### Astronomie des neutrinos de hautes énergies

Un aperçu (partiel) un peu biaisé en faveur de :

- Technique Tcherenkov 🛛 🌉

- ANTARES



Antoine Kouchner Université Paris 7 Diderot Laboratoire APC



# Quelques références

#### Les cours de Gif

- ✓ 1992
- ✓ 1997
- ✓ 1999

#### <u>Livres</u>

- ✓ Grupen, Astroparticle physics, Springer, 2000
- ✓ Mohaparta & Pal, Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics, World Scientific, 2004
- ✓ Bahcall, *Neutrino Astrophysics*, Cambridge University Press 1989
- ✓ Grotz & Klapdor, The Weak Interaction in Nuclear, Particle and Astrophysics, Adam Hilger 1990
- ✓ Halzen & Marteen, Quarks and Leptons, John Wiley 2004
- ✓ Winter, Neutrino Physics, Cambridge University Press 1991
- ✓ Zuber, *Neutrino Physics*, IoP 2004

#### <u>Revues</u>

- ✓ Baret and Van Elewyck, *High energy neutrino astronomy*, Reports on Progress in Physics, Volume 74, Issue 4, pp. 046902 (2011).
- Anchordoqui & Montaruli, In Search for Extraterrestrial High Energy Neutrinos, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 60 (2010) 129-162
- ✓ T. Chiarusi, M. Spurio, *High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes*, arXiv:0906.2634, 2010

# Plan de l'exposé

### Astronomie neutrino

Cours de Th. Patzak (jeudi) → Rappels historiques Motivations scientifiques Sources de neutrinos

### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres Principes de détection Les télescopes actuels Le télescope ANTARES

### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

Cours de S. Katsanevas (vendredi) → Le projet KM3NeT









# Le neutrino et la radioactivité $\beta$ Crédit: Th. Patzak

**1911-1912 :** Van Bayer, O. Hahn, L. Meitner mesurent l'énergie des électrons  $\beta \rightarrow$  spectre discret !

Compatible avec interprétation d'alors : noyau = A protons + (A -Z) électrons

Désintégration  $\beta$ : (A, Z)  $\rightarrow$  (A, Z-1) + e<sup>-</sup>

**1914:** James Chadwick: Le spectre en énergie de l'électron est continu (avec une chambre à ionisation)





Attendu

2-body decay

**Beta Energy** 

### Mesuré



"There is probably some silly mistake somewhere"

# Solutions théoriques possibles

Niels Bohr (1885-1962)



« L'énergie n'est conservée que statistiquement »

Crédit: Th. Patzak

Wolfgang Pauli (1900-1958)



« 1930 : Émission d'une particule neutre et légère »

Lettre aux Physiciens « radioactifs» en réunion à Tübingen.

C'est la naissance du neutrino, d'abord appelé neutron

# 1933: Théorie de Fermi (β)

### Cours de F. Piquemal (hier)



1901 - 1954

- Le neutrino est formellement traitée comme une particule de spin 1/2
- Fermi s'inspire de la théorie des perturbations au premier ordre
- Règle d'or de Fermi

$$\delta P_{i \to f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f| W |i \rangle|^2 \rho(E_f) \quad \text{sec}^{-1}$$
$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f| W |i \rangle|^2 \rho(E_f) \quad \text{sec}^{-1}$$

La probabilité de désintégration de la particule croît avec le temps

$$\Delta \mathbf{P} = \lambda \Delta t$$

La probabilité de survie conduit à la loi de désintégration bien connue :

$$dE_{f} = dN \text{ états} \qquad \lambda = N_{i}^{-1} (-dN_{i}/dt) \\ N_{i}(t) = N_{i}(0) e^{-\lambda t} \qquad (pour t >> \lambda^{-1}) \\ E_{f} = \frac{dN}{dE_{f}} = \rho(E) \qquad Durée de vie moyenne de la particule \ \tau = \lambda^{-1} \\ \hline Densité des états finals \\ \hline E_{f} = \lambda^{-1}$$

# Une particule controversée..



1882 - 1944

Just now nuclear physicists are writing a great deal about hypothetical particles called neutrinos supposed to account for certain peculiar facts observed in ß-ray disintegration. We can perhaps best describe the neutrinos as little bits of spinenergy that have got detached. I am not much impressed by the neutrino theory. In an ordinary way I might say that I do not believe in neutrinos... But I have to reflect that a physicist may be an artist, and you never know where you are with artists. My old-fashioned kind of disbelief in neutrinos is scarcely enough. Dare I say that experimental physicists will not have sufficient ingenuity to make neutrinos? Whatever I may think, I am not going to be lured into a wager against the skill of experimenters under the impression that it is a wager against the truth of a theory. If they succeed in making neutrinos, perhaps even in developing industrial applications of them, I suppose I shall have to believe—though I may feel that they have not been playing quite fair.

Sir Arthur Stanley Eddington The Philosophy of Physical Science (1939)

# Reines et Cowan : détection directe



Cours de Th. Lasserre

 $p + \overline{v} \rightarrow n + e^+$ 

Seuil de la réaction = 1,8 MeV

### 1953 : Hanford

300 litres de scintillateurs seulement. Résultats encourageants, mais trop de bruit de fond



### **1956 : Savanah River**

La cible est constituée de 400 litres d'eau et de chlorure de Cadmium.

Le neutrino interagit avec un proton et donne un positon (e+) et un neutron (n).

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow \gamma + \gamma$$
  
n + <sup>108</sup>Cd  $\rightarrow$  <sup>109</sup>Cd<sup>\*</sup>  $\rightarrow$  <sup>109</sup>Cd +  $3\gamma$   
 $\gamma + e^{-} \rightarrow \gamma + e^{-}$  (compton  
15 µs plus tare

Prix Nobel 1995 (Cowan décédé)



# Découverte du neutrino muonique

### 1963



**34 evts avec un seul \mu (P<sub>\mu</sub>><b>300MeV)** Bruit de fond (atm) attendu = 5









Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

# Observation directe du neutrino tau



### Événement type:

une trace (lepton tau) + kink de désintégration avec un grand Pt et énergie manquante  $\tau \rightarrow e v_{\tau} v_{e}$  (18%)  $\tau \rightarrow \mu v_{\tau} v_{\mu}$  (18%)  $\tau \rightarrow h$  + neutre (50%)

# Plan de l'exposé

### Astronomie neutrino

Rappels historiques *Motivations scientifiques* Sources de neutrinos

### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres Principes de détection Les télescopes actuels Le télescope ANTARES

### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

### Le projet KM3NeT









**But** : Etudier la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers par l'intermédiaire du rayonnement cosmique dans toutes ses composantes



Crédit : J. Paul



Sol







Les rayons cosmiques

# Ondes gravitationnelles

Crédit : J. Paul



Space

Ground







# Les premières idées début 1960...

### NEUTRINO INTERACTIONS<sup>1</sup>

Ann.Rev.Nucl.Sci 10 (1960) 1

By FREDERICK REINES<sup>2</sup>

#### IV. COSMIC AND COSMIC RAY NEUTRINOS

As we have seen, interactions of high-energy particles with matter produce neutrinos (and antineutrinos). The question naturally arises whether the neutrinos produced extraterrestrially (cosmic) and in the earth's atmosphere (cosmic ray) can be detected and studied. Interest in these possibilities stems from the weak interaction of neutrinos with matter, which means that they propagate essentially unchanged in direction and energy from their point of origin (except for the gravitational interaction with bulk matter, as in the case of light passing by a star) and so carry information which may be unique in character. For example, cosmic neutrinos can reach us from other galaxies whereas the charged cosmic ray primaries reaching us may be largely constrained by the galactic magnetic field and so must perforce be from our own galaxy. Our more usual source of astronomical information, the photon, can be absorbed by cosmic matter such as dust. At present no acceptable theory of the origin and extraterrestrial diffusion of cosmic rays exists so that the cosmic neutrino flux can not be usefully predicted. An observation of these neutrinos would provide new information as to what may be one of the principal carriers of energy in intergalactic space.

The situation is somewhat simpler in the case of cosmic-ray neutrinos: they are both more predictable and of less intrinsic interest. Cosmic-ray

Greisen, 1960, Proc. Int. Conf on Instrum for HE physics

On may even anticipate eventual high-energy neutrino astronomy, since neutrino travel in straight lines, unlike the usual primary cosmic rays, and the neutrinos will convey a new type of astronomical information quite different from that carried by visible light and radio waves

### Astronomie multi-messagère





# Quel horizon pour les particules chargées de HE?

Les particules chargées interagissent aussi avec les fonds de rayonnement: **GZK cut-off** 

Et sont déviées par les champs magnétiques...



La fenêtre en énergie pour une astronomie des RC chargés est petite (autour de 10<sup>19</sup> eV) (mais existe, voir expérience AUGER)

### Astronomie multi-messagère



### Neutrino

- ⇒ Phénomènes transitoires
- $\Rightarrow$  Distances cosmologiques
  - $\Rightarrow$  Cœur des sources
  - $\Rightarrow$  Sources ponctuelles

# Les rayons cosmiques de haute énergie

Particle Data Group



Accélération de particules chargées lors de chocs stochastiques en présence de champs magnétiques forts  $\rightarrow$  loi de puissance

Compatible avec le mécanisme de Fermi du 1<sup>er</sup> ordre, en prenant en compte les effets de confinement et de propagation (les pertes d'énergie au cours de la propagation dépeuplent les particules très énergétiques au profit des particules moins énergétiques)

$$N_{CR} \propto E^{-2.7}$$

$$\rightarrow Q_{CR} \sim N_{CR}/t_{esc} \sim E^{-2.7+\delta}$$

Coupure à UHE confirmée mais ...

Nature Origine Production

# Mécanisme de Fermi

Transfer of macroscopic kinetic energy of moving magnetized plasma to individual charged particle

### **EXERCICES**:

1. Consider a process in which a test particle increases its energy by an amount proportional to its energy at each "encounter":  $\Delta E = \xi E$ . What is energy after n encounters?  $E_0$  being the injection energy.

$$E = E_0 (1 + \xi)^n$$

2. Let's define P<sub>esc</sub> the probability to escape the acceleration region after each encounter. What is the probability of remaining in the acceleration region after n encounters? What is the number of encounters needed to reach an energy E?

$$P_{remain} = (1 - P_{esc})^n \qquad \qquad \ln \frac{E}{E_0} = \ln(1 + \xi)^n \Rightarrow n = \frac{\ln E / E_0}{\ln(1 + \xi)}$$

3. What is the proportion of particles accelerated to energies greater than E?

$$N(>E) \propto \sum_{m \ge n} (1 - P_{esc})^m \quad \text{using } \sum_{m=0}^N q^n = \frac{1 - q^{N+1}}{1 - q} \Longrightarrow N(>E) \propto \frac{(1 - P_{esc})^n}{P_{esc}}$$
$$\Rightarrow N(>E) \propto \frac{1}{P_{esc}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \quad \text{with} \quad \gamma = \frac{\ln(1 - P_{esc})^{-1}}{\ln(1 + \xi)} \approx \frac{\frac{P_{esc}}{\xi}}{\xi}$$



Mécanisme original de Fermi Fermi, E. *Phys. Rev., 75, 1169 (1949)* nuages magnétisés en mouvement

Les particules peuvent gagner ou perdre de l'énergie à chaque rencontre.

Après plusieurs rencontres le gain est net (mais faible)

$$\langle \xi \rangle = \frac{4}{3}\beta^2$$

Gain d'énergie à chaque rencontre

$$\langle \xi \rangle = \frac{4}{3}\beta$$

$$\gamma \approx \frac{P_{esc}}{\xi} \Rightarrow \gamma \approx 1 \Rightarrow \frac{dN}{dE} \propto E^{-2}$$

Compatible avec les observations!

# Les rayons cosmiques de haute énergie

Particle Data Group



Accélération de particules chargées lors de chocs stochastiques en présence de champs magnétiques forts  $\rightarrow$  loi de puissance

Compatible avec le mécanisme de Fermi du 1<sup>er</sup> ordre, en prenant en compte les effets de confinement et de propagation (les pertes d'énergie au cours de la propagation dépeuplent les particules très énergétiques au profit des particules moins énergétiques)

$$N_{CR} \propto E^{-2.7}$$

$$\longrightarrow Q_{CR} \sim N_{CR}/t_{esc} \sim E^{-2.7+\delta}$$

Coupure à UHE confirmée mais ...

Nature Origine Production

### Lien entre les messagers

• Cascades hadroniques (comme pour les gerbes atmosphériques)



### Accélération («Bottom-Up»)

Chocs stochastiques (mécanisme de Fermi) Explosion / Accrétion / Effondrement gravitationnel



### Processus électromagnétiques

Synchrotron Inverse Compton = Pas de neutrinos



synchrotron radiation

# Ex: Nébuleuse du Crabe



Standard candle for γ-ray astronomy 1<sup>st</sup> TeV gamma-ray source observed by WHIPPLE in 1989 (50h) HESS 2003 30s

# Exemple : la nébuleuse du Crabe



Mutli-wavelength analysis  $\rightarrow$  Modeling of the source



# Lien entre messagers @ flux de neutrinos

• Cascades hadroniques (comme pour les gerbes atmosphériques)

"Dangerous business to make predictions about the detection of inherently unpredictable phenomena [...] However if  $\gamma$  observations are correct we should see at least a half dozen neutrino point sources with DUMAND-II (9 strings)"

J G Learned, 2<sup>nd</sup> internat. Workshop on Neutrino Telescope, Venise, 1990.

Les prédictions théoriques varient sur plusieurs ordres de grandeur.

Toutefois les estimations ont été largement révisées à la baisse dans les années 2000

- Estimations fondées sur le RCUHE
- Observations des photons au TeV
- Premières limites expérimentales des télescopes à neutrinos.

# Lien entre messagers @ flux de neutrinos

• Cascades hadroniques (comme pour les gerbes atmosphériques)



Les données d'AUGER semblent indiquer une composition plus massique à haute énergie, ce qui diminue les prédictions flux. IceCube / AUGER peuvent exclure les prédictions les plus optimistes et donc apporter des contraintes sur les primaires. Attendu : 1 événement par km<sup>2</sup> par an (pas de bruit de fond)

# Flux diffus de v extragalactiques (WB)

### <u>Hypothèses et Méthode</u> $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n$

- Echappement des n, conversion en p par désintégration  $\beta \Rightarrow \Phi_{rc}(E)$  observé
- Champs magnétiques sans influence
- Le spectre à la source suit une loi de puissance dN/dE  $\propto E^{\text{-}2}$
- spectre primaire est constitué de protons!
- La normalisation est assurée avec les données expérimentales disponibles

### $\Rightarrow$ Une particule de 10<sup>19</sup> eV par km<sup>2</sup> par an et par stéradian

$$E^{2} \frac{dN}{dE} = \frac{10^{19} eV}{(10^{10} cm^{2})(3 \times 10^{7} \text{ sec}) sr} = 3 \times 10^{-11} TeV cm^{-2} \text{ sec}^{-1} sr^{-1}$$



1934-2005

✓ On en déduit la densité d'énergie des RC à partir de la relation Flux total = vitesse x densité

$$4\pi \int dE \left( E \frac{dN}{dE} \right) = c \,\varepsilon_{CR} \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon_{CR} = \frac{4\pi}{c} \int \frac{3 \times 10^{-11}}{E} dE \,\frac{TeV}{cm^3} = \cdots \log \frac{E_{\max}^{[10^{21}]}}{E_{\min}^{[10^{19}]}} \approx 10^{-19} \frac{TeV}{cm^3}$$

✓ Ce qui se traduit par une densité de puissance (temps de Hubble  $\tau \approx 10^{10}$  ans) de  $\sim 3 \times 10^{-19}$  erg/cm<sup>3</sup> ou  $\sim 3.10^{44}$  erg an<sup>-1</sup> Mpc<sup>-3</sup> pendant 10<sup>10</sup> ans [1 erg = 1.6 TeV]

- ✓ Incidemment comparable aux observations dans le spectre électromagnétique
  - $\begin{array}{ll} \sim 3\cdot 10^{39} \mbox{ erg s}^{-1} \mbox{ / galaxie } & \sim 2\cdot 10^{44} \mbox{ erg s}^{-1} \mbox{ / galaxie active } \\ \sim 3\cdot 10^{42} \mbox{ erg s}^{-1} \mbox{ / amas de galaxies } & \sim 2\cdot 10^{52} \mbox{ erg s}^{-1} \mbox{ / sursaut gamma } \end{array}$

# Flux diffus de v extragalactiques (WB)



• Le taux de production d'énergie de RC peut donc s'écrire

$$\begin{bmatrix} E^2 \frac{d\dot{n}}{dE} &= \frac{\dot{\epsilon}_{CR}^{[10^{10}, 10^{12}]}}{\ln(10^{12}/10^{10})} \\ \approx 10^{44} \, \text{erg} \, \text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1} \end{bmatrix}$$



• Dont on déduit la densité d'énergie des neutrinos

$$E_v^2 \frac{dn_v}{dE_v} = 0.25\varepsilon_\pi t_H E_{CR}^2 \frac{d\dot{n}}{dE_{CR}}$$

Où le facteur 0.25 prend en compte un rapport production  $\pi^0\!\!:\pi^{\pm}\!=1\!:\!1$  et suppose  $\mathsf{E}_{_{\rm V}}$  = 0.5  $\mathsf{E}_{_{\pi}}$ 

 $\epsilon_{\pi}$  fraction d'  $E_{p}$  perdue par py avant échappement

• La « limite de WB » est définie par la condition  $\epsilon_{\pi}$  =1

oscillations

$$E_{v}^{2} \frac{dn_{v}}{dE_{v}} = 0.25\varepsilon_{\pi}\xi_{z} \frac{c}{4\pi}t_{H}E_{CR}^{2} \frac{d\dot{n}}{dE_{CR}} = 1.5 \times 10^{-8}\xi_{z} \quad GeV \, cm^{-2} \, s^{-1} \, sr^{-1} \quad \times \frac{1}{2} \bigvee \left[ v_{\mu} + \overline{v}_{\mu} \right]$$

Où  $\xi_z \approx 3$  prend en compte la possible évolution de la densité de sources avec le redshift.

# Lien entre messagers @ flux de neutrinos

Limites controversées... mais fixent la taille d'un TN à >1 km<sup>3</sup>

 $E^{-2} \phi(E) = 4.5 \ 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 

~ O(100) événements/an/km<sup>2</sup>

 « High Energy Neutrinos from Astrophysical Sources: An Upper Bound » PRD 59 (1999)
 « On the Cosmic Ray Bound for models of Extragalactic Neutrino production » PRD 63 (2001)
 « High Energy Astrophysical Neutrinos: The Upper Bound is Robust » PRD 64 (2001)
 « The relation of extragalactic cosmic rays and neutrino fluxes: the logic of the upper bound debate » astro-ph/990831

- Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001
- Spectre des primaires libre
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons

Exclu par IceCube et ANTARES



# Plan de l'exposé

### Astronomie neutrino

Rappels historiques Motivations scientifiques Sources de neutrinos

### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres Principes de détection Les télescopes actuels Le télescope ANTARES

### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

### Le projet KM3NeT









# Diagramme de Hillas

Hillas, Ann. Rev.Astron. Astrophys. 1984.22:425-44



# Sources extragalactiques potentielles



Astropart. Phys. 34 (2010)
# Sources extragalactiques potentielles

De nombreuses prédictions de flux diffus de neutrinos dans les années 90... Révisées à la baisse après les travaux de WB et les premières limites expérimentales



### Sources extragalactiques potentielles

### Starburst galaxie (galaxies à sursaut de formation d'étoiles)



merging galaxies

⇒ Taux exceptionnel de formation d'étoiles qui pourrait résulter d'une collision, ou d'une interaction avec une ou plusieurs galaxies proches.

Phase temporaire de l'évolution de la galaxie.

#### Supernovae

- rayons cosmiques + gaz interstellaire
- Pions
- Neutrinos (~PeV)
- Loeb & Waxman JCAP 05 (2006) 003



BATSE : 1 sursaut /jour





Les neutrinos pourraient être détectés pendant l'observation du sursaut (gamma) Traitement spécial pour ANTARES

### Sources Galactiques potentielles



 Microquasars binaires X avec objet compact (étoile à neutrons ou trou noir) accréteur réémettant sous forme de jets (radio & IR)

#### • Restes de Supernovae Indications d'accélération hadrons SN1006, W28, W44, W49B, W51C ...





- SGRs pulsars X avec sursauts γ. Modèle "magnetar" : étoile à neutrons magnétisée subissant un tremblement de croûte
- Galactic black hole coronae.
   arXiv 1104.3747v1
   -> flares de neutrinos de sources proches (< qq kpc)</li>

 Régions denses
 Soleil, Centre Galactique, milieu interstellaire

# Flux de neutrinos (sources galactiques)

Pour les restes de supernovae (modèle hadronique), les rayons cosmiques interagissent avec les nuages moléculaires (nucléons-nucléons)

On pourra en première approximation utiliser les relations:

Puis d/dE<sub>2</sub> 
$$\frac{dF_{\nu_{\mu}}}{dE_{\nu_{\mu}}}(E_{\nu_{\mu}} = E_{\gamma}/2) \approx 4 \frac{dF_{\gamma}}{dE_{\gamma}}(E_{\gamma})$$
 Sans oscillation

TeV SNR le plus brillant observé par HESS

Ex: RXJ1713-3946

En supposant 
$$\frac{dF_{\gamma}}{dE_{\gamma}} = 1.7 \times 10^{-11} \left(\frac{E}{\text{TeV}}\right)^{-2.2} TeV^{-1}cm^{-2}s^{-1}$$

Costantini, Vissani Astropart.Phys. 23 (2005) 477-485

$$\Rightarrow \qquad \frac{dF_{\nu}}{dE} \approx 1.4 \times 10^{-11} \left(\frac{E}{\text{TeV}}\right)^{-2.2} TeV^{-1} cm^{-2} s^{-1} \qquad \text{(avant oscillation)}$$

On attend alors (après oscillations et prise en compte de la visibilité de la source) :

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{dF_{\nu}}{dE} dE \times \text{Surface} \times \text{Temps} \times P_{\nu \to \mu}(E)$$

→ env. 10 événements par an par km<sup>2</sup>

Le cas de RXJ1713-3946?

#### «Leptonic» model best fits «Hadronic» model best fits 0.01 Hadronic 0.01 Leptonic $10^{-3}$ $\begin{array}{c} {}^{\rm E^2 \ dN/dE \ [MeV/(cm^2-sec)]} \\ {}^{\rm L^2 \ 0} \\ {}^{\rm Q} \\ {}^{\rm L^2 \ 0} \end{array}$ 10-4 10-5 Synch D. C. Ellison et al. 10<sup>-6</sup> ApJ, 712, 287 (2010) 10-7 Acero et al. 10-7 cero et al. 10 0 3 6 -9 -6 -3 -120 3 6 -3-12-9Log<sub>10</sub> Energy [MeV] Log<sub>10</sub> Energy [MeV] Hadronic Leptonic E<sup>2</sup>dN/dE [ MeV cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] model Les récentes observations de - ED 10 E"ON/OE | MeV **FERMI** favorisent une production de $\gamma$ électromagnétique 10 on an et al. 2007 10 ESS (Aham erezhko & Voelk 2006 Ellison et al. 2010 (n<sup>0</sup>dominated) Zirakashvili & Aharonian 2009 (m<sup>0</sup> dominated Zirakashvili & Aharonian 2009 (IC/ n<sup>O</sup>mixed) Abdo et al. ApJ, 734, 28, 2011 10<sup>3</sup>

10<sup>3</sup>

10

10 Energy [MeV]  $10^{7}$ 

10<sup>8</sup>

10

HESS

Fermi

# Région centrale de la Galaxie

- Haute densité de matière
- Source compacte Sgr A\* Trou Noir ~3  $10^6 M_{\odot}$
- Sgr A East SNR



**HESS** 





→Champs de vue des télescopes à neutrinos de l'hémisphère nord...

... Mais nécessite un gros volume de détection

## Fermi Bubbles

"Giant, Multi-Billion-Year-Old Reservoirs of Galactic Center Cosmic Rays" M. Crocker and F. Aharonian Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 11102

"Bilateral 'bubbles' of emission centered on the core of the Galaxy and extending to around 10 kpc above and below the Galactic plane. These structures are coincident with a non-thermal microwave 'haze' found in WMAP data and an extended region of X-ray emission detected by ROSAT."



## Prédictions théoriques

#### A considérer avec prudence...

Source Type	Distance (kpc)	<b>E</b> <sub>v</sub> (GeV)	<b>Ν<sub>νμ</sub></b> (km <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Ref.
Supernovae Shocks pulsars	10	<~ 10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>5</sup> - 10 <sup>8</sup> ~ 10 - 10 <sup>8</sup>	~100 50 - 1000 ~ 100 - 1000 <~ 1000	Waxman & Loeb 2001 Protheroe et al. 1998 Beall & Bednarek 2002 Nagataki 2004
<b>Plerions</b> Crab	0.5 - 4.4 2	< 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>3</sup> - 5·10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>3</sup> - 5·10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>3</sup> - 5·10 <sup>5</sup> 10- 10 <sup>6</sup>	~ 1 - 12 <~ 1 a few ~ 1 ~ 4 - 14	Guetta & Amatto 2003 Bednarek 2003 Bednarek & Protheroe 1997 Bednarek 2003 Amato et al. 2003
<b>Shell SNRs</b> SNR RX J1713.7 Sgr A East	6 8	<~ 10 <sup>4</sup> <~ 10 <sup>5</sup>	~ 40 ~ 140	Alvarez-Muñiz & Halzen 2002
Pulsars + Clouds Galactic Centre Cygnus OB2	8 1.7	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>7</sup> >~ 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup> - 10 <sup>7</sup> <~ 10 <sup>6</sup>	~ 2 - 30 a few ~ 0.5 ~4	Bednarek 2002 Torres et al. 2004 Bednarek 2003 Anchordoqui et al. 2003
Binary systems A0535+26	2.6	3 · 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	a few	Anchordoqui et al. 2003
Microquasars	1 - 10	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>	1 - 300	Distefano et al. 2002
Magnetars	3 - 16	<~ 10 <sup>5</sup>	1.7 (0.1/ΔΩ) (5/d²)	Zhang et al. 2003

### Et puis?

#### Les sources cachées

Cocooned black hole: VB, Ginzburg 1981, Stecker AGN model: Stecker et al 1991, Collapsing galactic nuclei: VB, Dokuchaev 2001, Hidden jets: Razzaque, Smirnov 2010

#### Et celles qu'on n'imagine pas...

Telescope	User	date	Intended Use	Actual use
Optical	Galileo	1608	Navigation	<b>Moons of Jupiter</b>
Optical	Hubble	1929	Nebulae	Expanding Universe
Radio	Jansky	1932	Noise	Radio galaxies
Micro-wave	Penzias, Wilson	1965	Radio-galaxies, noise	3K cosmic background
X-ray	Giacconi	1965	Sun, moon	neutron stars accreting binaries
Radio	Hewish, Bell	1967	Ionosphere	Pulsars
γ-rays	military	1960?	Thermonuclear explosions	Gamma ray bursts

### Cadre scientifique des télescopes à neutrinos





Sciences environnementales: océanographie, biologie, géologie...

### Recherche de matière noire

Annihilations de particules supersymétriques dans les corps denses

 $\Gamma_{\rm ann} = \frac{\sigma_{\rm ann} v \rho^2}{m^2}$ 

$$\label{eq:sigma_ann} \begin{split} \Gamma_{\text{ann}} &: \text{annihilation rate per unit of volume} \\ \sigma_{\text{ann}} &: \text{neutralino-neutralino cross-section} \\ v &: \text{relative speed of the annihilating particles} \\ \rho &: \text{neutralino mass density} \\ m &: \text{neutralino mass} \end{split}$$



 $\chi \chi \rightarrow WW, ff$ 

 $W, f \rightarrow \vee X$ 

# Perspective pour la matière noire

• Current limits do not constrain the WMAP favored models (0.094 <  $\Omega\chi$  h<sup>2</sup>< 0.129)



Exclusion capabilities : mainly Focus Point region (good complementarity to LHC)

•Other models (e.g. mUED) have better prospects (direct LKP annihilation into neutrinos)

### Spin-dependent scenarios

Very competitive sensitivity compared to direct detection experiments in the case of spin-dependant neutralino interaction



### Plan de l'exposé

#### Astronomie neutrino

**Rappels historiques** Motivations scientifiques Sources de neutrinos

#### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres Principes de détection Les télescopes actuels Le télescope ANTARES

#### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

### Le projet KM3NeT











### Neutrinos solaires



Voir en particulier les cours de S. Pascoli et Th. Lasserre

### Detection des neutrinos solaires

#### 2 types de méthodes:

Expériences radio-chimiques

ν<sub>e</sub> + (A,Z) → e<sup>-</sup> + (A,Z+1)\*

• On compte le nombre d'atomes fils Le taux de production est  $R = N \int \Phi(E) \sigma(E) dE$ 

Nombre d'atomes cible ~

~10<sup>-45</sup> cm<sup>2</sup>

☞~ 10<sup>30</sup> atomes nécessaires pour 1 v /jour
⇒ cible : tonnes

1 SNU = 10<sup>-36</sup> capture atom<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup>

Pas d'information temps, E, direction des  $\nu$ 

#### Expériences temps réél

$$v_{x} + e^{-} -> v_{x} + e^{-}$$



- L'électron diffusé est détecté par la lumière Tcherenkov émise.
- Diffusion avant: E estimable.
- E<sub>seuil</sub> ⇒ neutrinos du B seulement
   ⇒ cible : kilo tonnes

Expérience temps-réel

#### Kamiokande 1985-1996 SuperKamiokande 1996 -2700m we



## Détection par SuperKamiokande



- In 1500 days, SuperK detected 22000 events while 48000 were predicted.
- •This is the so-called *deficit* of solar neutrinos
- Already seen with Homestake and Gallex/Sage experiments.



### SN 1987A : les neutrinos extraterrestres existent!





Neutrinos from SN1987A 25 events in 12 s

Cours de S. Hannestad et C. Volpe

# Neutrinos extraterrestres: Nobel 2002

« These neutrino observations are so exciting and significant that I think we're about to see the birth of an entirely new branch of astronomy: neutrino astronomy.»



#### The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"far pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of casmic Xray sources"

J Bahcall New York Times (3 Apr 1987)

> Présence de neutrinos à plus haute E > GeV?

Galactique Extragalactique



🕘 1/4 of the prize

University of

Pennsylvania

Philadelphia, PA,

Jr.

USA.

USA.

b. 1914

Masatoshi Koshiba

Japan

University of Tokyo Tokya, Japan i





🕙 1/4 of the prize i

b. 1926



Riccardo Giacconi

 $\bigcirc$  1/2 of the prize LISA.

Associated Universities Inc. Washington, DC, USA. b. 1931 (in Genoa, Italy)

### Du MeV au PeV : la longue marche



### Plan de l'exposé

#### Astronomie neutrino

Rappels historiques Motivations scientifiques Sources de neutrinos

#### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres *Principes de détection* Les télescopes actuels Le télescope ANTARES

#### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

### Le projet KM3NeT











## Effet Tcherenkov

• A charged particle traversing though an insulator (dielectric) medium, e.g. water or glass, with a velocity *v* greater than the velocity of light in this medium (v > c/n), emits photons in a cone of aperture  $2\theta_c$ , where  $\theta_c$  depends on the speed  $\beta$  of the particle :

$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

The threshold velocity under which no coherent effect is detectable is :

$$v_s = \frac{1}{n};$$
  $\gamma_s = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}$ 



The number of Cherenkov photons emitted along the charged particle trajectory, though not large, can be easily detected with photomultipliers.

The number of Cherenkov photons emitted in the range 400 – 700 nm, to which photomultipliers are sensitive, is:

$$N_C \approx 5 \cdot 10^4 \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \approx 5 \cdot 10^4 \sin^2 \theta_c \left( photons \ m^{-1} \right)$$

# Photomultiplicateurs

### Conversion d'un signal lumineux en signal électrique : effet photoélectrique + amplification

Photon incident on the photocathode produces a photoelectron via the photoelectric effect. Probability to produce a photoelectron is called the quantum efficiency of the PMT.

Output signal is seen as a current delivered to the *anode*. Typical *gains* are 10<sup>6</sup> yielding pC-scale currents



A series of plates called *dynodes* are held at high voltage by the *base* such that electrons are accelerated from one dynode to the next. At each stage the number of electrons increases. Probability to get first electron from the photocathode to the first dynode is called the *collection efficiency*.



100 ns transit time, 2.2 ns time resolution



wavelength of Cherenkov photons in water



Idée de Markov (1960) :

Détecter les muons issus de  $v_{\mu} + N \longrightarrow \mu + X$ 

Tirer avantage du parcours  $R_{\!\mu}^{}$  du muon

#### ON HIGH ENERGY NEUTRINO PHYSICS IN COSMIC RAYS

M. A. MARKOV and I. M. ZHELEZNYKH P. N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences, Moscow, USSR

Received 3 January 1961

Abstract: The paper is concerned with the problems of detecting high-energy cosmic neutrinos in underground experiments. Various kindred problems of high-energy neutrino physics are discussed, viz. (1) the magnitude of weak-interaction cut-off momentum; (2) muon and electron neutrinos and (3) intermediate boson. It is shown that a reasonable counting rate could be obtained with available equipment.



- Volume effectif de détection augmente avec E<sub>v</sub>
- La déviation entre le v et le  $\mu$  diminue avec  $E_v$
- Section efficace d'interaction augmente avec E<sub>v</sub>

La détection des neutrinos muoniques de HE est favorisée



### Taux de détection

The number of muon events in units of detection area A and observation time T is:

$$\frac{N_{\mu}(E_{\mu,\min},\vartheta)}{AT} = \int_{E_{\mu,\min}}^{E_{\nu}} dE_{\nu} \Phi_{\nu}(E_{\nu},\vartheta) P_{\nu\mu}(E_{\nu},E_{\mu,\min}) e^{-\sigma_{tot}(E_{\nu})N_{A}Z(\vartheta)}$$
 3. Absorption dans la Terre

- Neutrino flux spectrum
- Probability to produce a detectable (E<sub>µ</sub>>E<sub>min</sub>) muon
- Earth transparency to HE neutrinos → >PeV neutrinos search for "horizontal" tracks





$$\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle \approx \alpha(E) + \beta(E)E$$

 $\alpha \approx 2, 2 \text{ MeV.g}^{-1}.\text{cm}^2$  $\beta \approx 4 \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}.\text{cm}^2$ 

#### **EXERCICES:**

1.Compute the path length of muon of energy E before if reaches the energy  $E_{min}$  based on the approximate d values of  $\alpha$  and  $\beta$ .

$$R_{\mu}(E_{\mu}, E_{\min}) = \int_{E_{\min}}^{E_{\mu}} \frac{1}{\langle \frac{dE}{dX} \rangle} dE \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{(\alpha/\beta) + E_{\mu}}{(\alpha/\beta) + E_{\min}}$$

2.AN: What is the total range of a 10 TeV muon in the rock ( $\rho_r$ =2.65 g. cm<sup>-3</sup>), in sea water ( $\rho_r$ =1.02 g. cm<sup>-3</sup>) ?



## Section efficace d'interaction



➔ On ne considère que l'interaction profondément inélastique

## Diffusion profondément inélastique



 $Q^2 = -q^2$  carré de l'impulsion de transfert Bjorken scaling  $x = Q^2/2Mv$ : fraction d'impulsion emportée par le quark  $v = E_v - E'$  perte d'énergie leptonique Inélasticité (Bjorken) y = v/E: fraction d'énergie du lepton perdue (dans le laboratoire)



→ Permet la recherche de sources « ponctuelles »

## Diffusion sur cible iso-scalaire

Diffusion sur cible isoscalaire (même nombre de protons et de neutrons):

$$\frac{d\sigma_{CC}(v_{\mu}N)}{dxdy} = \frac{G_F^2 s}{2\pi} x \left\{ \overline{q}(x)(1-y)^2 + q(x) \right\} = \frac{G_F^2 M E}{\pi} x \left\{ \overline{q}(x)(1-y)^2 + q(x) \right\}$$
$$\frac{d\sigma_{CC}(\overline{v_{\mu}}N)}{dxdy} = \frac{G_F^2 s}{2\pi} x \left\{ q(x)(1-y)^2 + \overline{q}(x) \right\} = \frac{G_F^2 M E}{\pi} x \left\{ q(x)(1-y)^2 + \overline{q}(x) \right\}$$



## Neutrino nucleon scattering

### Perkins, Introduction to High Energy Physics

"Perhaps the most dramatic demonstration of the constituent nature of hadrons is provided by the total cross section, as a function of energy, for neutrino-nucleon scattering [...] the result is simplean almost linear rise of  $\sigma$  with the neutrino energy<sup>\*</sup>. This is exactly the result we expect if we replace the complicated process of hadron production by the **elastic** scattering of the neutrino by a **single point like particle**, which can depend only on the FERMI coupling constant G and the phase space.

#### $\sigma \sim G^2 E$

\*[...] In this discussion we have neglected any possible spread of the weak interaction due to the effects of a propagator term associated with the W boson, which would multiply the cross-section by  $(q^2+M^2)^{-2}$ .

Indeed the linearit of the cross-section with energy up to 200 GeV can be used to set a lower limit  $M_w$  >30 GeV"



At high energy : extrapolation

### Taux de détection

The number of muon events in units of detection area A and observation time T is:

$$\frac{N_{\mu}\left(E_{\mu,min},\vartheta\right)}{AT} = \int_{E_{\mu,min}}^{E_{\nu}} dE_{\nu} \Phi_{\nu}\left(E_{\nu},\vartheta\right) P_{\nu\mu}\left(E_{\nu},E_{\mu,min}\right) e^{-\sigma_{tot}\left(E_{\nu}\right)N_{A}Z(\vartheta)}$$

- Neutrino flux spectrum
- Probability to produce a detectable (E<sub>µ</sub>>E<sub>min</sub>) muon
- Earth transparency to HE neutrinos → >PeV neutrinos search for "horizontal" tracks


# Absorption dans la Terre



### Absorption dans la Terre



FIG. 1.17: Effet moyen de l'absorption de neutrinos d'énergie de 1, 10 et 100 TeV en fonction de leur angle zénithal.



FIG. 1.18: Absorption moyennée pour les neutrinos montants (en noir) et pour les deux hémisphères (en rouge) en fonction de l'énergie.

### Finalement...

The number of muon events in units of detection area A and observation time T is:

$$\frac{N_{\mu}(E_{\mu,\min},\vartheta)}{AT} = \int_{E_{\mu,\min}}^{E_{\nu}} dE_{\nu} \Phi_{\nu}(E_{\nu},\vartheta) P_{\nu\mu}(E_{\nu},E_{\mu,\min}) e^{-\sigma_{tot}(E_{\nu})N_{A}Z(\vartheta)}$$

Ou encore plus communément en introduisant la surface effective Aeff

$$\frac{N_{\mu}}{T} = \int dE \cdot \frac{d\Phi_{\nu}}{dE_{\nu}} \cdot A_{eff}(E_{\nu}) \qquad A^{eff}(\theta, E_{\nu}) = \frac{N_{rec}}{N_{gen}} \times V_{gen} \times (\rho N_A) \times \sigma(E_{\nu}) \times e^{-\sigma(E_{\nu})\rho N_A z(\theta)}$$

#### **Neutrino Effective Area**



# En résumé...

# Bruit de fond physique



Muons atmosphériques : seulement descendants Blinder le détecteur & définir le signal comme montant

### Séparation des v atmosphériques et cosmiques



#### Confirmation par d'autres messagers

Trogramme multi-messagers : alertes GRB, suivi optique, coïncidences GW, ...



# Les gerbes sont vues par IceCube

14 événements IceCube de type « cascade » passent les coupures (7 attendus)  $\Rightarrow v_e$  (atmosphériques?) de UHE ?





### Neutrinos de ultra haute énergie

- Ces limites + coupure GZK défavorisent les modèles « Top-Down »
  RC UHE issus de la désintégration de particules supermassives
- Défavorisé également par la fraction de photons UHE (Auger)
- Contraintes aussi par le flux diffus de photons GeV (Egret, Fermi)
- Neutrinos de plus hautes énergies
  Détection radio (effet Askaryan)
  canal prometteur pour l'avenir
- Détection acoustique?



AUGER arXiv:0906.2347



# Ex de R&D pour la détection acoustique

### AMADEUS : un sous-ensemble du télescope ANTARES

(ou SPATS au pôle sud...)

📖 NIM A 626-627 (2011) 128-143

Reconstruction de la direction par triangulation Tout type de signal transitoire: animaux, bateaux... a Spezia en-Provence 90° 90° -900 30 20° -120 -30 ANTARES -60° -90

## Plan de l'exposé

#### Astronomie neutrino

Rappels historiques Motivations scientifiques Sources de neutrinos

#### Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres Principes de détection *Les télescopes actuels* Le télescope ANTARES

#### Sélection choisie de quelques études

Etalonnage Flux diffus Recherche de sources ponctuelles Analyses multi-messagers

### Le projet KM3NeT







