n_\nu$$

- Diffusion  $\nu$ - $\nu$ , effets de matière, oscillations... Cela devient très compliqué !!!  $\rightarrow$  d'où l'intérêt d'une mesure expérimentale du spectre neutrino des supernovae...

