



PHYSICS PROJECT DAYS



UN VOYAGE DANS L'INCONNU : À LA RECHERCHE DE
SOURCES DE NEUTRINOS AVEC ICECUBE

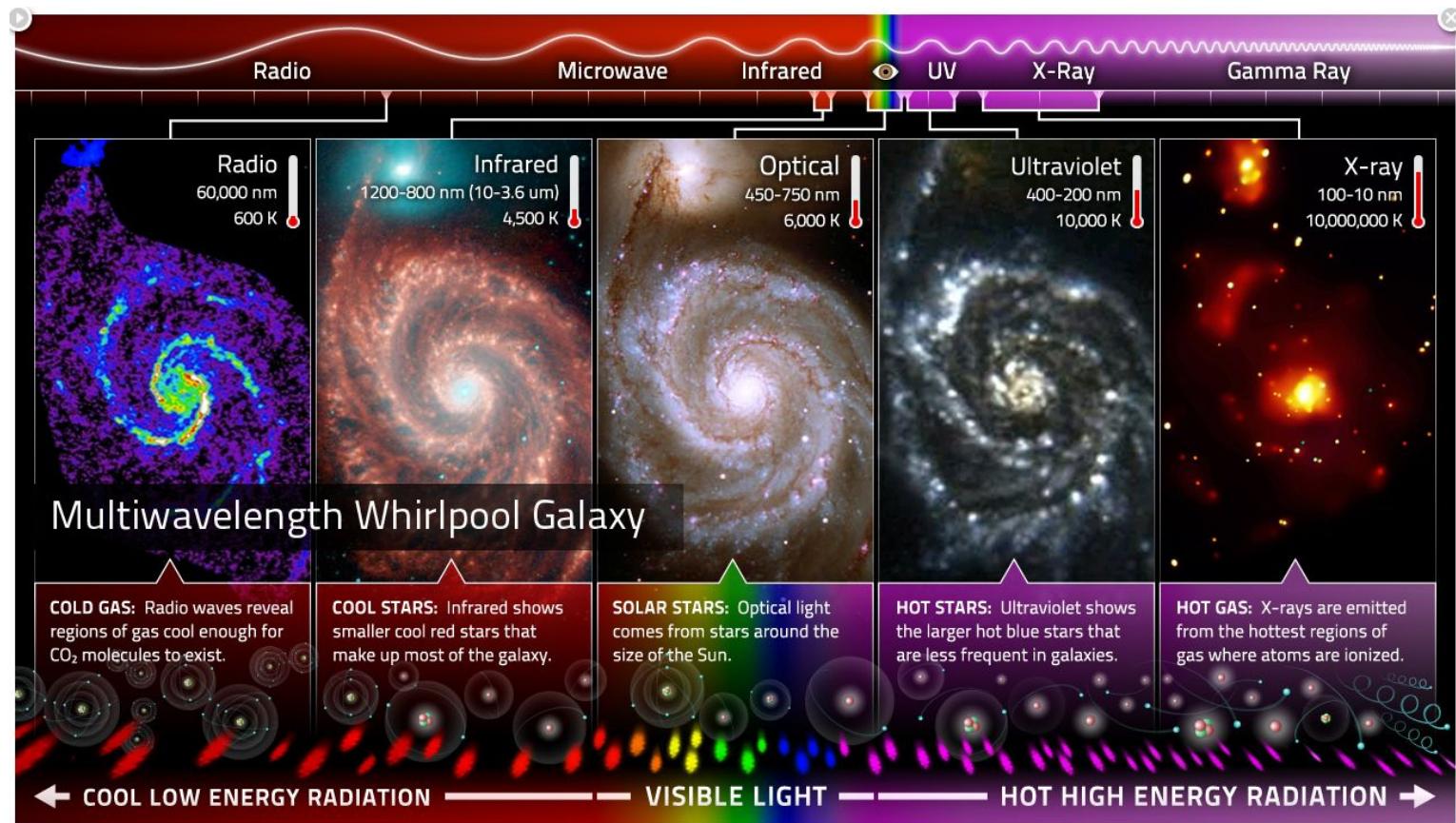
PROGRAMME

Jeudi		Vendredi		Samedi	
Matin	Après-midi	Matin	Après-midi	Matin	Après-midi
Intro neutrinos			Analyse des données		
Visualisation		Prise en main	Finalisation	Préparation poster	Présentation
Intro analyse					

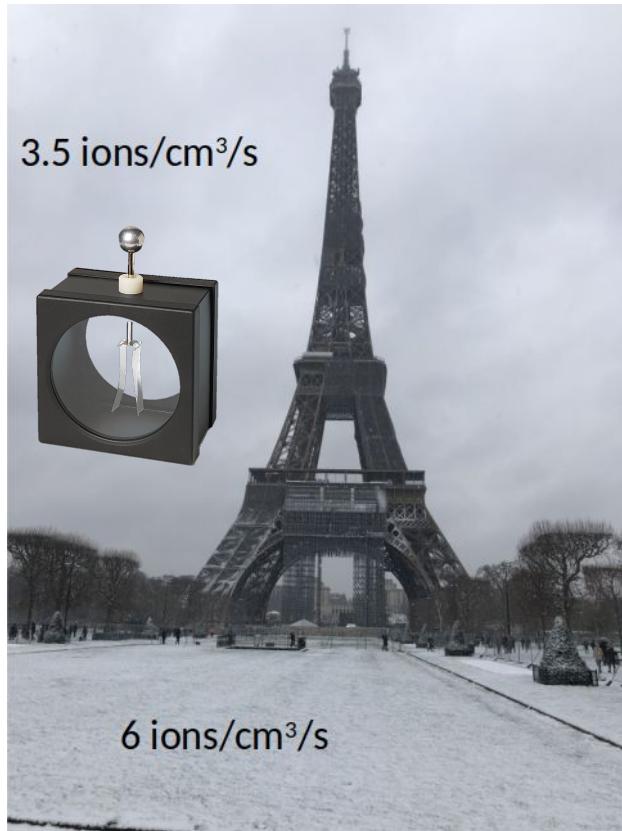
OBSERVATION DU CIEL



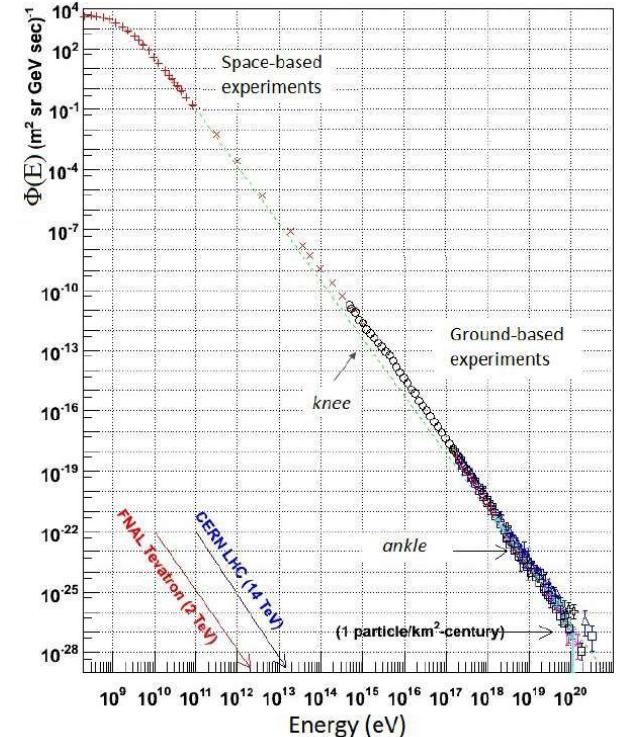
DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE



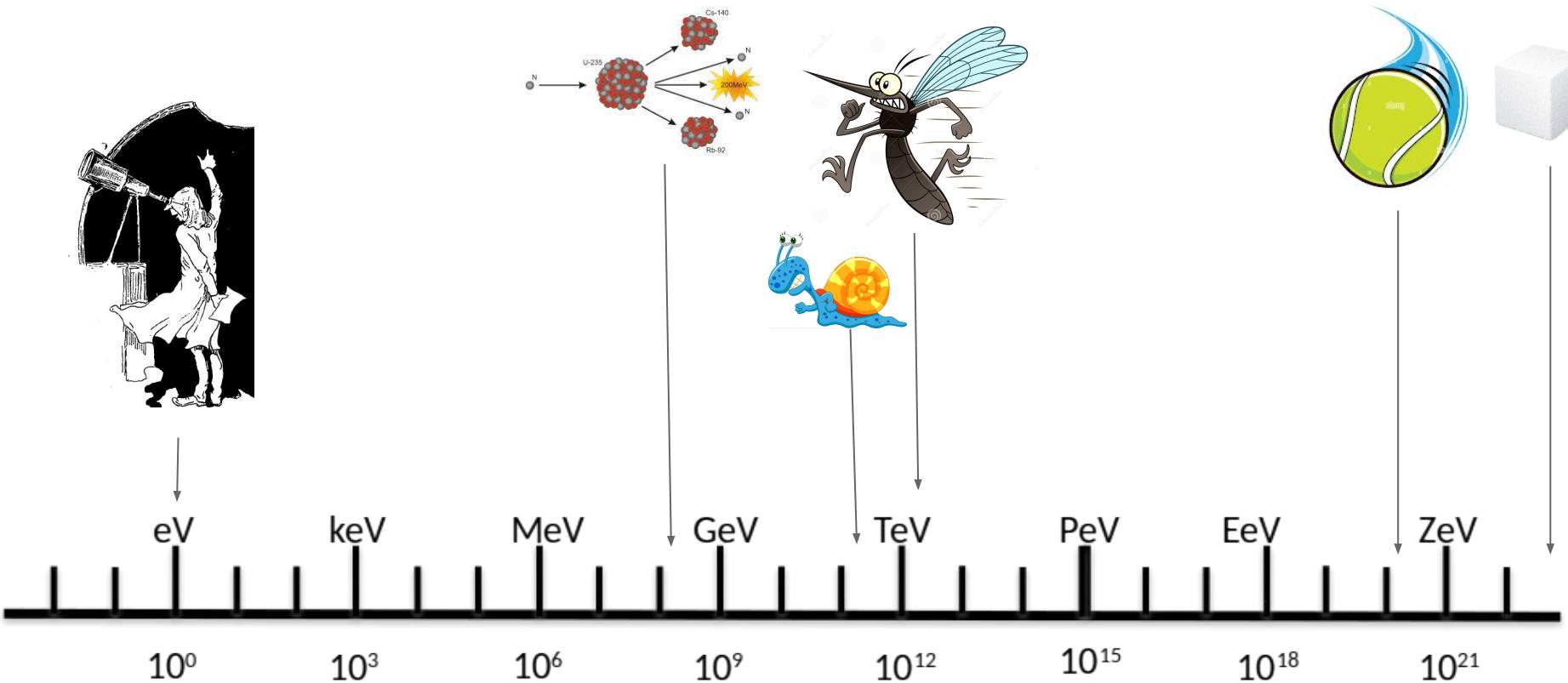
UNE NOUVELLE VOIE: LES RAYONS COSMIQUES



protons et noyaux sans
électrons (ions)

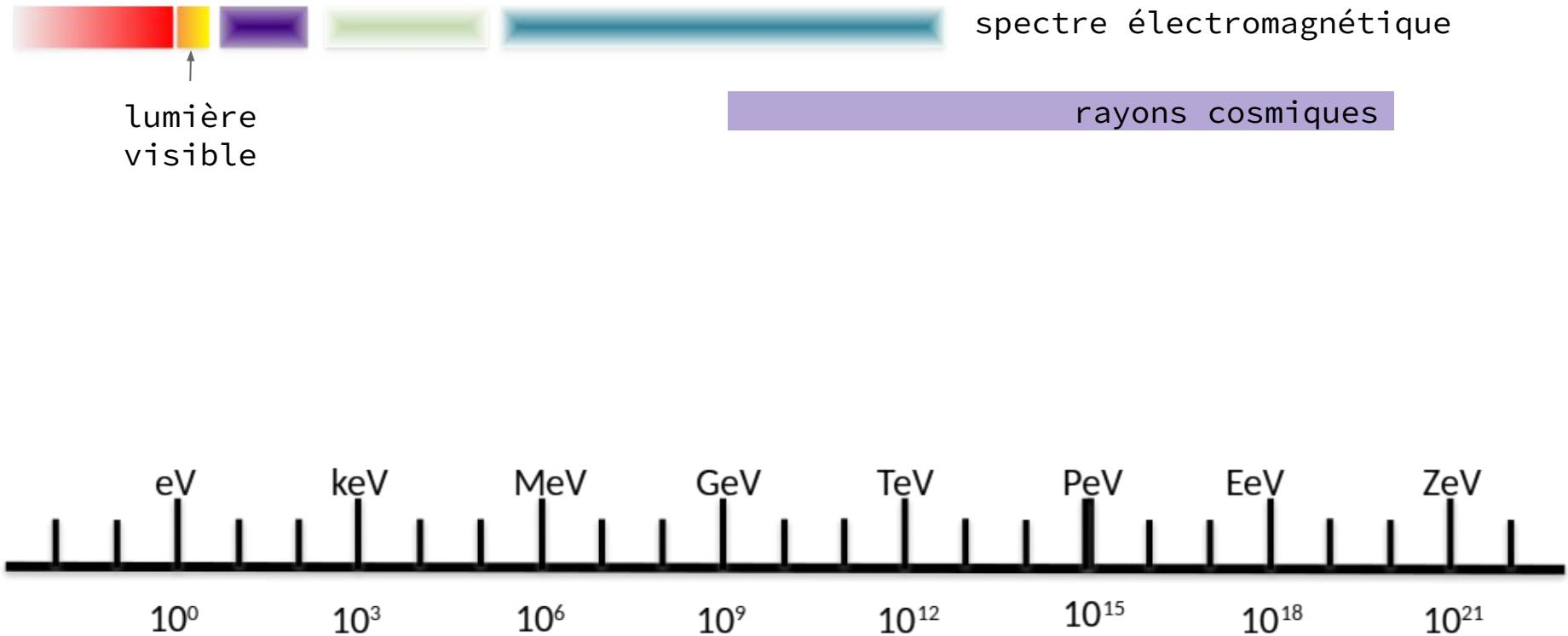


INTERLUDE : ORDRES DE GRANDEUR D'ÉNERGIE

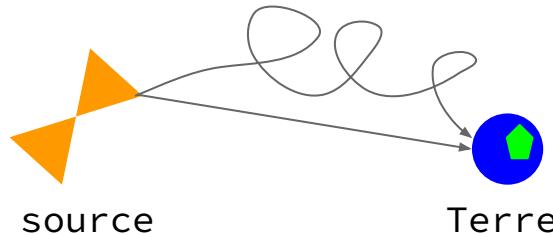


1 eV = énergie acquise par un électron soumis à un potentiel de 1 V

INTERLUDE : ORDRES DE GRANDEUR D'ÉNERGIE

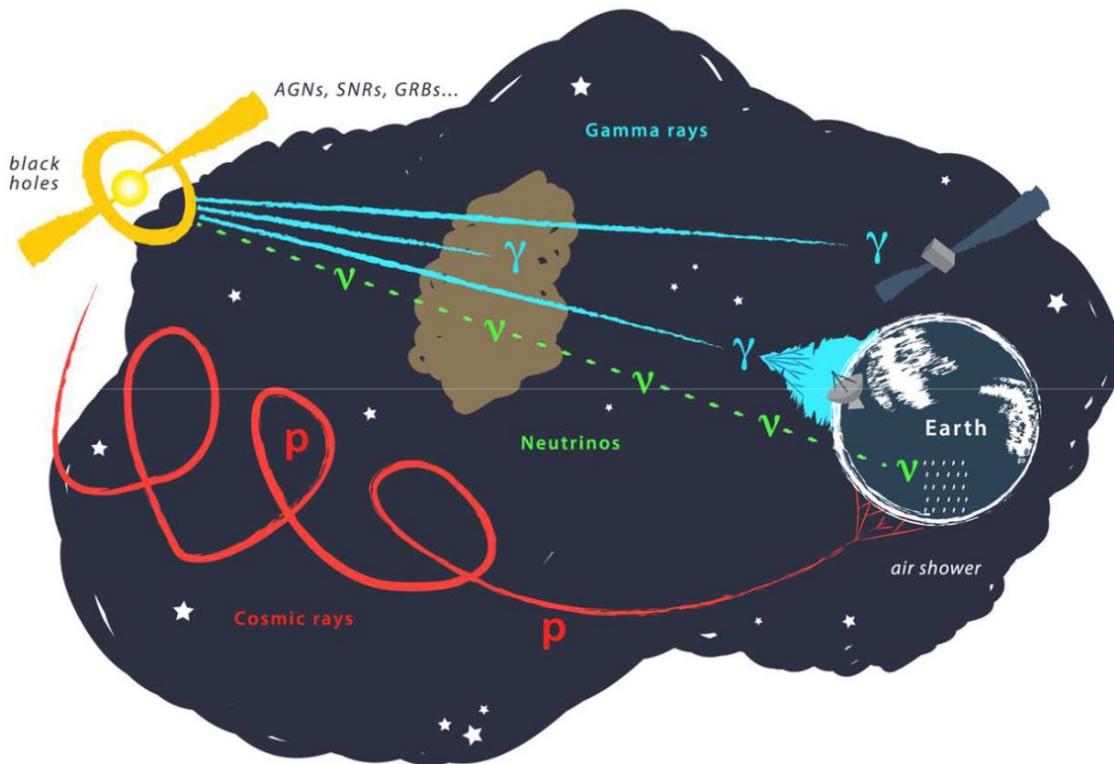


ÉTUDE DE SOURCES ASTROPHYSIQUES



	Rayonnement électromagnétique	Rayons cosmiques	Un messager parfait ?
Propriétés	Pas de charge électrique	Chargés donc influencés par les champs magnétiques	Pas de charge électrique
Interaction	Absorbé par les nuages moléculaires, ...	Interagissent dans l'atmosphère terrestre	Pas intercepté par la matière interstellaire
Information	Signature de divers phénomènes	Signe de l'accélération de particules	Informations complémentaires

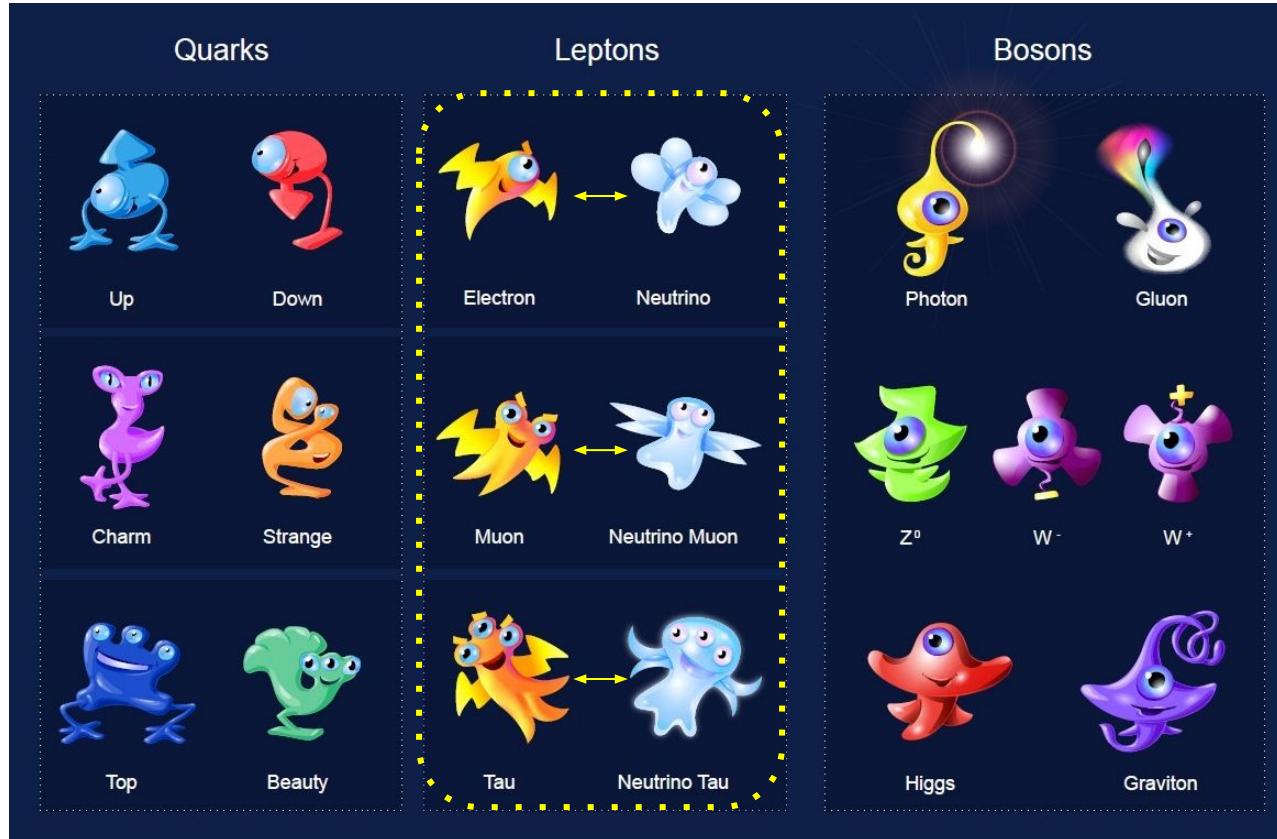
UN MESSAGER PARFAIT, LES NEUTRINOS ?



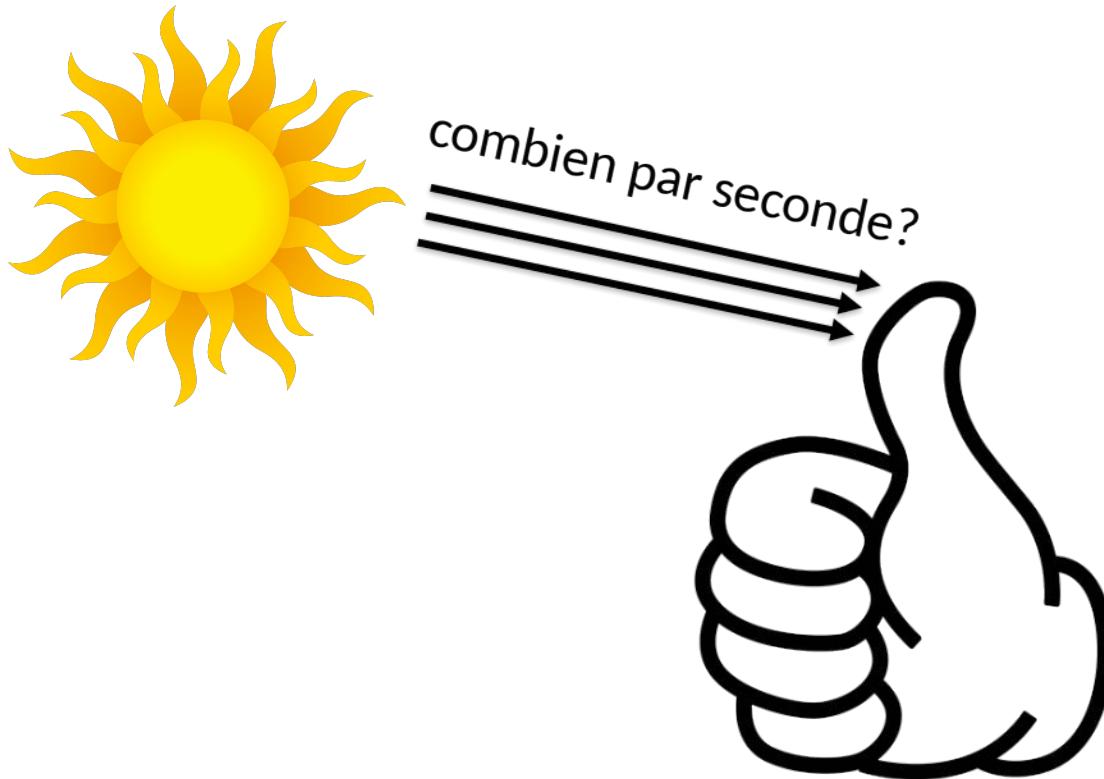
Propriétés des neutrinos :

- ❖ Charge neutre
- ❖ Masse très petite
- ❖ Trois saveurs...
- ❖ ... chacunes associées à une particule chargée de même saveur (e, μ, τ)
- ❖ Interagissent très faible avec la matière
- ❖ Produits en grande quantité dans des phénomènes naturels

INTERLUDE : LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

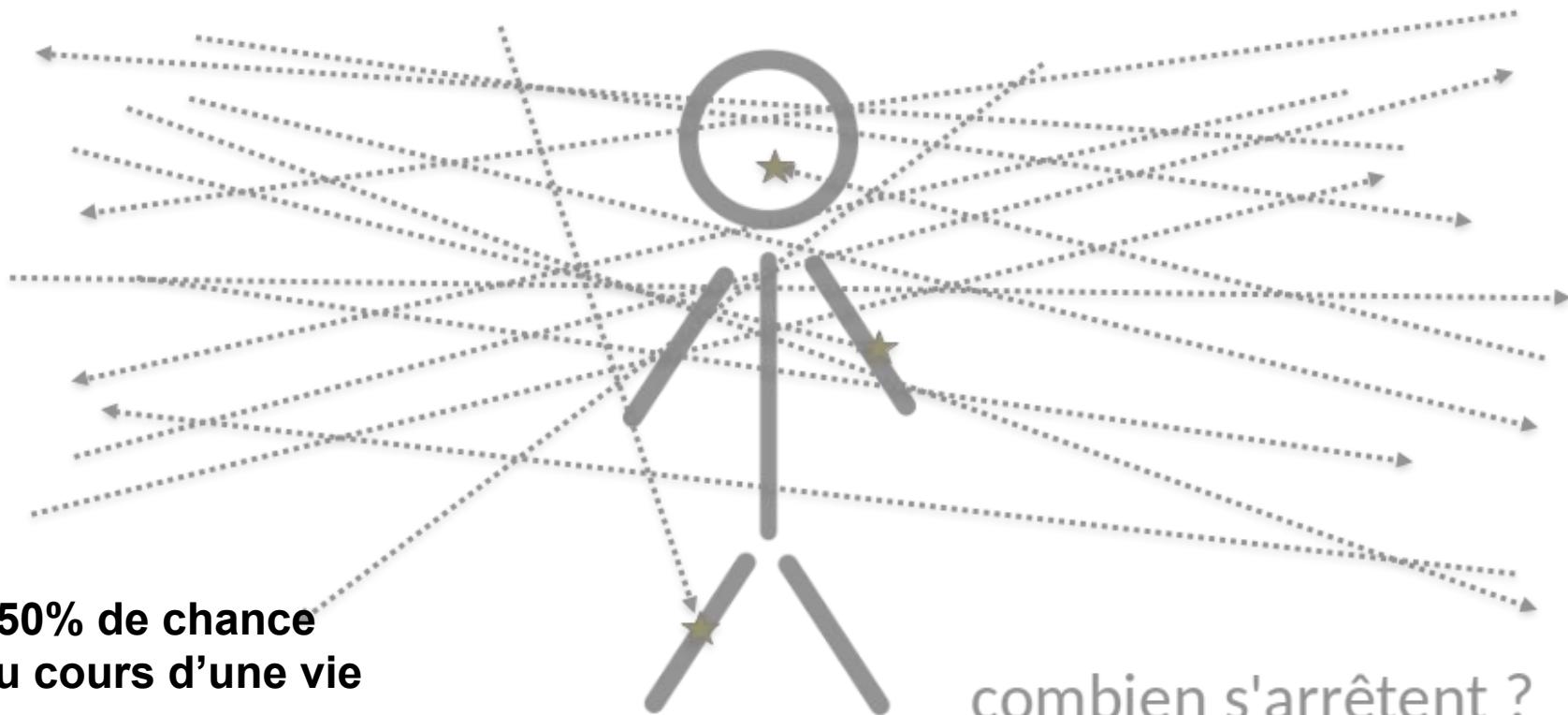


SOURCE EXTRA-TERRESTRE LA PLUS PROCHE : LE SOLEIL

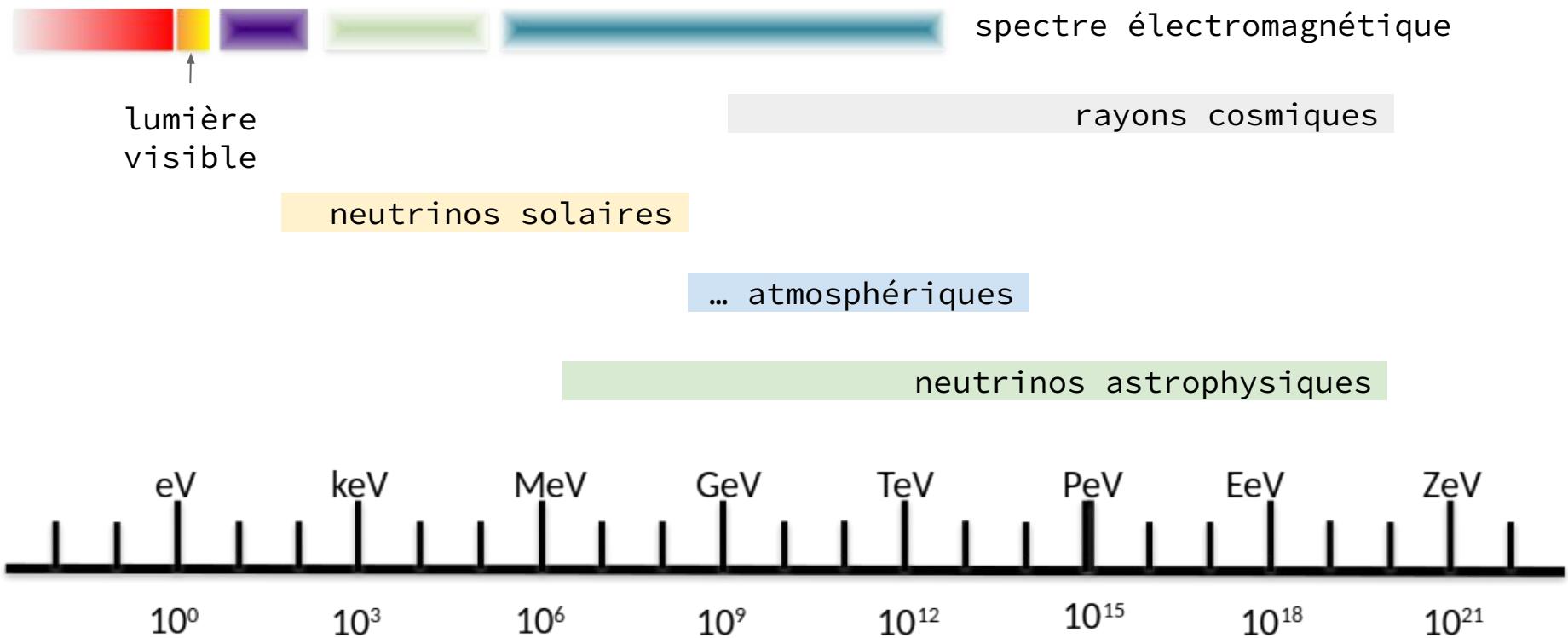


$10^{11} =$
100 000 000 000
par seconde

LA TIMIDITÉ DES NEUTRINOS



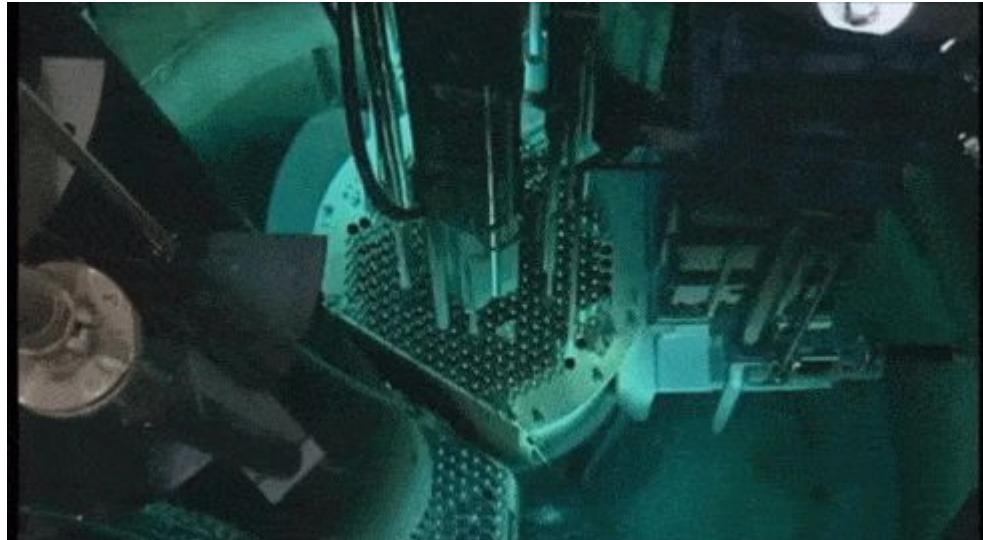
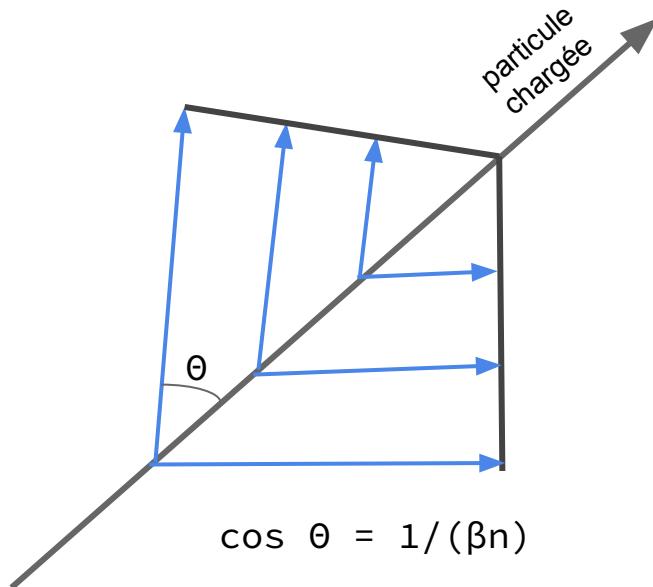
ORIGINE DES NEUTRINOS



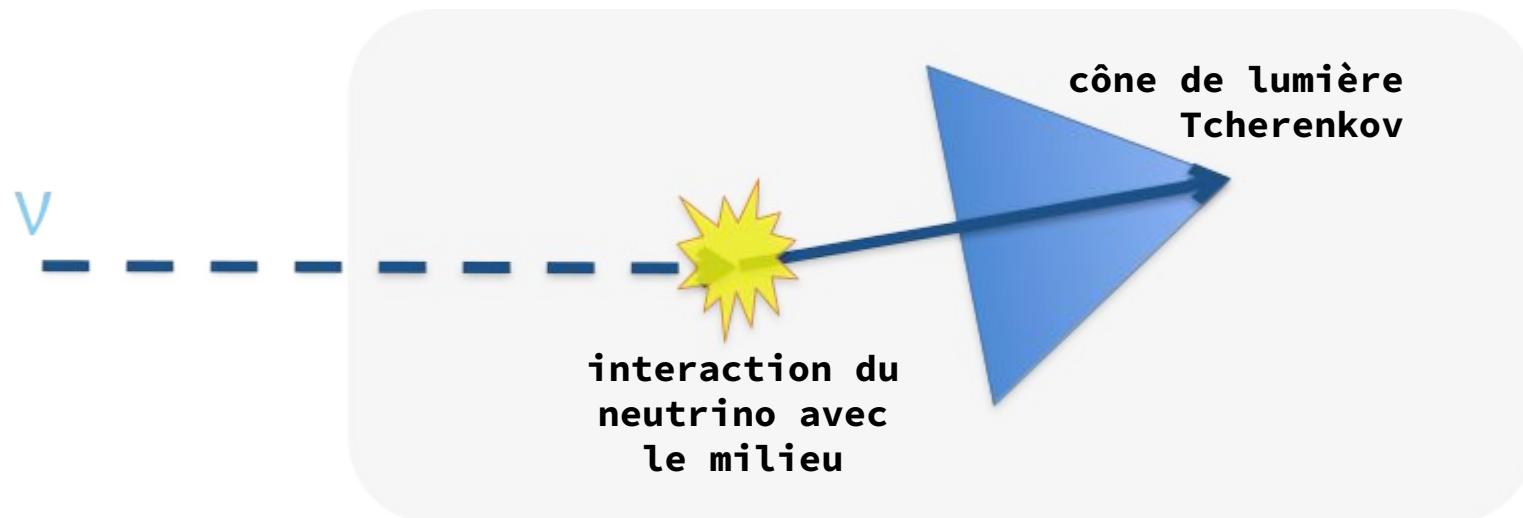
COMMENT LES DÉTECTER ?

INTERLUDE : EFFET TCHERENKOV

Flash de lumière bleue produit lorsqu'une particule chargée se propage plus vite que la lumière dans un milieu.

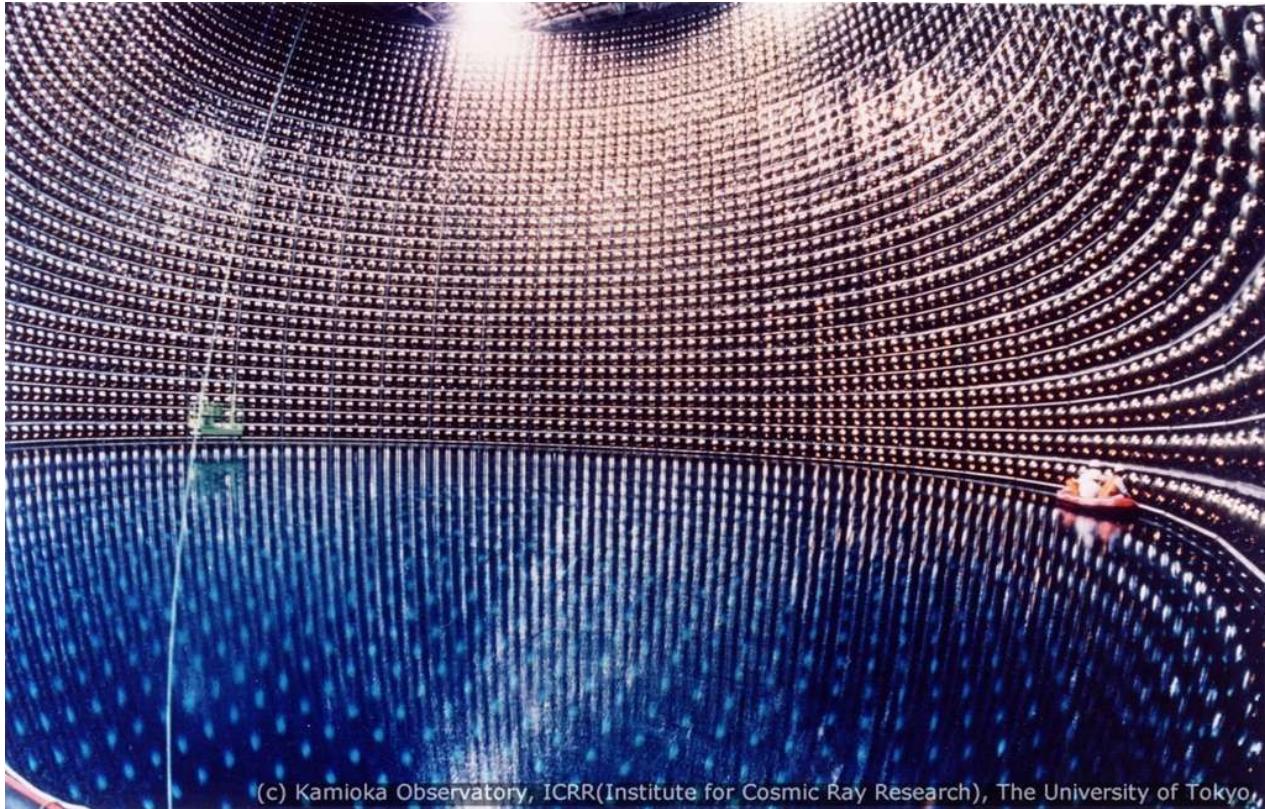


MÉTHODE DE DÉTECTION DES NEUTRINOS



DÉTECTEUR SUPER-KAMIOKANDE

- ❖ Piscine de **50000 tonnes** d'eau
- ❖ Au fond d'une mine au Japon
- ❖ Equipé de détecteurs sur tous les côtés



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo,

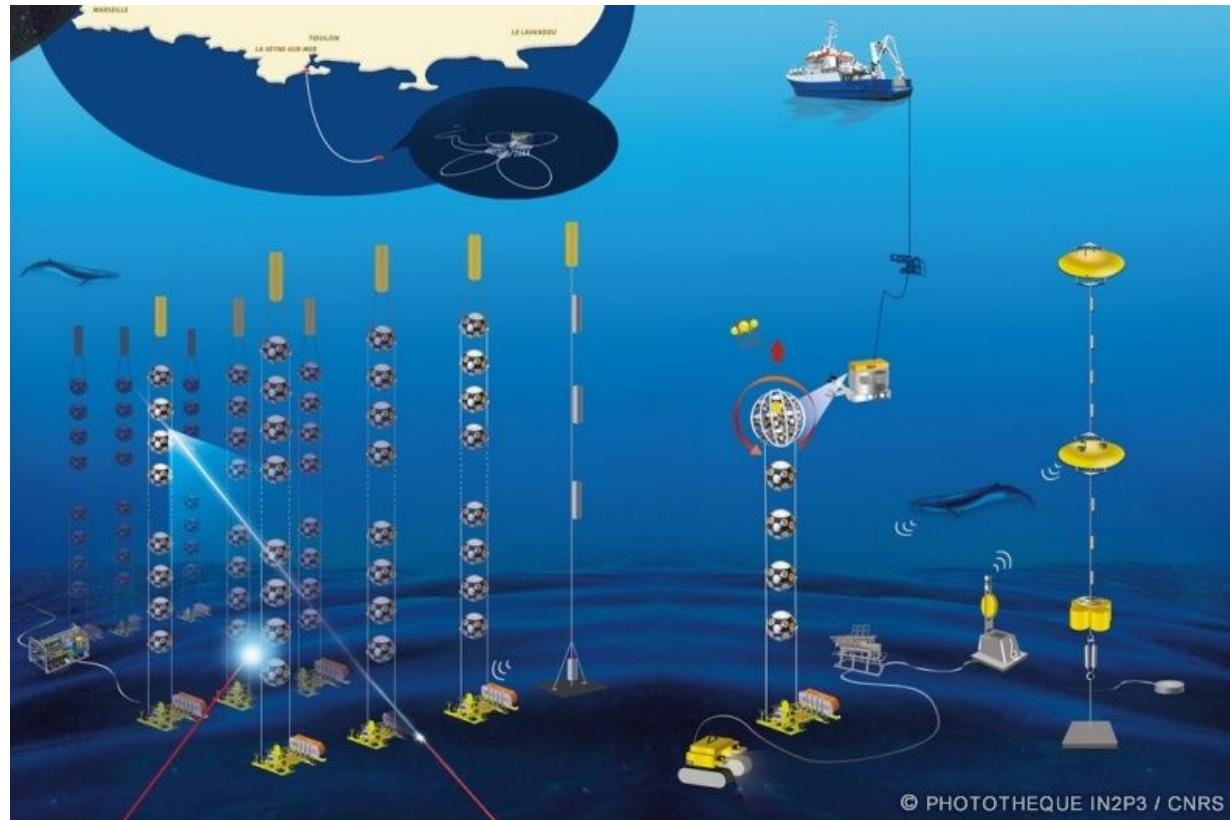
DÉTECTEUR ANTARES

- ❖ Dans les profondeurs de la mer Méditerranée
- ❖ 12 lignes verticales
- ❖ 75 photomultiplicateurs par ligne
- ❖ Couvre une masse d'eau de **12 millions de tonne**



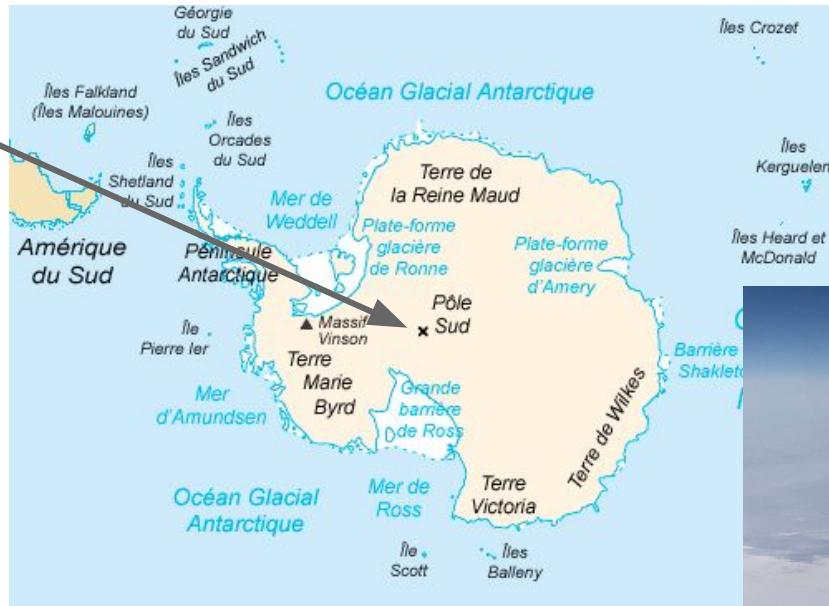
DÉTECTEUR KM³NET

- ❖ Dans les profondeurs de la mer Méditerranée
- ❖ >300 lignes
- ❖ Couvre un volume d'eau de **plus de 1 km³ = plus de 1 gigatonne**
- ❖ En cours de déploiement !

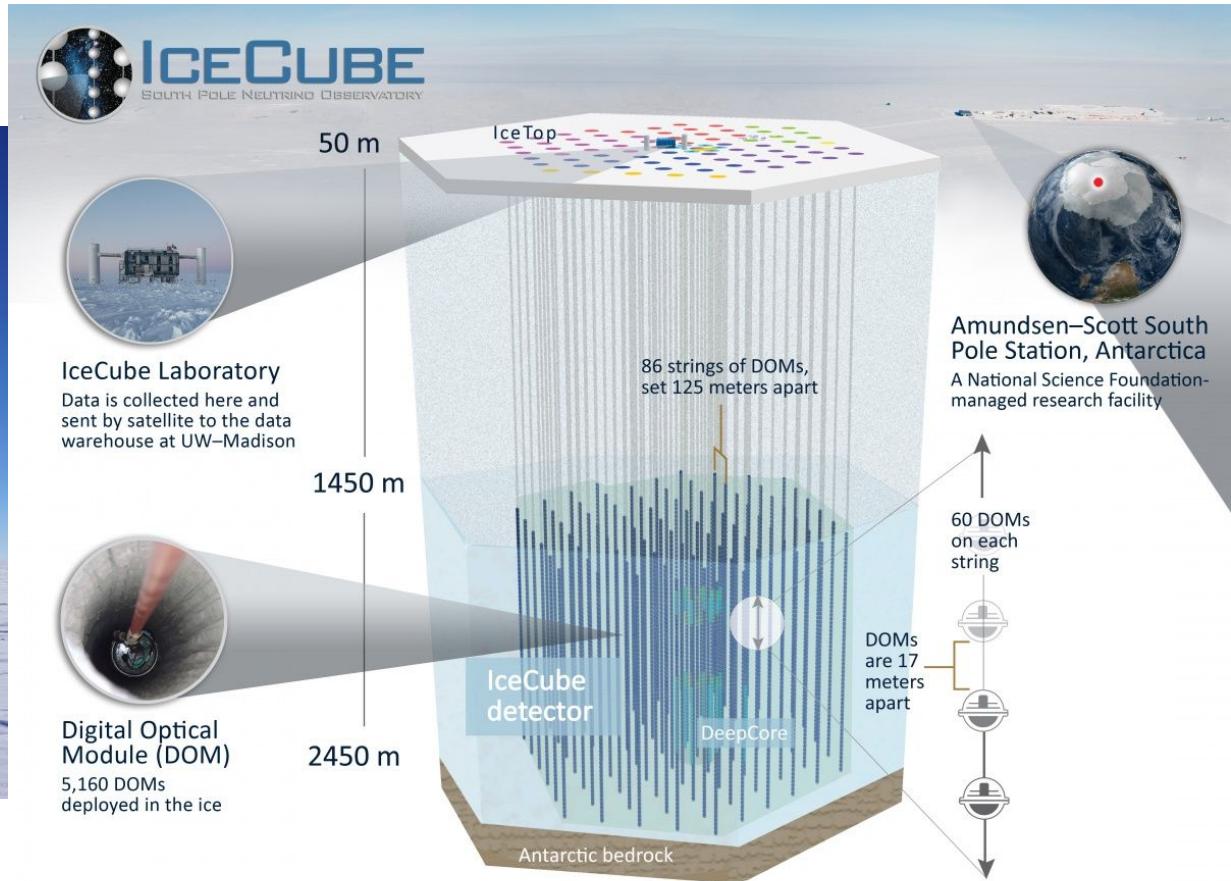
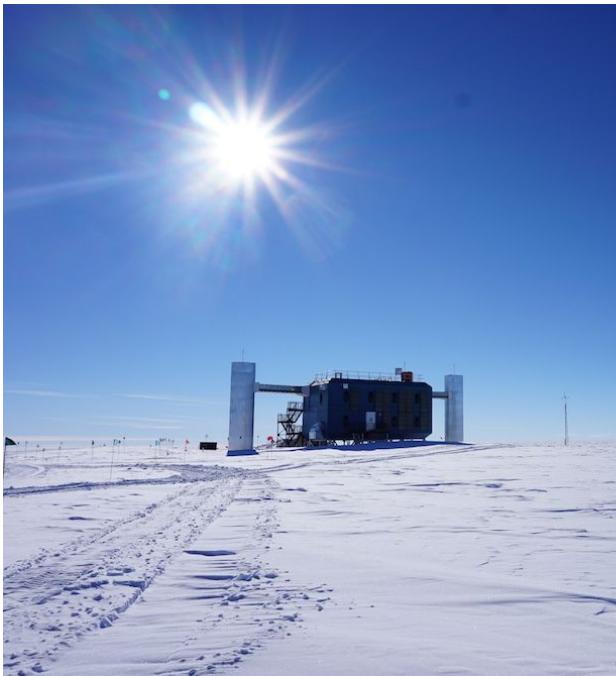


DÉTECTEUR ICECUBE

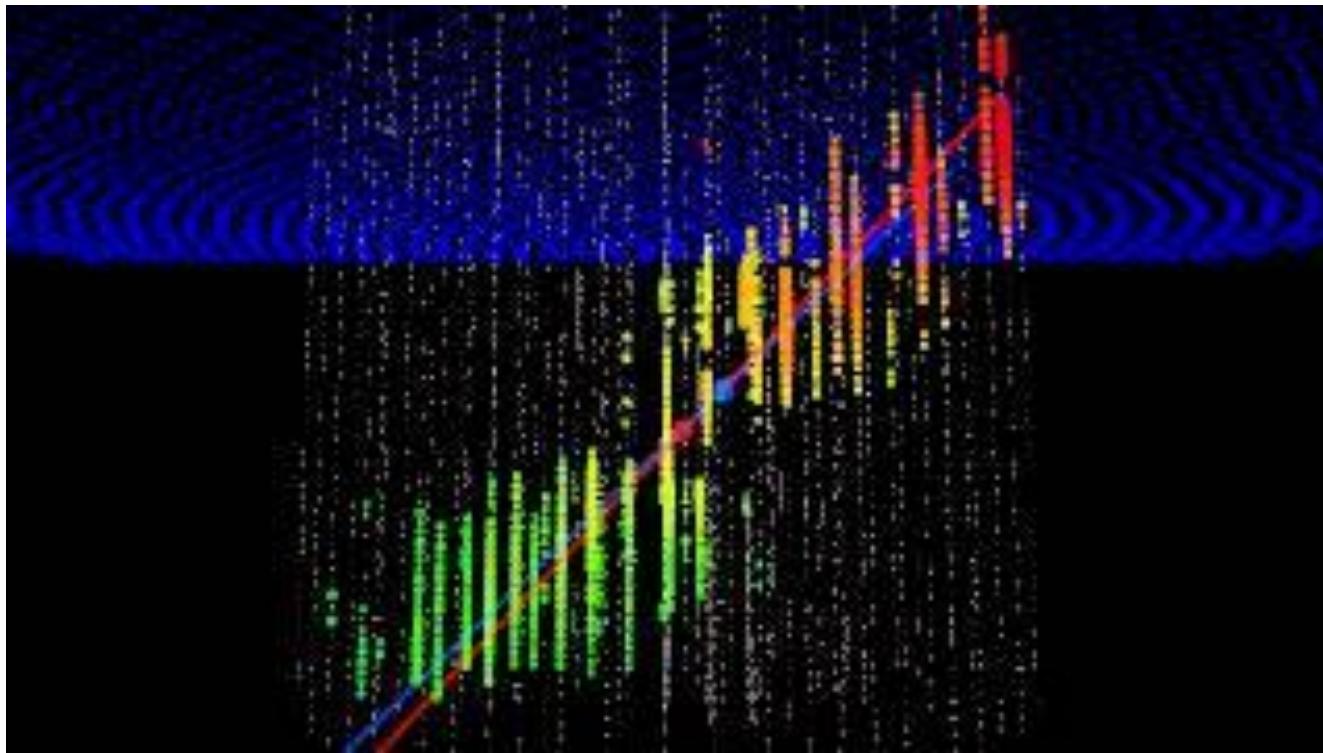
construisons
un détecteur
au Pôle Sud !



DÉTECTEUR ICECUBE

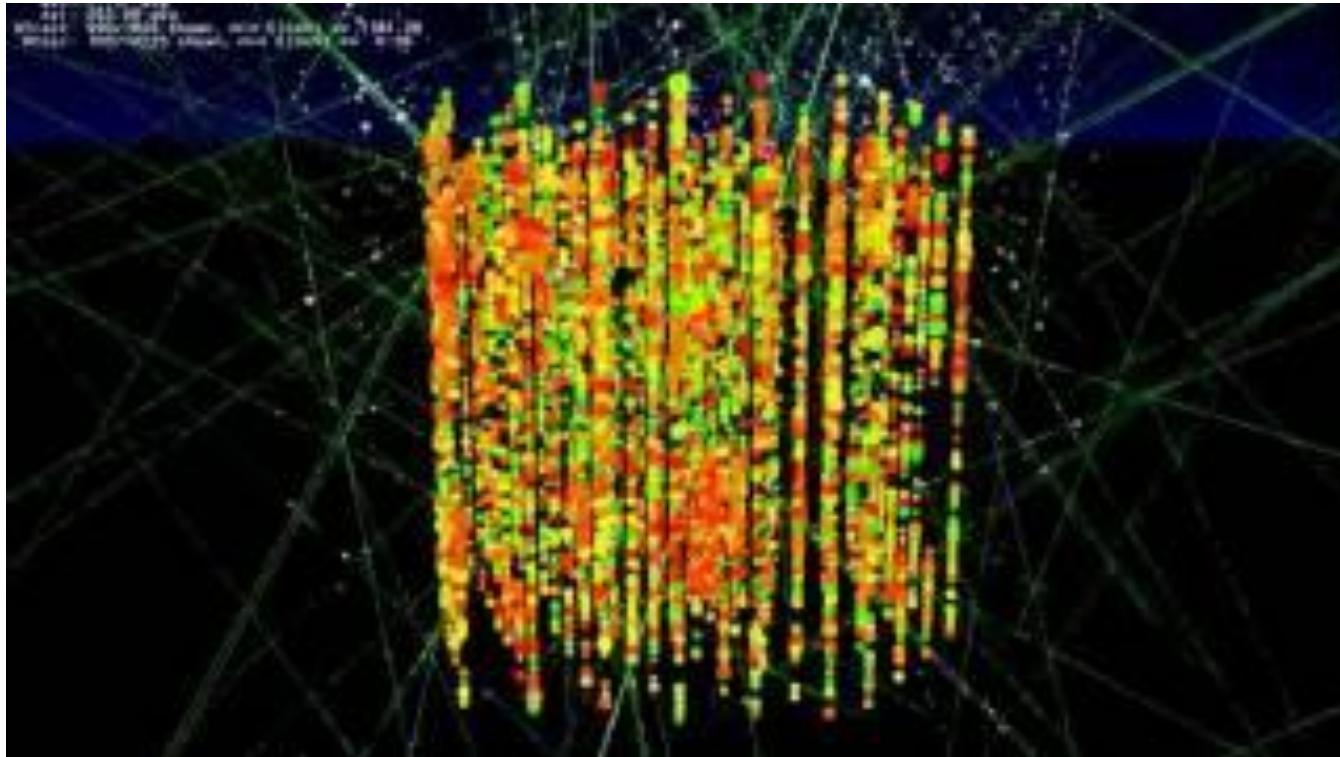


À QUOI RESSEMBLE UNE INTERACTION DE NEUTRINO?



plus de
lumière =
plus haute
énergie

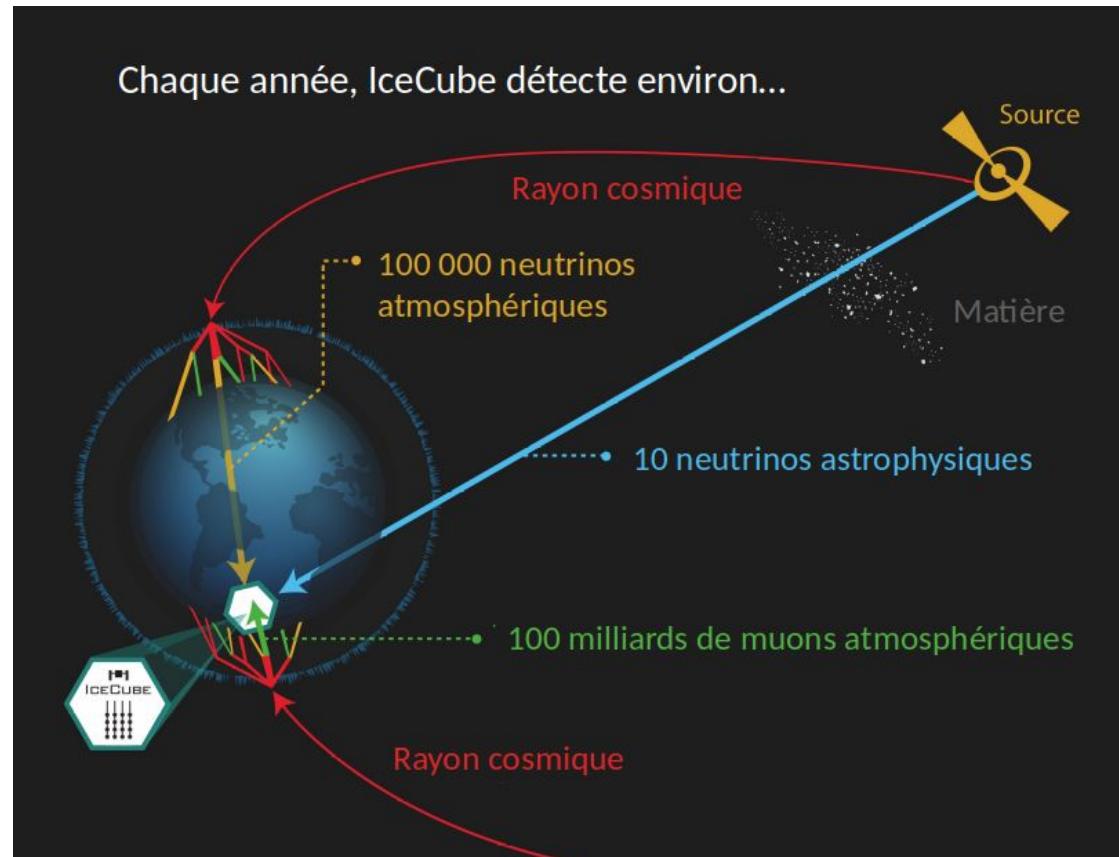
À QUOI RESSEMBLENT LES DONNÉES DU DÉTECTEUR



0.01 s
de données

TAUX DE DÉTECTION

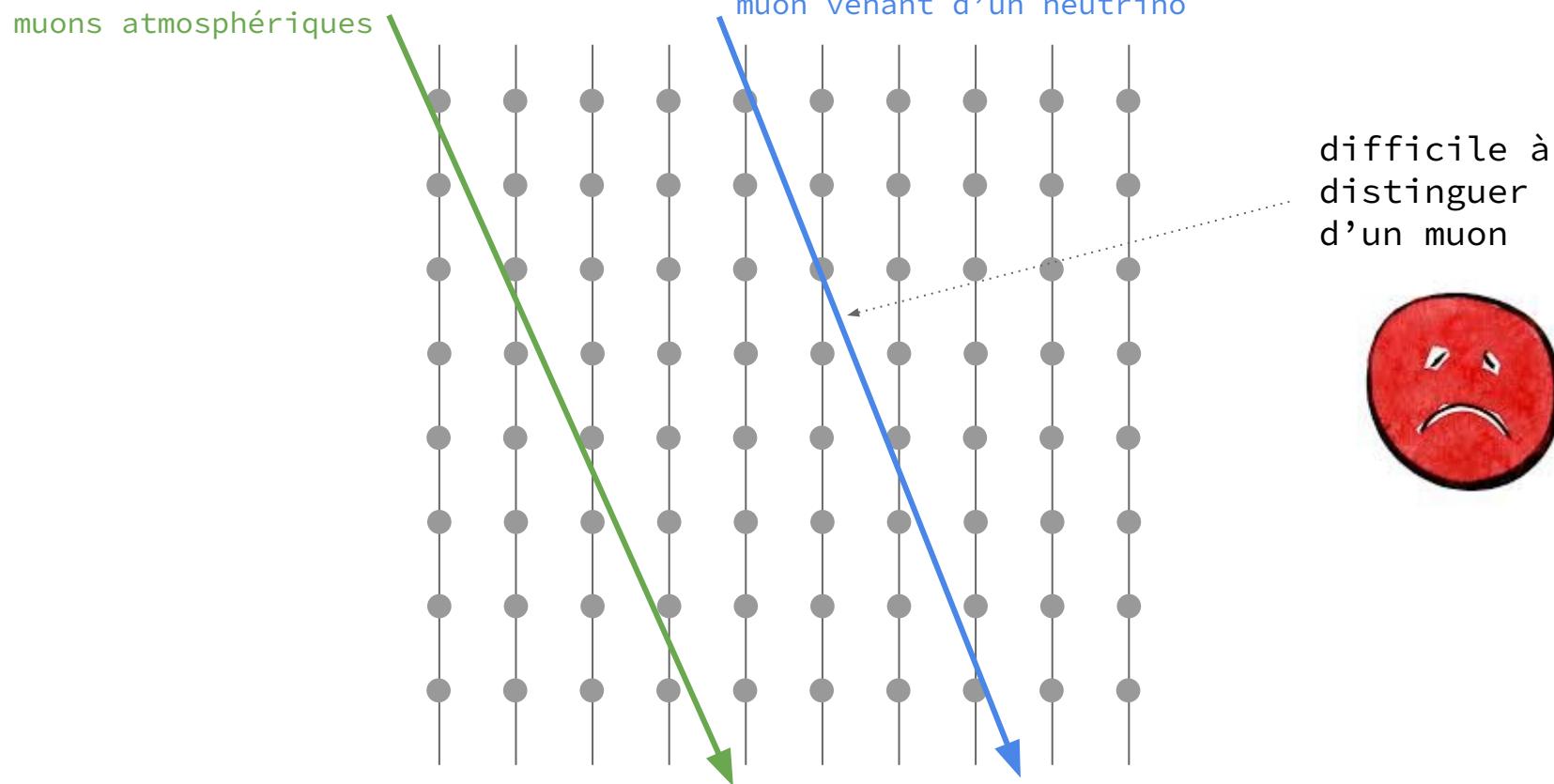
- ❖ Muons produits dans l'atmosphère
 - ❖ Neutrinos produits dans l'atmosphère
 - ❖ Neutrinos d'origine astrophysique



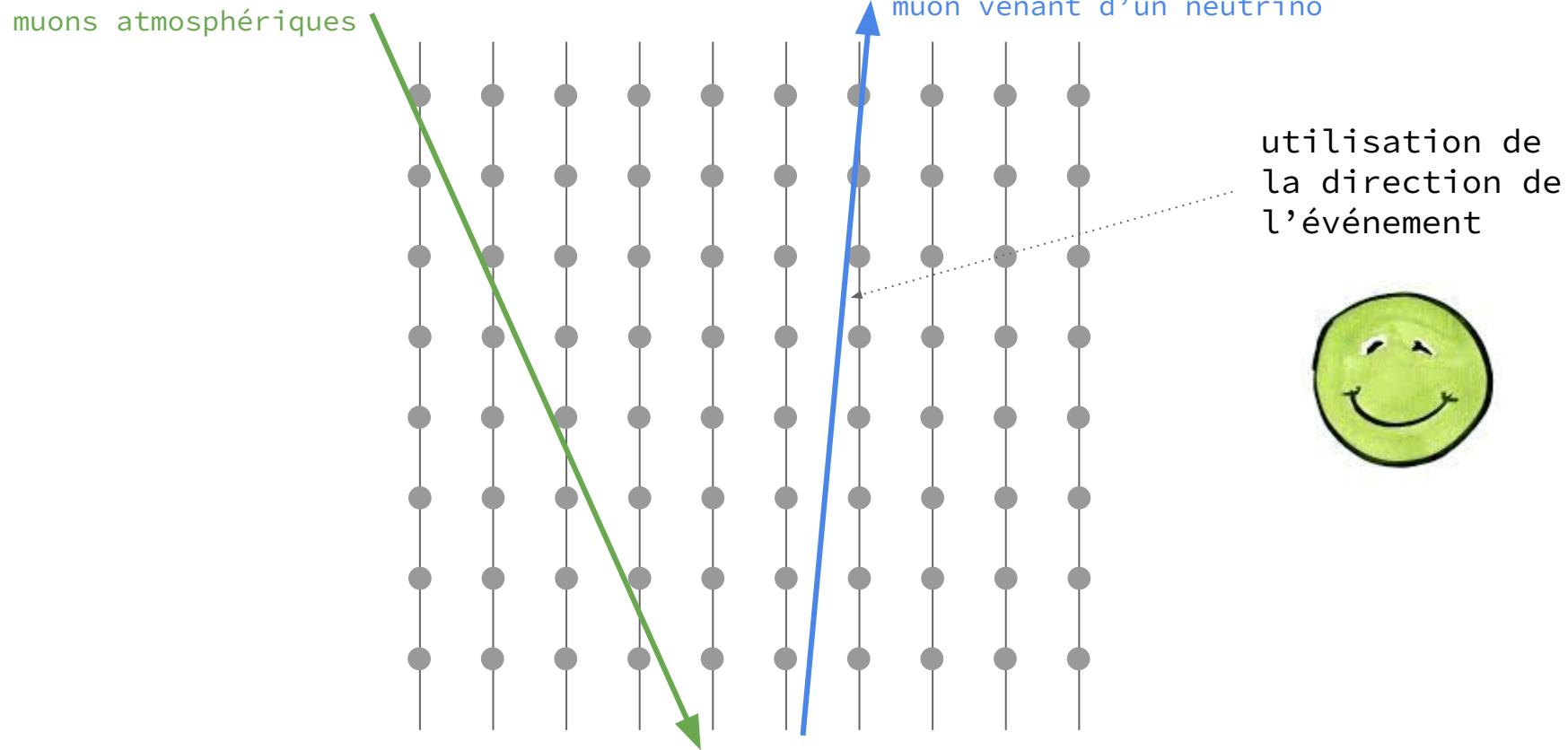
COMMENT SÉLECTIONNER LES NEUTRINOS ASTROPHYSIQUES ?

Neutrinos astrophysiques	Neutrinos atmosphériques	Muons atmosphériques	Bruit optique et électronique
“Signal”	Pas intéressant pour nous = “bruit de fond” (“background”)		
Beaucoup de lumière déposée (sauf pour les neutrinos de basse énergie)			Peu de lumière
Peut provenir de toutes les directions	Peut provenir de toutes les directions	Principalement traces descendantes	-
Lumière localisée dans le détecteur (ligne/sphère)	Lumière localisée dans le détecteur (ligne/sphère)	Lumière localisée dans le détecteur (ligne) avec point d’entrée	Détections à travers tout le détecteur

COMMENT SÉLECTIONNER LES NEUTRINOS ASTROPHYSIQUES ?

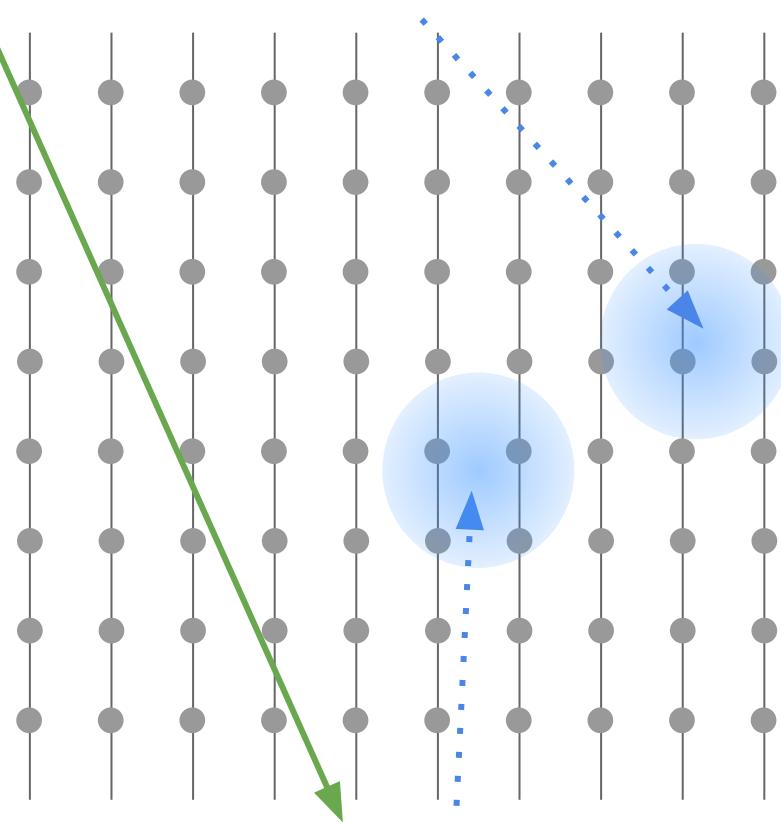


COMMENT SÉLECTIONNER LES NEUTRINOS ASTROPHYSIQUES ?



COMMENT SÉLECTIONNER LES NEUTRINOS ASTROPHYSIQUES ?

muons atmosphériques



interaction de neutrino bien localisé dans le détecteur

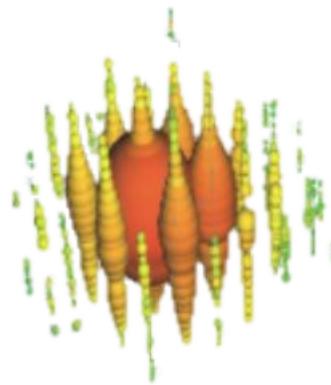


RÉCAPITULATIF

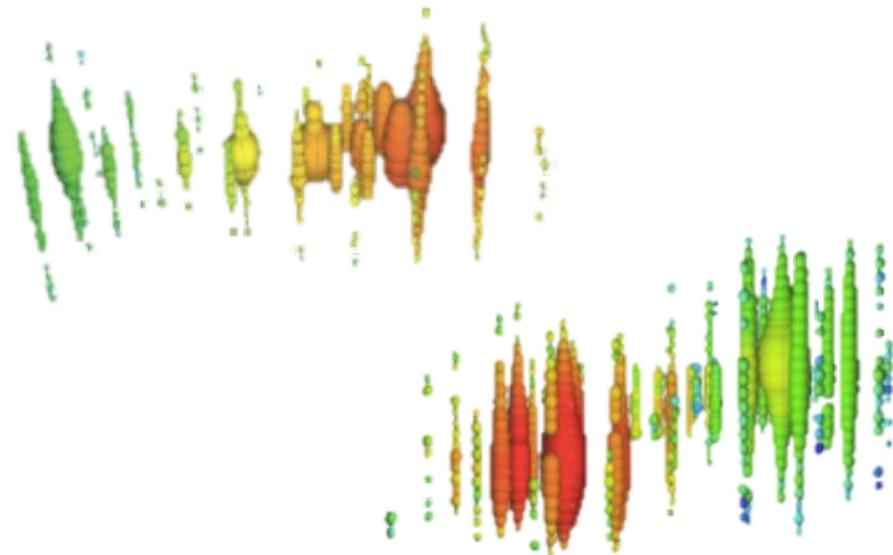
- ❑ Direction de l'événement :
 - ❑ descendant : probablement un muon ?
 - ❑ montant : neutrino ?
- ❑ Contenance de l'événement :
 - ❑ contenu dans le détecteur : grande chance d'être un neutrino
- ❑ Énergie du neutrino :
 - ❑ liée à la quantité de lumière déposée

EXEMPLES

neutrino
contenu



trace traversant tout
le détecteur
(si descendante = muon)

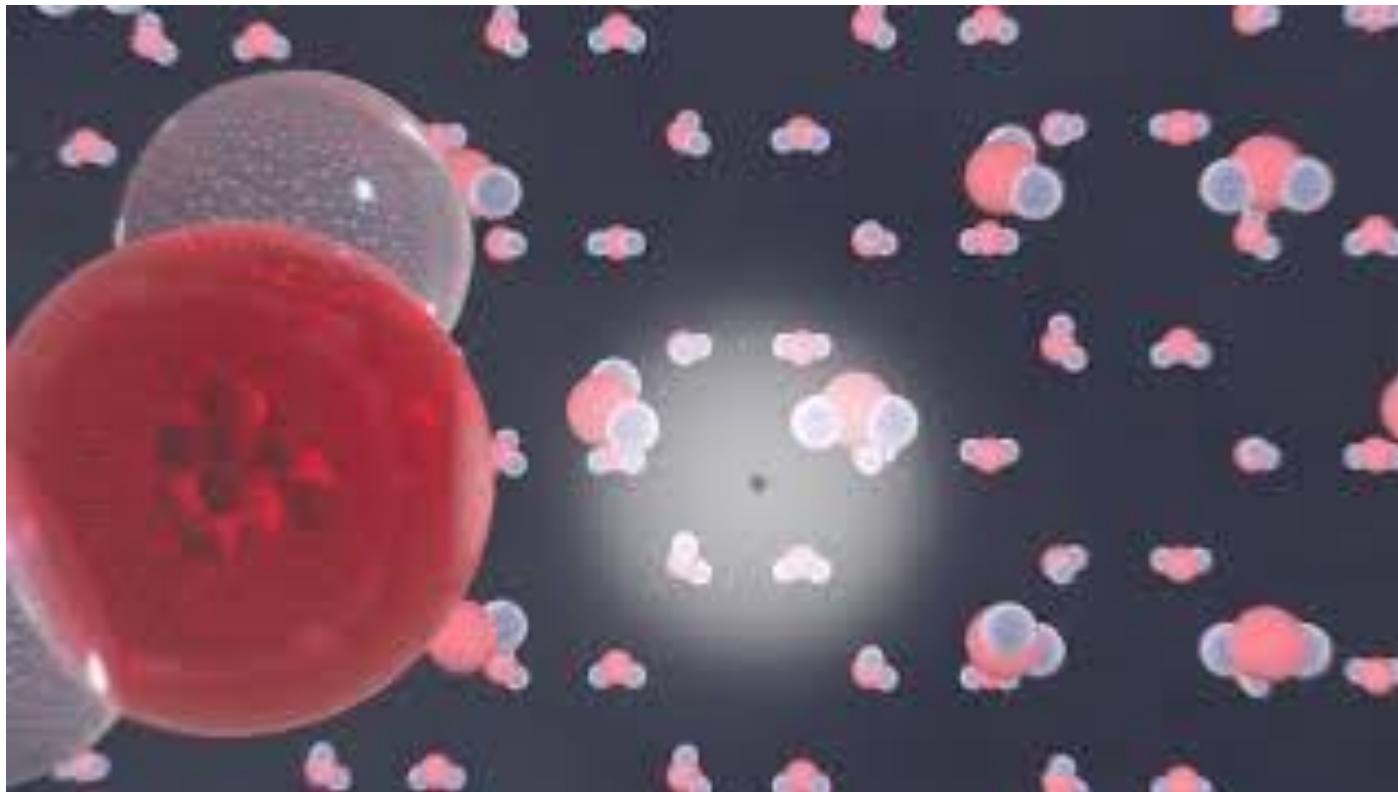


ACTIVITÉ D'INTRODUCTION AUX NEUTRINOS

Liens :

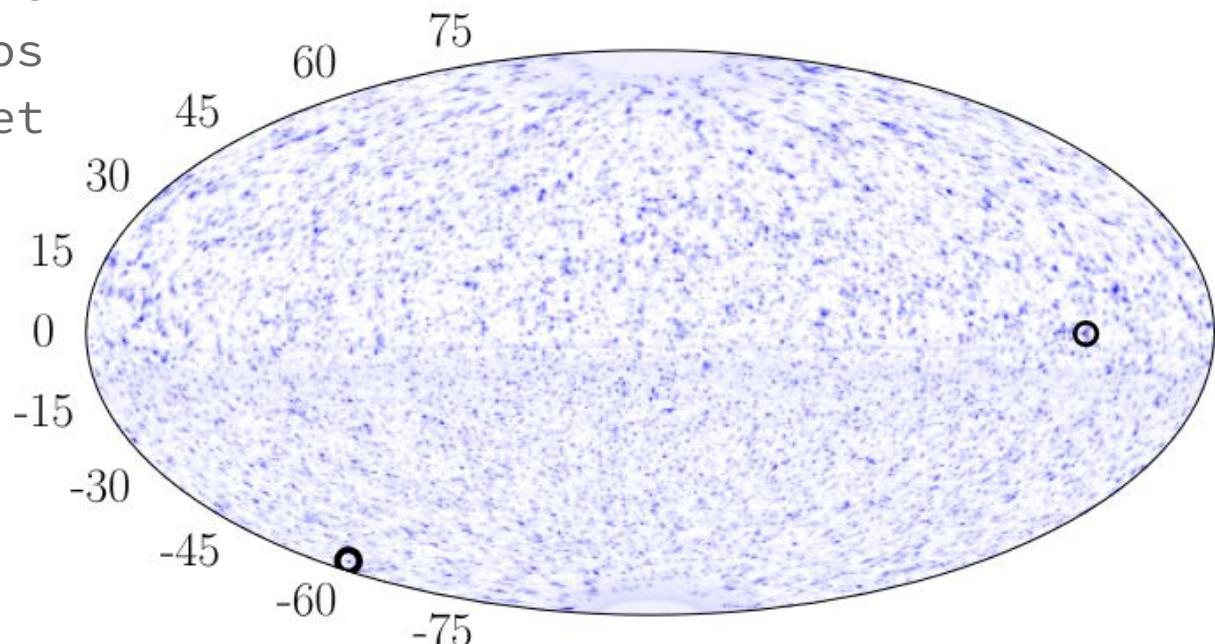
- ❖ [muon VS neutrino](#)
- ❖ [sélection](#)
- ❖ [visualisation](#)

DÉCOUVERTE D'UNE PREMIÈRE SOURCE DE NEUTRINOS



CATALOGUE DE NEUTRINOS VUS PAR ICECUBE

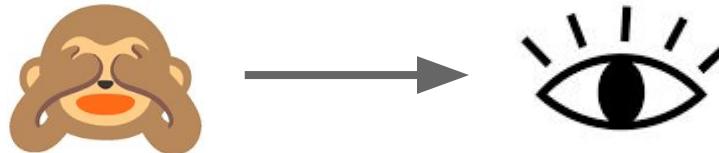
Le catalogue contient un million de neutrinos détectés entre 2008 et 2018.



Lien

COMMENT ANALYSER LES DONNÉES ?

1. ~~Récupérer les données brutes du détecteur~~
2. ~~Corriger celles ci pour les “problèmes connus”~~
3. ~~Reconstruire au mieux les neutrinos correspondants~~
4. ~~Filtrer les événements afin d'éliminer le bruit de fond~~
5. Définir une stratégie de recherche / d'analyse
6. Tester la stratégie avec des fausses données / simulations



7. Regarder les données !
8. Présenter la méthode et les résultats à la communauté

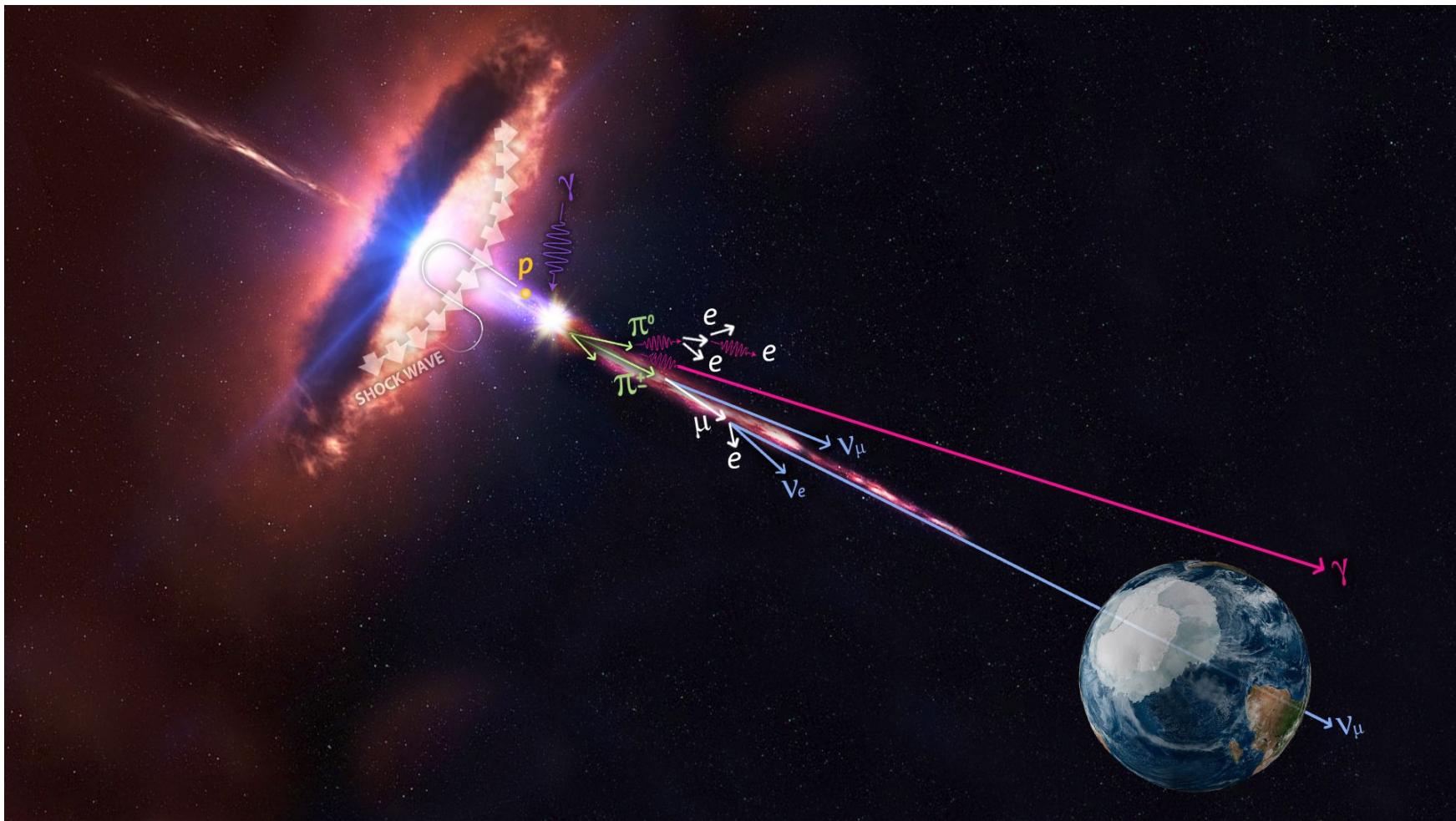
VOTRE PROJET DE RECHERCHE

1. Accéder à des données déjà filtrées (*grande probabilité d'être de vrais neutrinos*)
2. Comprendre ces données en regardant différentes distributions
3. Test avec une source astrophysique potentielle :
 - a. définir une stratégie de recherche de neutrinos
 - b. chercher des neutrinos “autour” de cette source
 - c. quantifier l’existence ou la non-existence d’un excès de neutrinos
4. Répéter l’étape 3 avec un catalogue de sources

NOMS DES SOURCES

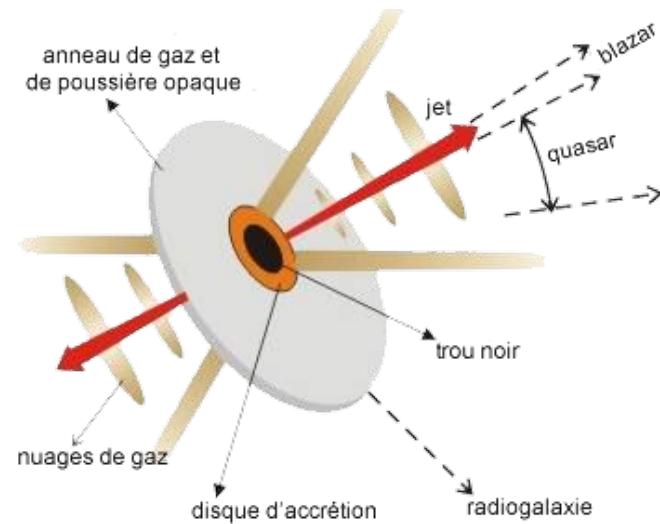
Souvent, les objets sont souvent nommés par leur catalogue :

- ❖ PKS 0521-365 →
 - PKS = catalogue de sources radio “Parkes”
 - 0521 = Ascension Droite d'environ $5^{\text{h}} 22^{\text{m}}$
 - -365 = Declinaison de -36.5°
- ❖ Mkn 501 →
 - Mkn = catalogue de galaxies “Markarian”
 - 501 = 501^{ème} objet



TYPES DES SOURCES

- ❖ Galaxies actives (trou noir central)
- ❖ “Starburst” galaxies
- ❖ Restes d’explosion d’étoiles (supernova)
- ❖ Pulsar (étoile à neutrons en rotation)
- ❖ ...



LANGAGE DE PROGRAMMATION PYTHON



COMMENT ENTRER DES INSTRUCTIONS ?

- ❖ Script avec une série d'instructions et qui produit des résultats.
 - ❖ “Notebook” = succession de “cellules” exécutées les unes après les autres. Garde la mémoire des valeurs stockées

```
    response = requests.get(url)
    # checking response status code
    if response.status_code != 200:
        print(f"Status: {response.status_code} - Try rerunning the command")
    else:
        print(f"Status: {response.status_code}\n")
    # using BeautifulSoup to parse the response object
    soup = BeautifulSoup(response.content, "html.parser")
    # finding Post images in the soup
    images = soup.find_all("img", attrs={"alt": "Post image"})
    # downloading images
    for i, image in enumerate(images):
        image.download(f"post_{i}.jpg")
```

```
[1]: print("Ceci est une cellule à exécuter")
```

Ceci est une cellule à exécuter

```
[2]: a = 1 + 2
```

```
print(a)
```

14

```
[3]: b = 3 * 4
```

```
print(b)
```

12

```
[4]: print(a + b)
```

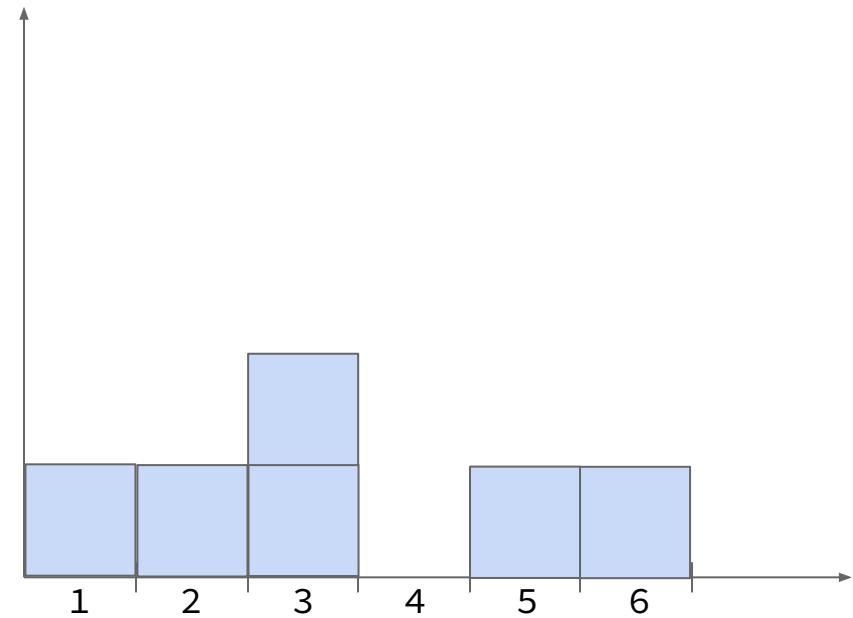
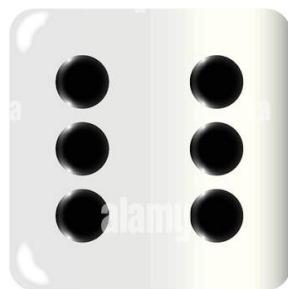
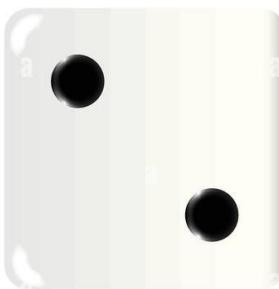
15

ACTIVITÉ D'INTRODUCTION AU PYTHON

Fichier intro_notebook.ipynb

OUTILS : HISTOGRAMMES (1)

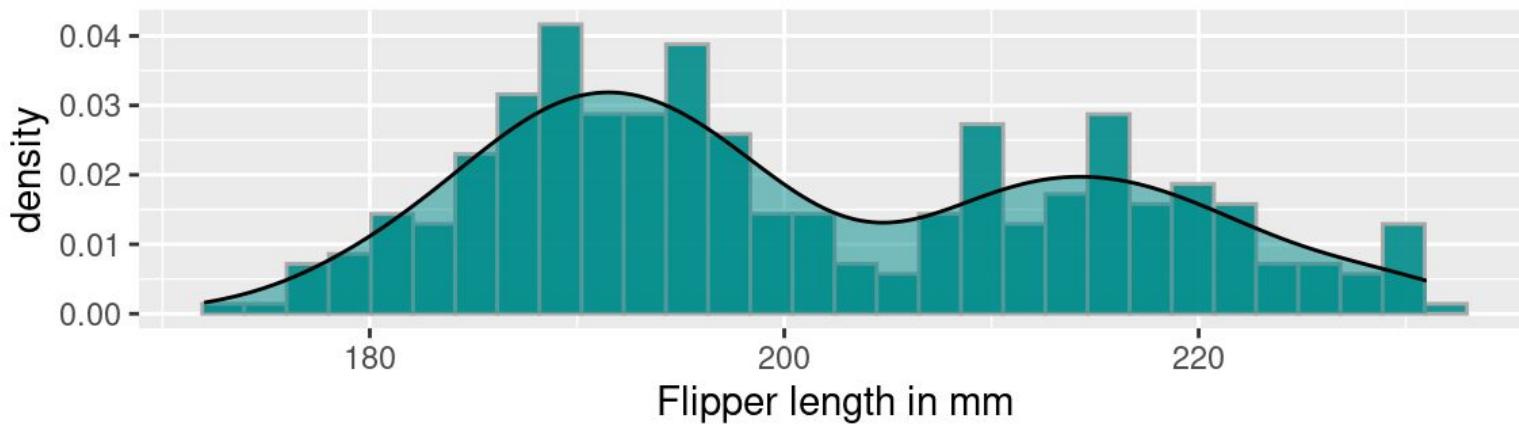
Imaginons une expérience de lancer de dés → 6 possibilités



OUTILS : HISTOGRAMMES (2)

Les histogrammes permettent de résumer nos données en une seule figure et identifier rapidement les valeurs typiques, la valeur moyenne, etc...

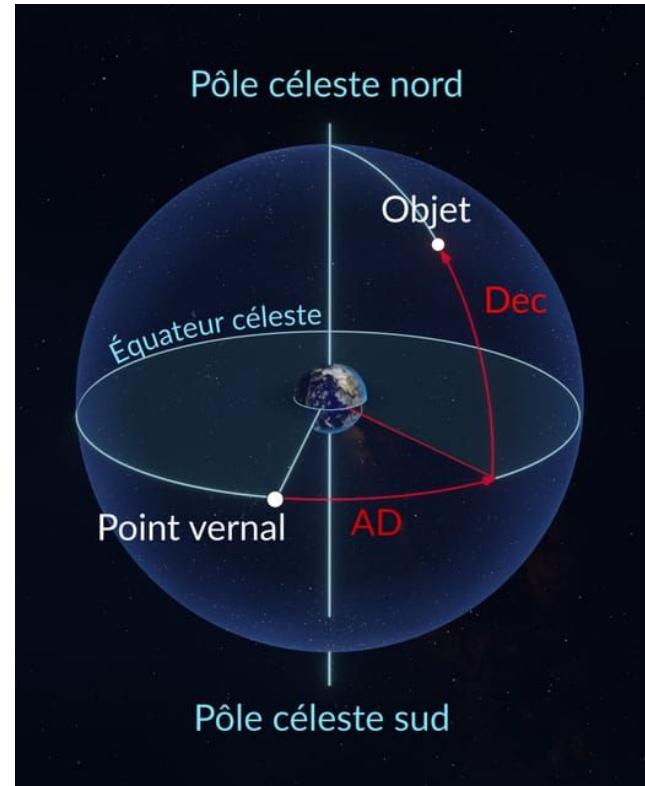
Flipper length density of penguins population



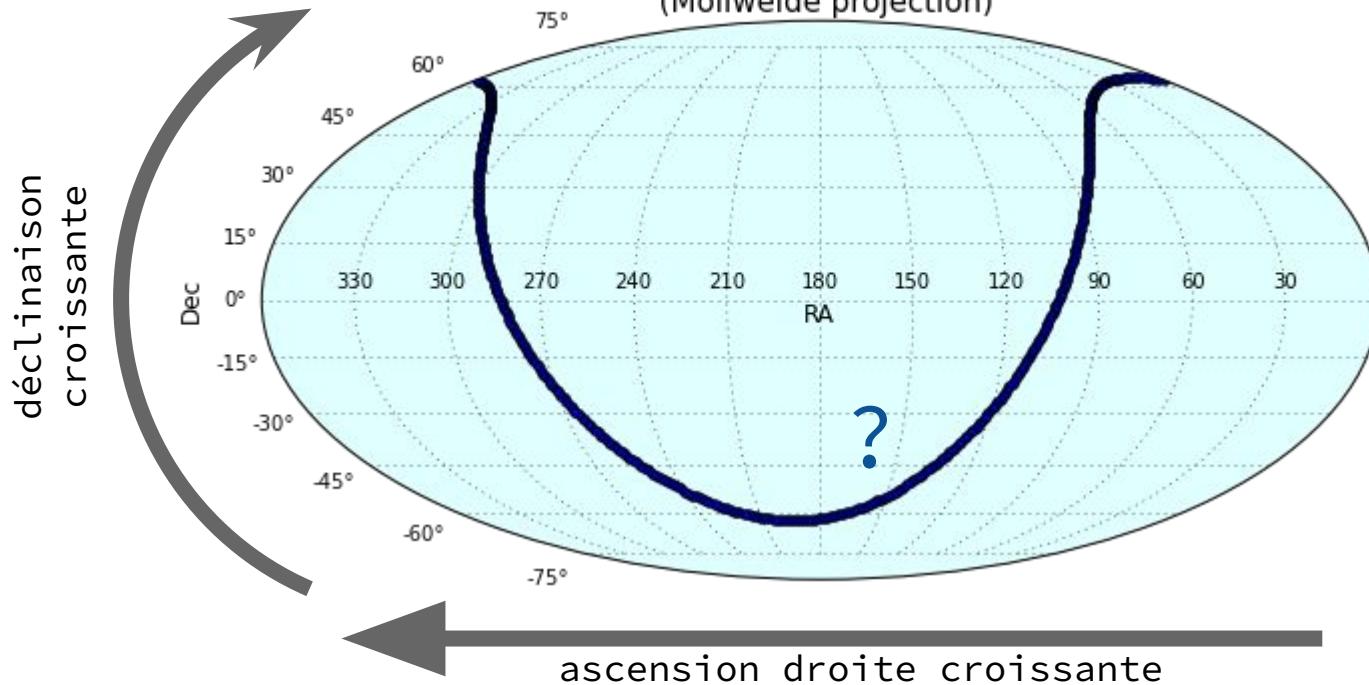
OUTILS : SYSTÈME DE COORDONNÉES (1)

Un point dans le ciel est défini par deux quantités :

- ❖ *déclinaison (Dec)* = angle entre le point et le plan de l'équateur
- ❖ *ascension droite (AD ou RA)* = angle sur le plan de l'équateur



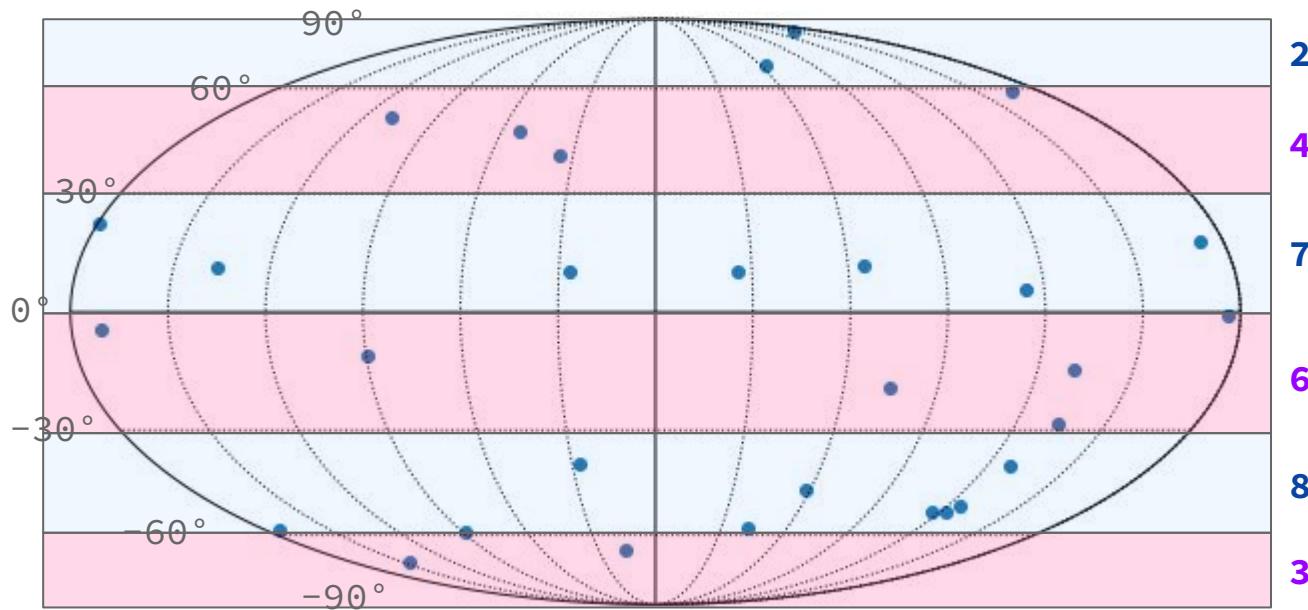
OUTILS : SYSTÈME DE COORDONNÉES (2)





Fichier work_notebook.ipynb

CONSIDÉRATIONS GÉOMÉTRIQUES



OUTILS : ANGLE ENTRE DEUX POINTS DANS LE CIEL (1)

Pour une direction (RA, Dec), on peut définir le vecteur 3D correspondant comme en coordonnées sphériques :

RA ₁ , Dec ₁	RA ₂ , Dec ₂
$\vec{u}_1 = \begin{pmatrix} X_1 = \cos Dec_1 \times \cos RA_1 \\ Y_1 = \cos Dec_1 \times \sin RA_1 \\ Z_1 = \sin Dec_1 \end{pmatrix}$	$\vec{u}_2 = \begin{pmatrix} X_2 = \cos Dec_2 \times \cos RA_2 \\ Y_2 = \cos Dec_2 \times \sin RA_2 \\ Z_2 = \sin Dec_2 \end{pmatrix}$

OUTILS : ANGLE ENTRE DEUX POINTS DANS LE CIEL (2)

L'angle α entre deux directions est obtenu en effectuant le produit scalaire des deux vecteurs 3D :

$$\cos \alpha = \vec{u}_1 \cdot \vec{u}_2 = X_1X_2 + Y_1Y_2 + Z_1Z_2$$

Comment simplifier cette relation ?

Formules pouvant
être utiles

$$\begin{aligned}\sin(a + b) &= \sin(a)\cos(b) + \sin(b)\cos(a) \\ \sin(a - b) &= \sin(a)\cos(b) - \sin(b)\cos(a) \\ \cos(a + b) &= \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \\ \cos(a - b) &= \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b)\end{aligned}$$

OUTILS : ANGLE ENTRE DEUX POINTS DANS LE CIEL (3)

$$\vec{u}_1 = \begin{pmatrix} X_1 = \cos Dec_1 \times \cos RA_1 \\ Y_1 = \cos Dec_1 \times \sin RA_1 \\ Z_1 = \sin Dec_1 \end{pmatrix} \quad \vec{u}_2 = \begin{pmatrix} X_2 = \cos Dec_2 \times \cos RA_2 \\ Y_2 = \cos Dec_2 \times \sin RA_2 \\ Z_2 = \sin Dec_2 \end{pmatrix}$$

$$\cos \alpha = \vec{u}_1 \cdot \vec{u}_2 = X_1X_2 + Y_1Y_2 + Z_1Z_2$$

$$\sin(a + b) = \sin(a)\cos(b) + \sin(b)\cos(a)$$

$$\sin(a - b) = \sin(a)\cos(b) - \sin(b)\cos(a)$$

$$\cos(a + b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$$

$$\cos(a - b) = \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b)$$

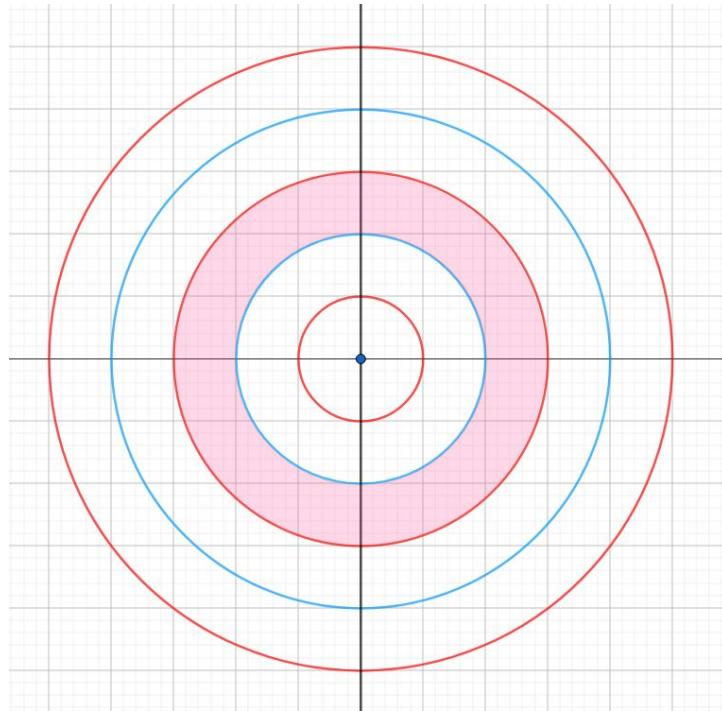
cos α = ???

OUTILS : ANGLE ENTRE DEUX POINTS DANS LE CIEL (4)

Solution :

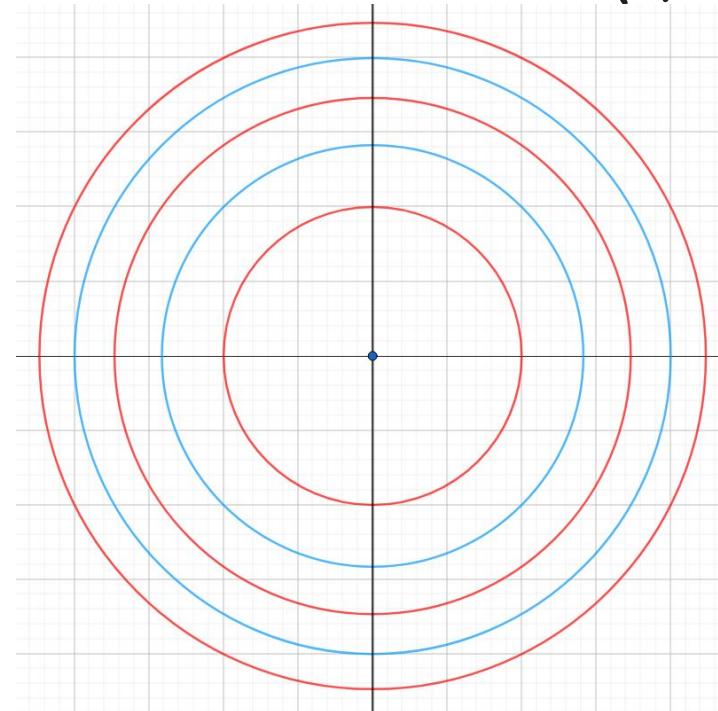
$$\cos \alpha = \cos (RA_1 - RA_2) \cdot \cos Dec_1 \cdot \cos Dec_2 + \sin Dec_1 \cdot \sin Dec_2$$

OUTILS : MEILLEURE VARIABLE DE DISTANCE ANGULAIRE (1)



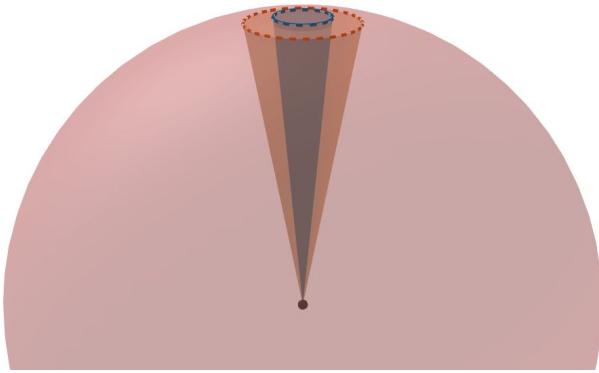
$R = 1, 2, 3\dots$
Surface = ?

$$\text{Surface} = \pi(R_{n+1}^2 - R_n^2)$$



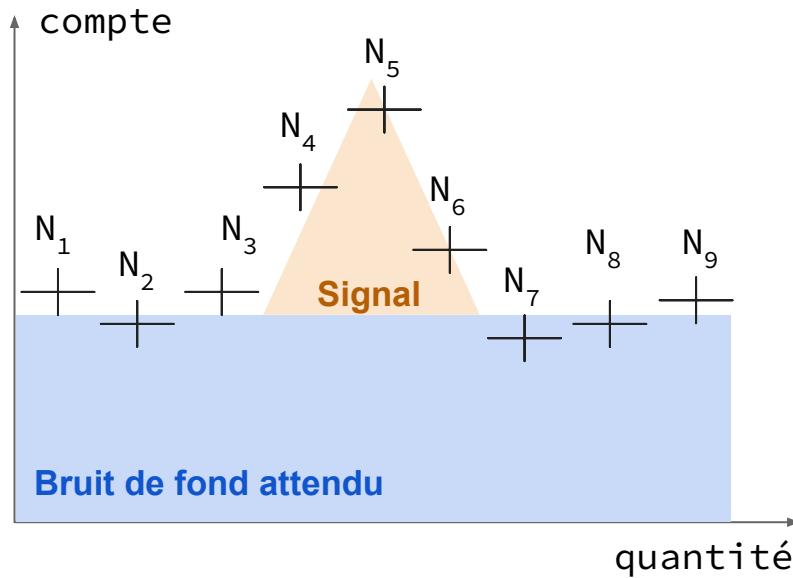
$R = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}\dots$
Surface = ?

OUTILS : MEILLEURE VARIABLE DE DISTANCE ANGULAIRE (2)



- ❖ En 3D, la “surface du cône de rayon α vaut $2\pi (1 - \cos \alpha) \sim \pi \alpha^2$.
- ❖ Donc pour avoir des anneaux de taille constante, il suffit de faire un histogramme en α^2 (fonctionne que pour les petits angles) ou en $\cos \alpha$.

OUTILS : ÉVALUATION SIMPLE D'UN EXCÈS

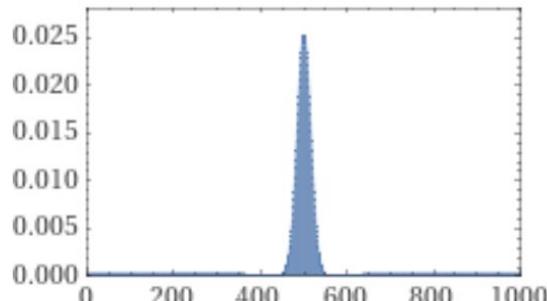
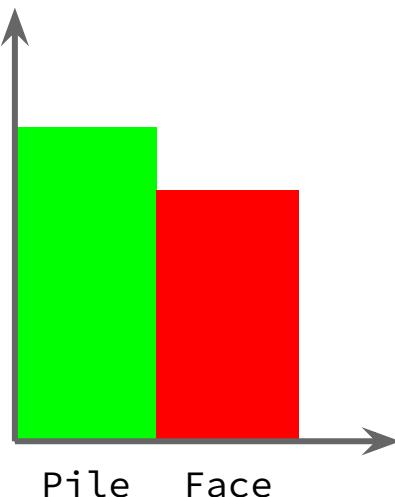


- ❖ Bruit de fond supposé uniforme sur la distribution.
 - ❖ Signal uniquement dans les trois bins centraux
 - ❖ Bruit de fond par bin :
- $$B(1 \text{ bin}) = (N_1 + N_2 + N_3 + N_7 + N_8 + N_9) / 6$$
- ❖ Bruit de fond dans les 3 bins centraux :
- $$3 \times B(1 \text{ bin})$$
- ❖ Excès obtenu par soustraction du bruit de fond :

$$\text{Excès} = (N_4 + N_5 + N_6) - 3 \times B(1 \text{ bin})$$

OUTILS : QUANTIFIER L'EXCÈS (1)

On lance 1000 fois une pièce, combien attend-on de “pile” pour une pièce normale. A partir de quand peut-on la penser “truquée” ?



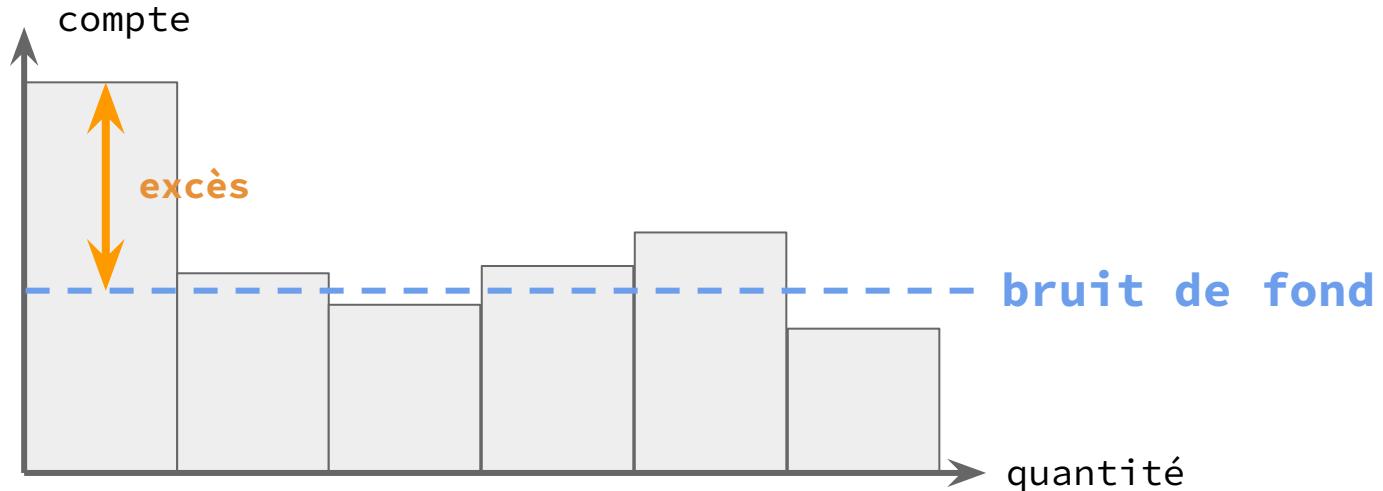
- ❖ Nombre attendu de “pile” $P_{\text{attendu}} = 500$
- ❖ Nombre mesuré = P
- ❖ Distribution attendue de P si pièce normale :

- ❖ On calcule $Z = (P - P_{\text{attendu}}) / \sqrt{P}$
- ❖ Un excès/déficit commence à être intéressant si $|Z| > 2-3$.
- $P = 500 \rightarrow Z = 0$
- $P = 550 \rightarrow Z \approx 2$
- $P = 600 \rightarrow Z \approx 4$

OUTILS : QUANTIFIER L'EXCÈS (2)

On peut faire la même chose dans notre cas.

- ❖ N = nombre d'événements dans le premier bin
- ❖ B = bruit de fond attendu
- ❖ $Z = (N-B)/\sqrt{N}$



NGC 1068

