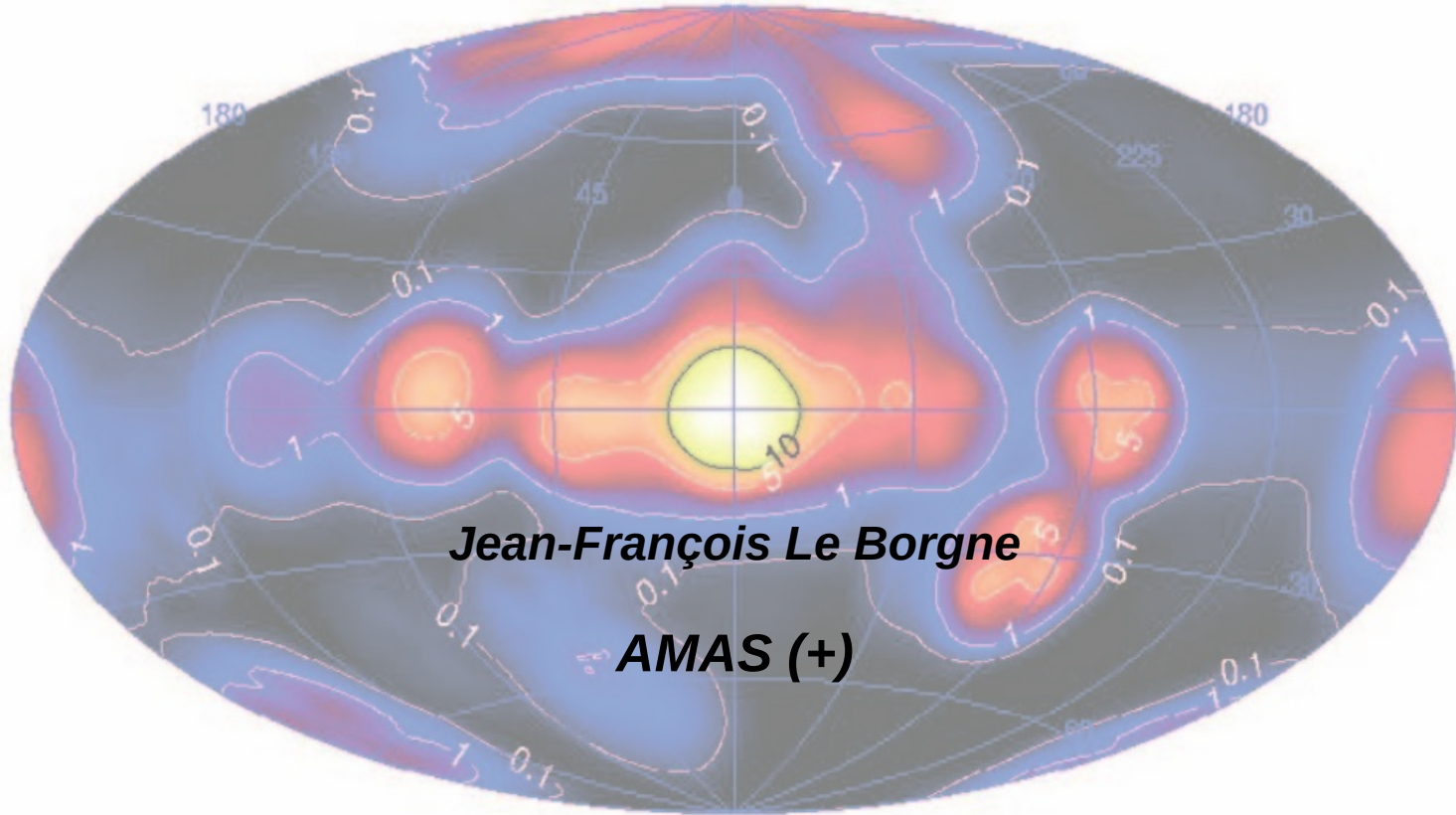


Astrophysique nucléaire

De l'antimatière dans le centre galactique



(+)

Astronome/professeur émérite, IRAP, observatoire de Toulouse (OMP)

Chercheur associé, Laboratoire d'astrophysique de Marseille

Président du GEOS

La physique nucléaire en astrophysique : hautes énergies

La **physique nucléaire** concerne les noyau atomiques, les nucléons (protons, neutrons) et les particules élémentaires : leptons (électrons, muons, taus, neutrinos), quarks et bosons.

Intérieur des étoiles:

- réactions thermonucléaires produisent l'énergie qui maintient les étoiles en équilibre et leur permet de rayonner.
- nucléosynthèse pour fabriquer les éléments lourds.

Explosions des supernovæ:

- nucléosynthèse des éléments les plus lourds dont les isotopes se retrouvent expulsés dans le milieu interstellaire.

Milieu interstellaire: le **rayonnement cosmique**

Matière / antimatière

Chaque particule de matière (nucléons et particules élémentaires) a son antiparticule :
proton \rightarrow antiproton, électron \rightarrow anti-électron ...

Même masse, charge électrique opposée, spin opposé.
Dans le cas de l'électron, on a l'habitude d'appeler son antiparticule « positron ».

Une propriété importante : matière et antimatière ne peuvent se supporter, leur rencontre est explosive : **annihilation** avec émission de photons.

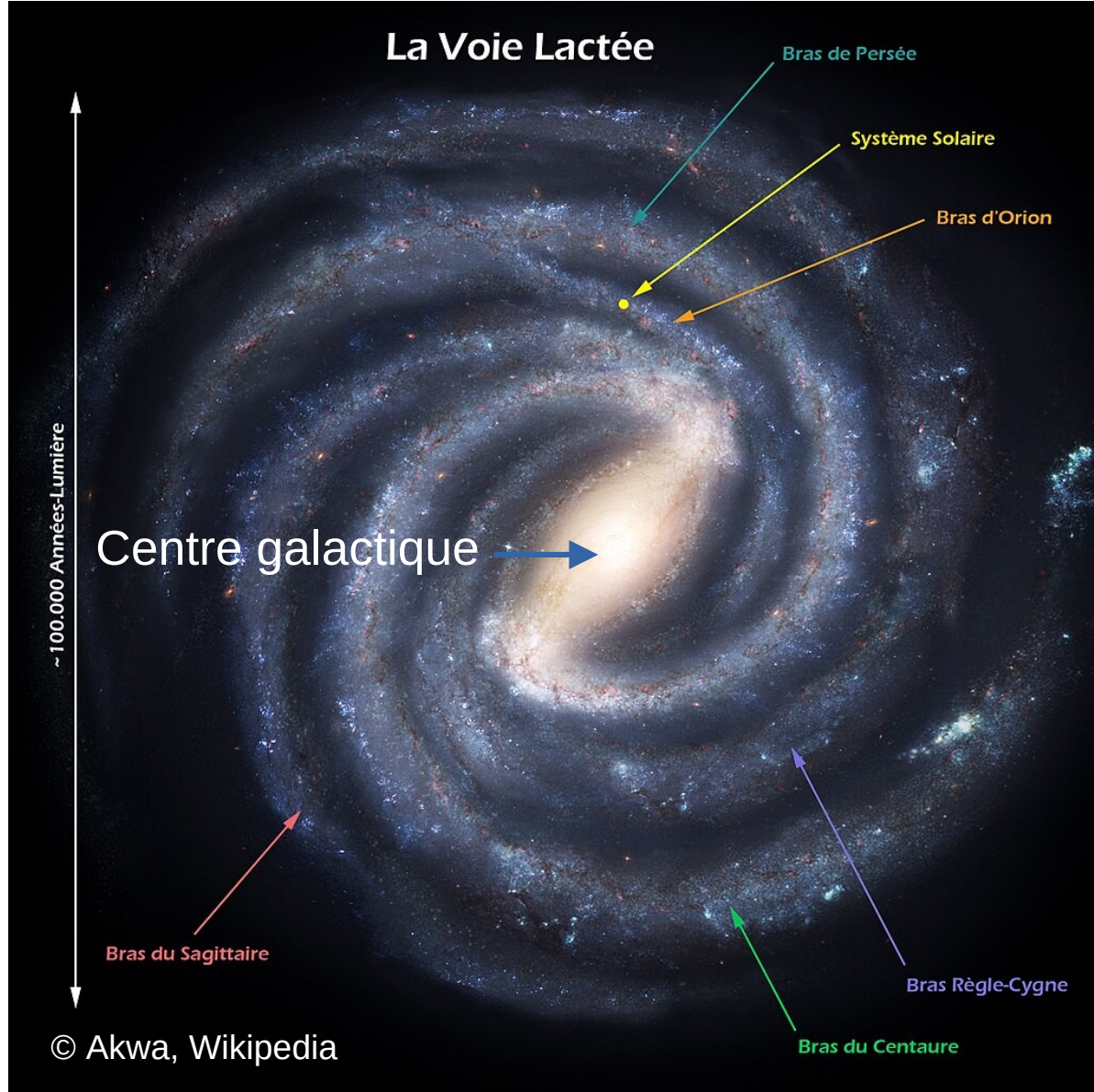
Pourquoi l'univers est-il composé presque exclusivement de matière ? C'est une bonne question ...

Il y a toutefois quelques antiparticules qui trainent dans la Galaxie, créés par la décroissance radioactive des isotopes fabriqués dans les étoiles, les SN et par divers phénomènes très énergétiques.

Géographie de la Galaxie

Plantons le décor !

Tout se passe là dedans :

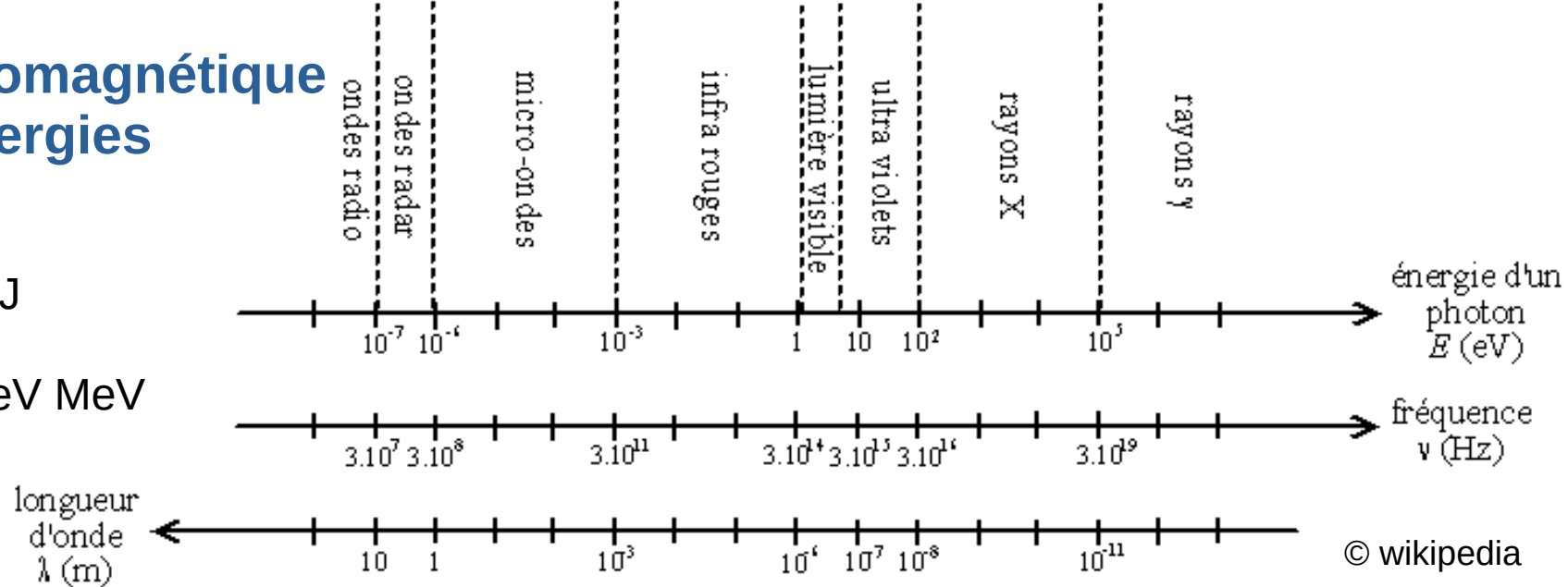


Spectre électromagnétique des hautes énergies

Electron-Volt

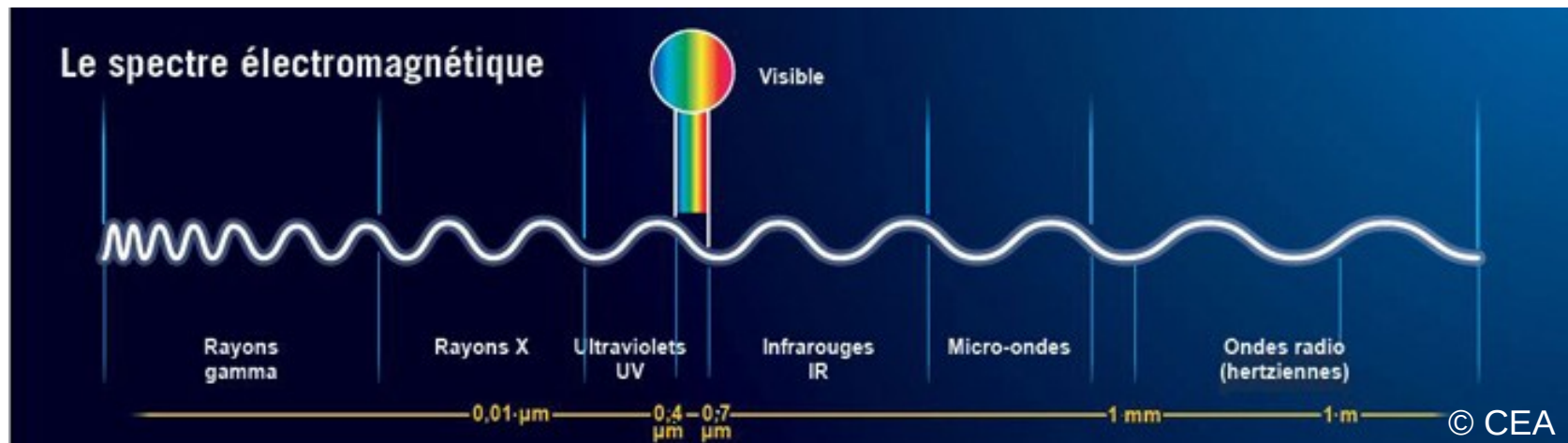
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Unités utilisées : keV MeV



Les rayons X et γ ne passent pas l'atmosphère.

Les particules du rayonnement cosmique pas trop non plus.



Spectrométrie gamma

Scintillation dans un cristal d'iodure de sodium (NaI)

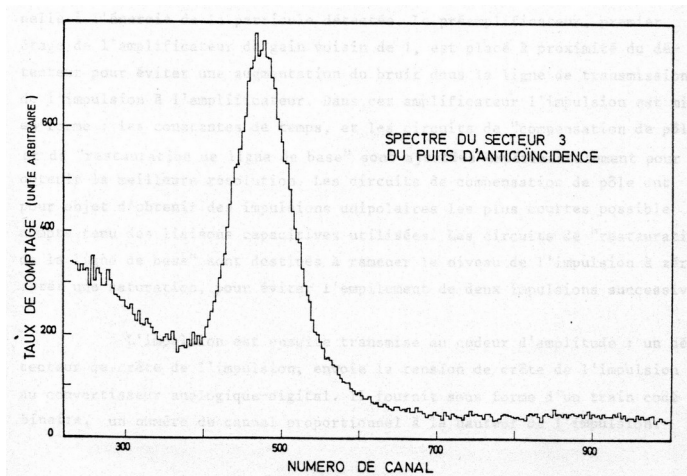
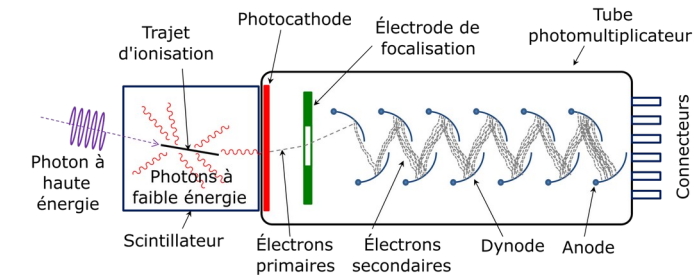
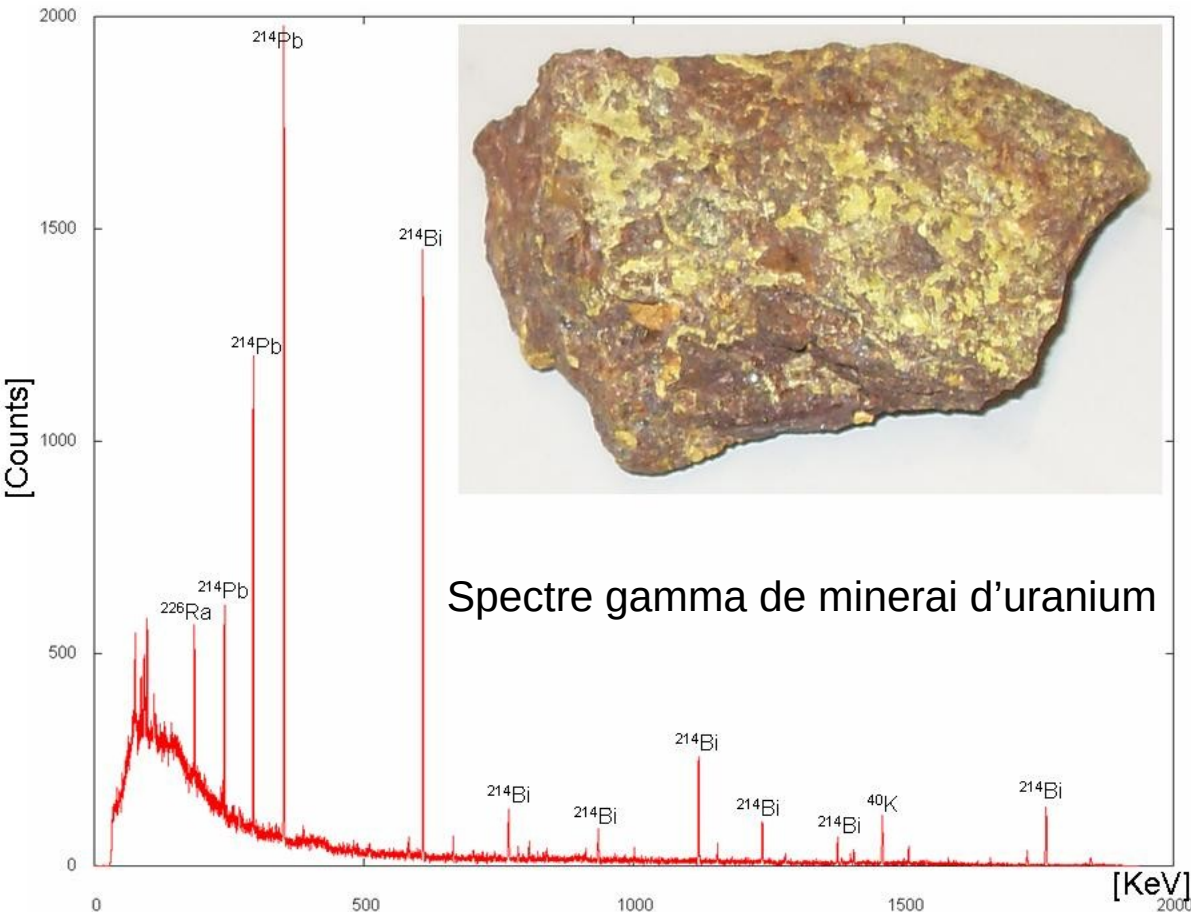


Figure 4. Spectre d'un cristal d'anticoincidence autour de 511 KeV

Diode au germanium (Ge) :
Spectromètre à haute résolution.



Spectre gamma de minerai d'uranium

Exemple de diagramme de décroissance radioactive :

L'isotope de titane ^{44}Ti est un produit de la nucléosynthèse.

Il se transforme en calcium stable ^{44}Ca par l'intermédiaire d'un noyau de scandium ^{44}Sc et l'émission d'un positron et d'un photon γ

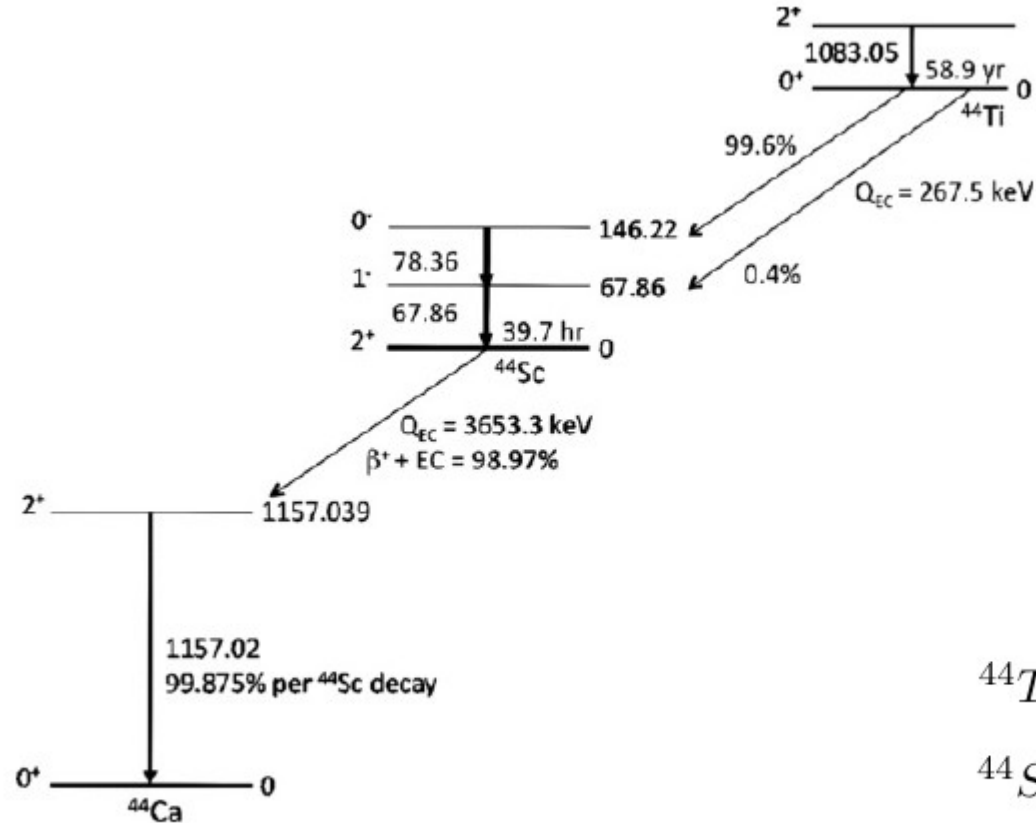


Figure 2.3: Schematic of the relevant decays of ^{44}Ti

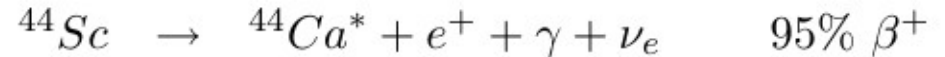


Tableau périodique des éléments

Groupe →		1	2																	18					
Période ↓		IA	IIA																	VIIA					
1		hydrogène 1 H 1,00794	← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) ← numéro atomique ← symbole chimique ← masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]																hélium 2 He 4,002602						
2		lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182																	bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797
3		sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948						
4		potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80						
5		rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29						
6		césium 55 Cs 132,9054519	baryum 56 Ba 137,327	lanthanides 57–71		hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rhénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [208,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]					
7		francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89–103		rutherfordium 104 Rf [263,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnérium 109 Mt [268,1388]	darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	flérovium 114 Fl [289]	ununpentium 115 Uup [288]	livermorium 116 Lv [292]	ununseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]					
				lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praseodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967							
				actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03588	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]							
		métaux alcalins	alcalino-terreux	lanthanides	actinides	métaux de transition	métaux pauvres	métalloïdes	non-métaux	halogènes	gaz nobles	primordial		désintégration d'autres éléments		synthétique									

Expérience CESAR

Spectromètre gamma à haute résolution

Collaboration du Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements (CESR, Toulouse)
et du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA, Saclay)

PIs de l'expérience et superviseurs à Toulouse :
François Albernhe et Gilbert Vedrenne (CESR)

***Analyse des données des
campagnes de lancement
de ballons stratosphériques
au Brésil (1976-1977).***

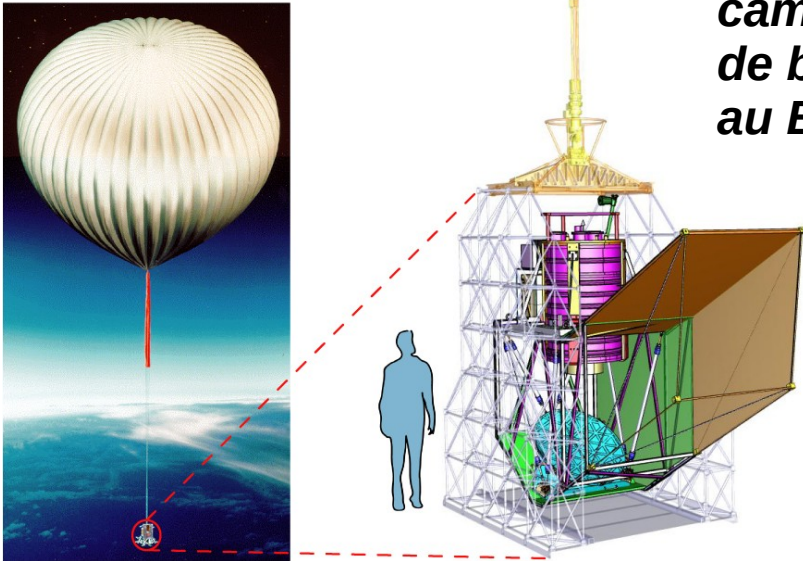


Schéma de la nacelle de
l'expérience ballon PILOT
(CESR). © Wikipedia





Ballons stratosphériques CNES

Expérience CESAR

Spectromètre gamma à haute résolution

Cristal de germanium (Ge) dopé au lithium (Li)
Refroidi à la température de l'azote liquide (-196°C)

Placé dans un système d'anticoïncidence :
4 cristaux de NaI.

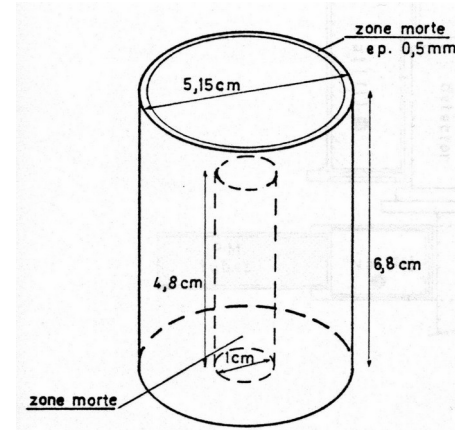
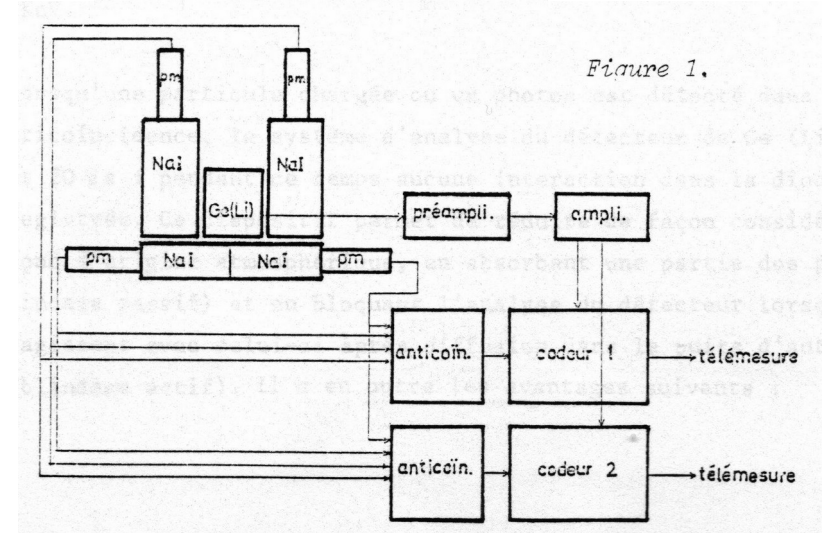


Figure 2. Dimensions de la diode



Expérience CESAR

Spectromètre gamma à haute résolution

Cristal de germanium (Ge) dopé au lithium (Li)
Refroidi à la température de l'azote liquide (-196°C)

Placé dans un système d'anticoïncidence :
4 cristaux de NaI.

Lorsqu'un photon gamma ou une particule chargée est détecté dans un des cristaux de NaI, le système d'analyse du détecteur de Ge est bloqué pendant $20\mu\text{s}$.

Seuls les photons venant de la partie supérieure du détecteur sont analysés.

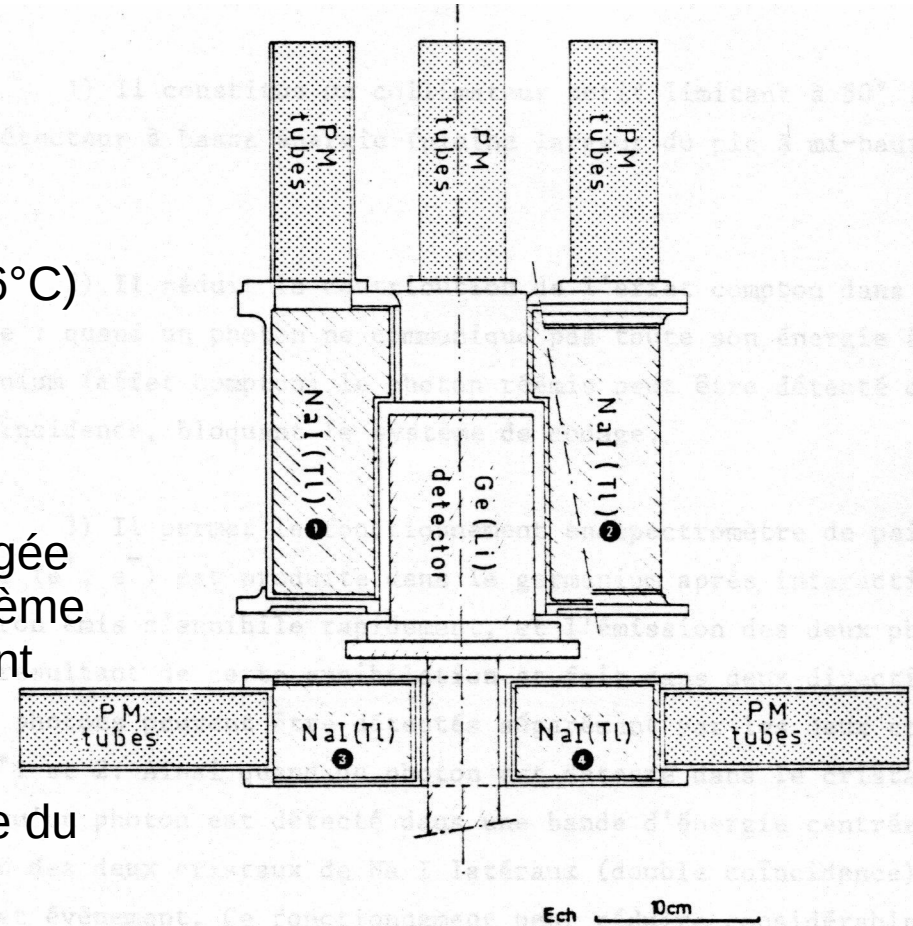


Figure 3. Schéma du puits d'anticoïncidence

Expérience CESAR

Spectromètre gamma à haute résolution

Efficacité du système d'anticoïncidence.

La largeur à mi-hauteur est d'environ 50° entre 500 keV et 1 MeV

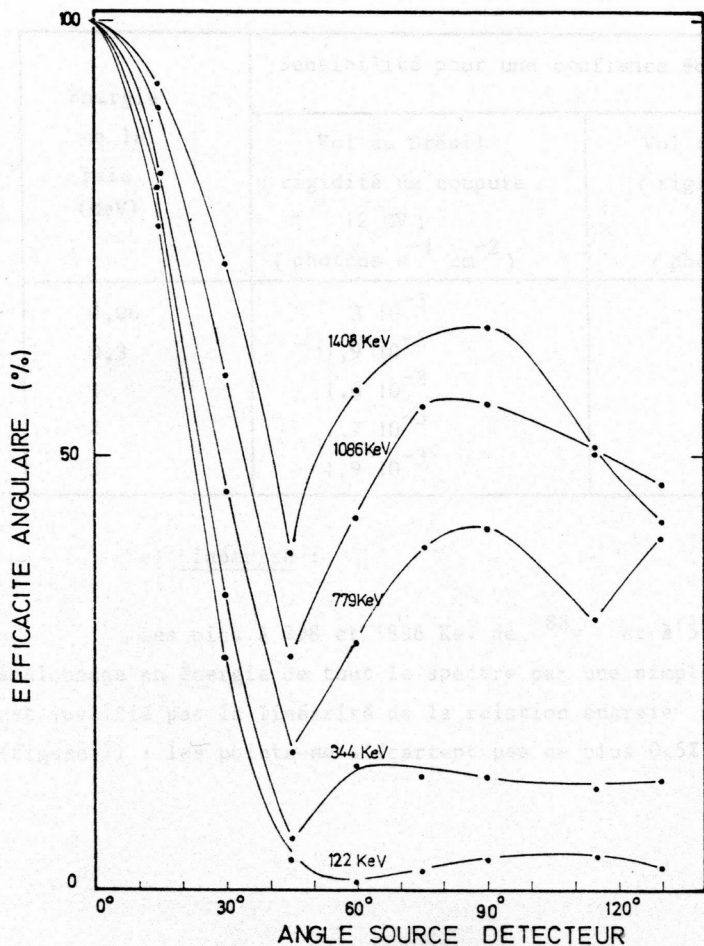


Figure 6.
Efficacité angulaire relative en fonction de l'énergie. L'efficacité est normalisée à un dans l'axe du détecteur

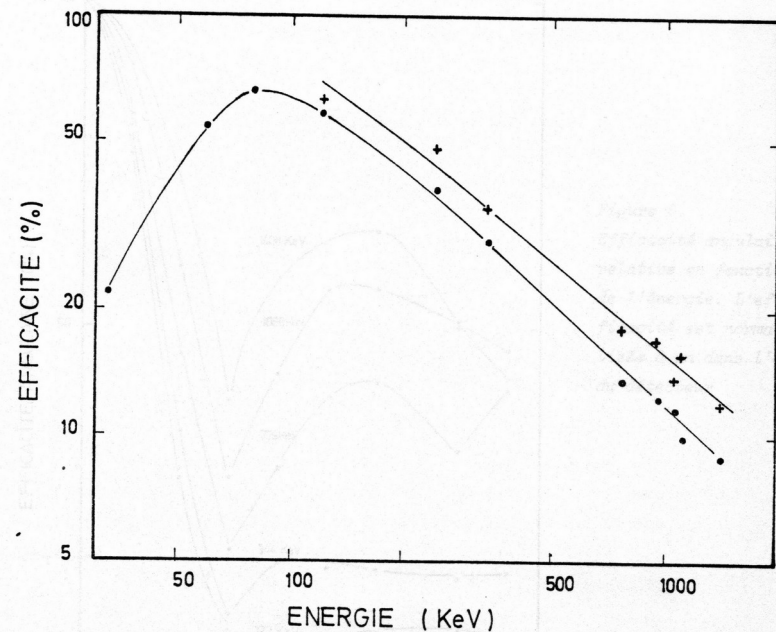
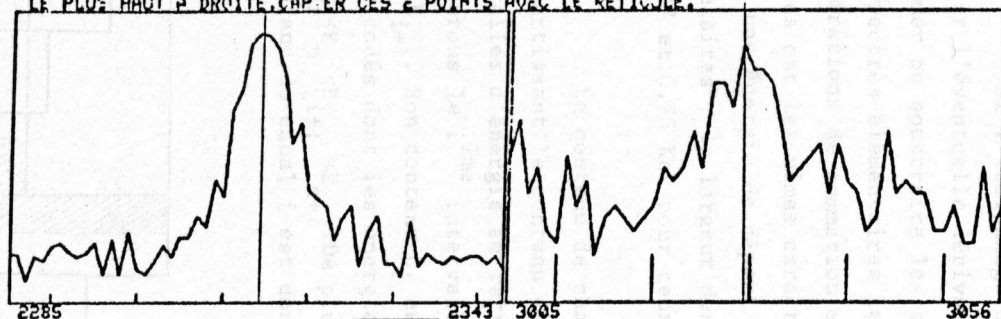
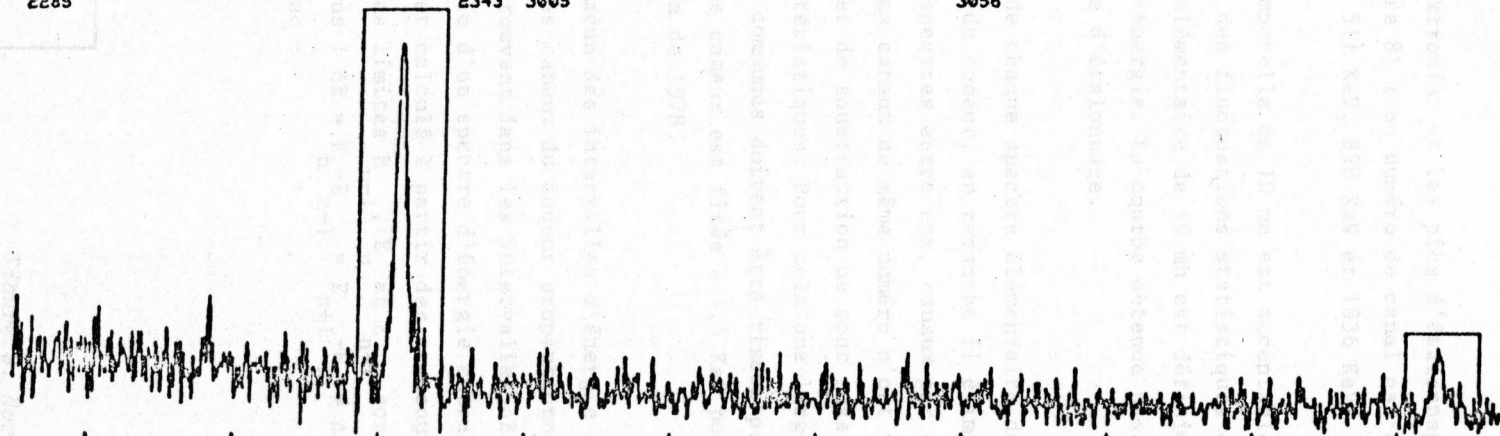


Figure 5. Efficacité de détection à 0° : + diode utilisée en 1976-77
• diode utilisée en 1978

HISTOGRAMME COMMENCANT AU CANAL NO 2048 NO D HISTOGRAMME 1
 J H MN S MS DU DEBUT DE CET HISTOGRAM 7 23
 APRES AVOIR REFERE UN PIC D ETALONNAGE IL FAUDRA AFFICHER SON TYPE 1-PIC DE 511KEV,2-PIC DE 898KEV,3-PIC DE 1836KEV
 POUR CAPTER LE MAX DU PIC AMENER LE RETICULE SUR LE POINT CHOISI PUIS FAIRE R
 LONGUE...DELIMITER LA ZONE CHOISIE PAR SON POINT LE PLUS BAS A CALC-RE ET SON POINT
 LE PLUS HAUT A DROITE, CAPTER CES 2 POINTS AVEC LE RETICULE.



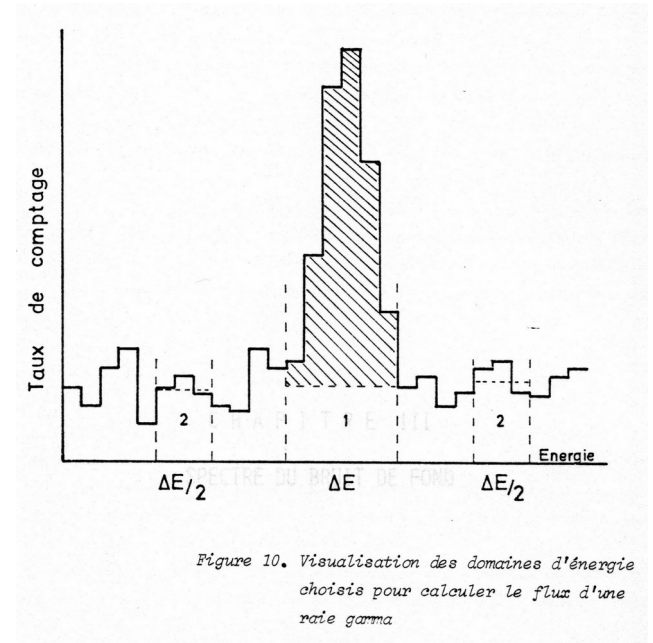
La calibration en énergie se fait à l'aide d'une source embarquée de ^{88}Y (raies à 898 keV et 1836 keV).



SI L ON VEUT AGRANDIR UNE PORTION D IMAGE TAPER 0
 NO CANAL 1703029 TAPER LE TYPE DE PIC 1,2,3,4 2
 SI L ON VEUT AGRANDIR UNE PORTION D IMAGE TAPER 0
 NO CANAL 7802314 TAPER LE TYPE DE PIC 1,2,3,4 1
 SI L ON VEUT AGRANDIR UNE PORTION D IMAGE TAPER 0

OU AFFICHER UNE AUTRE PARTIE D HISTOGRAMME TAPER 2
 VOULEZ VOUS CONSERVER LE POINT1-OUI ET 0-NON 1
 OU AFFICHER UNE AUTRE PARTIE D HISTOGRAMME TAPER 20
 VOULEZ VOUS CONSERVER LE POINT1-OUI ET 0-NON 1
 OU AFFICHER UNE AUTRE PARTIE D HISTOGRAMME TAPER 20

La mesure de l'intensité d'une raie se fait en intégrant le signal dans une bande centrée sur la raie et en lui soustrayant les valeurs du continu de chaque côté.



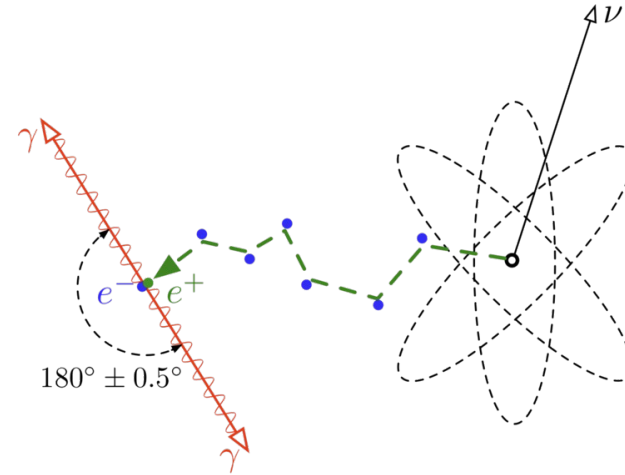
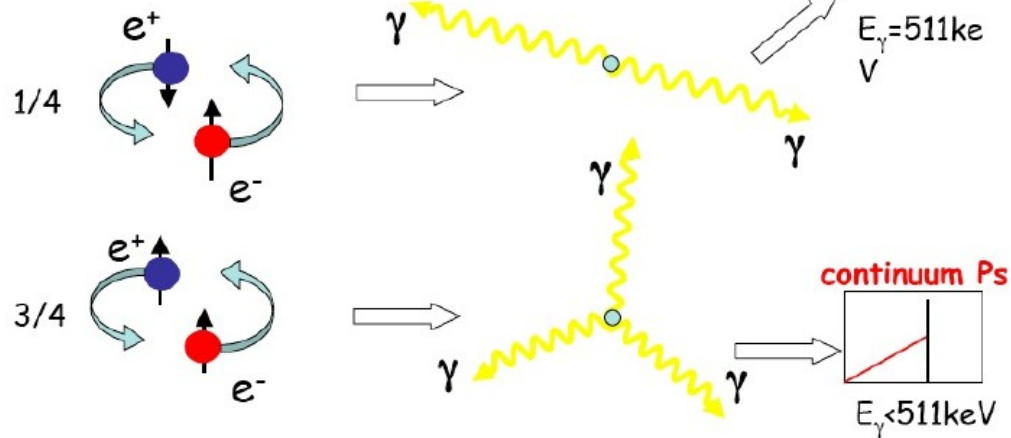
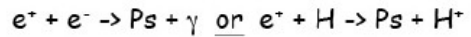
Les positrons sont produits par radioactivité β^+

Production de deux rayons gamma à 511 keV, annihilation électrons-positrons

Annihilation of e^+ in the ISM

- Direct annihilation

- Positronium formation

 e^+ positron

e^- electron

ν neutrino

γ quantum/photon
(511 keV)

© wikipedia

Les positrons sont produits par radioactivité β^+

Production de deux rayons gamma à 511 keV, annihilation électrons-positrons :

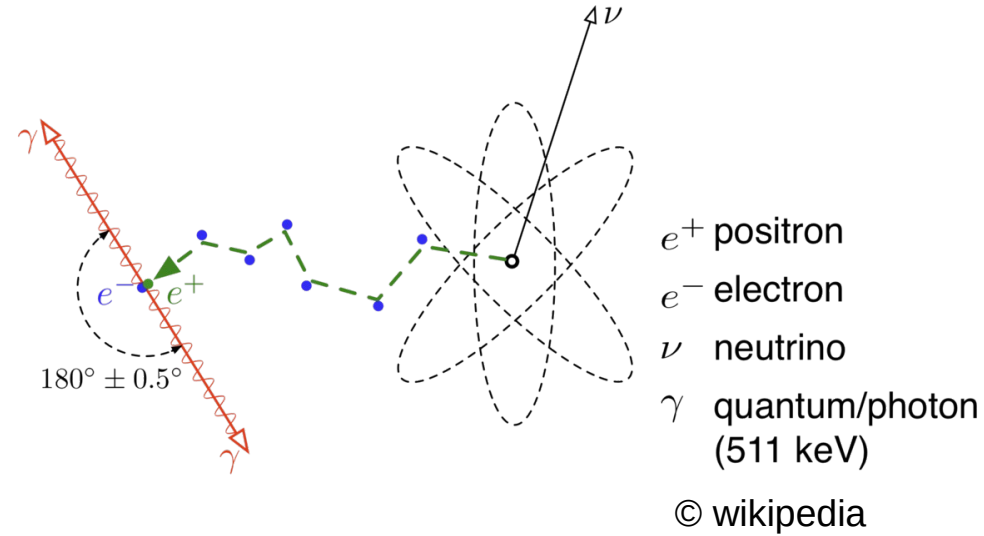
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$E = m c^2 (1+\gamma) (1\pm\beta)/2 \sim 511 \text{ keV } (\beta\sim 0)$$

Décroissance du positronium

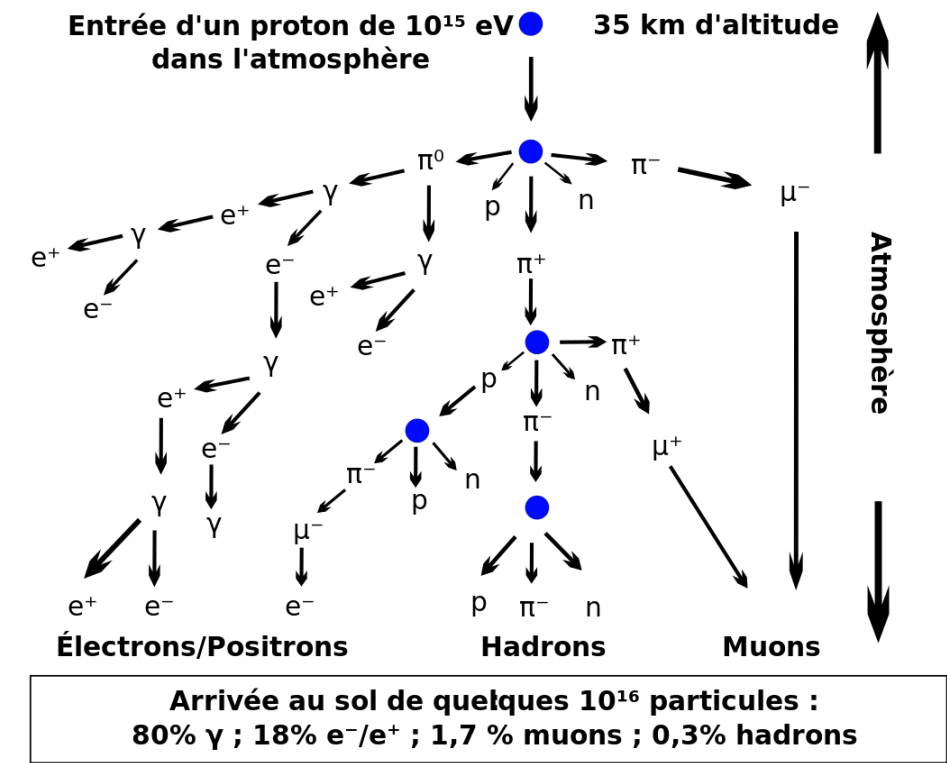
1S_0 : ~25%, $1.25 \times 10^{-10} \text{ s}$, $\rightarrow 2\gamma$

3S_0 : ~75%, $1.5 \times 10^{-7} \text{ s}$, $\rightarrow 3\gamma \rightarrow$ broader line

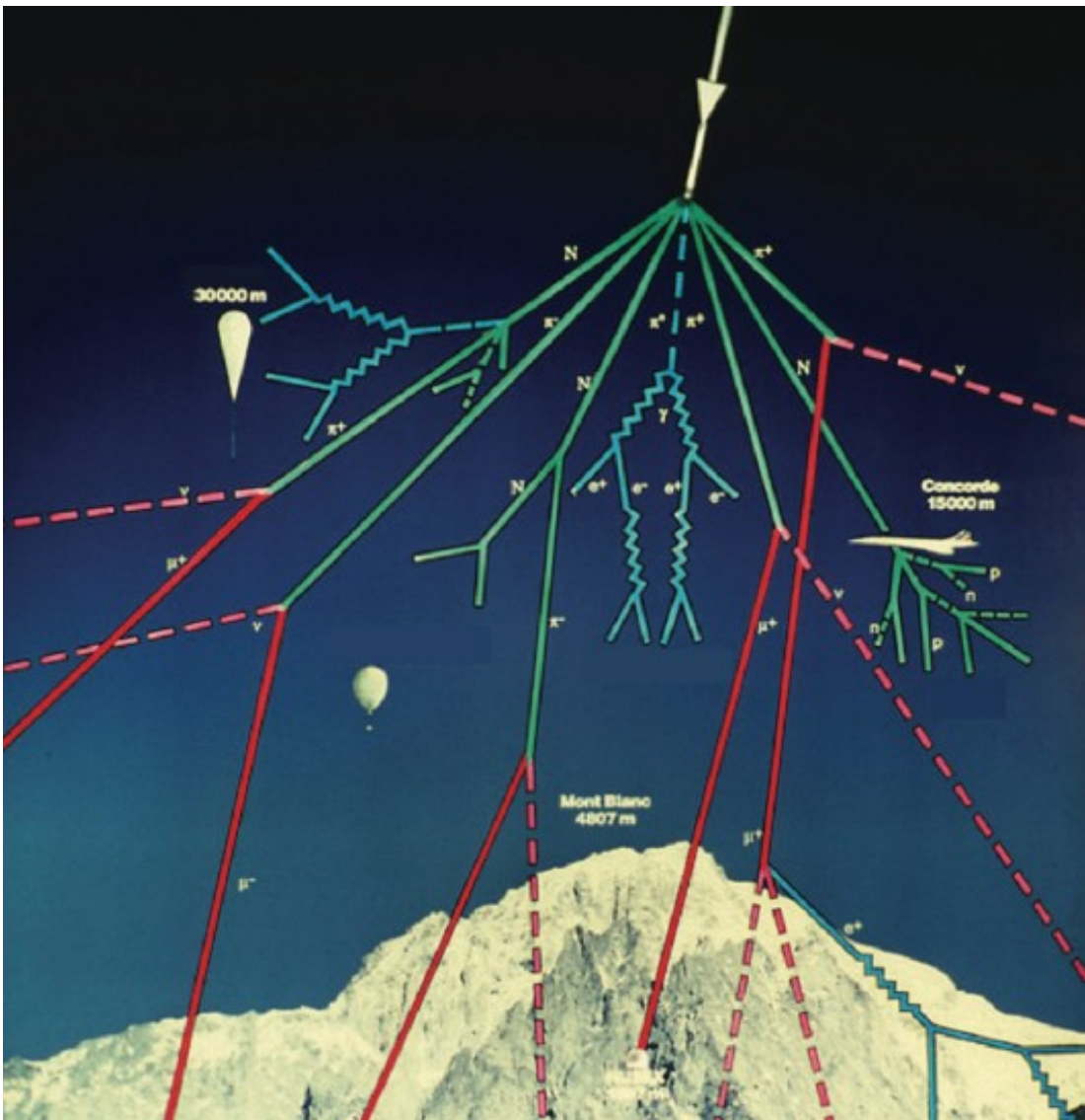


Désintégration d'une particule du rayonnement cosmique dans l'atmosphère

→ Création de positrons e^+



© wikipedia



© CERN

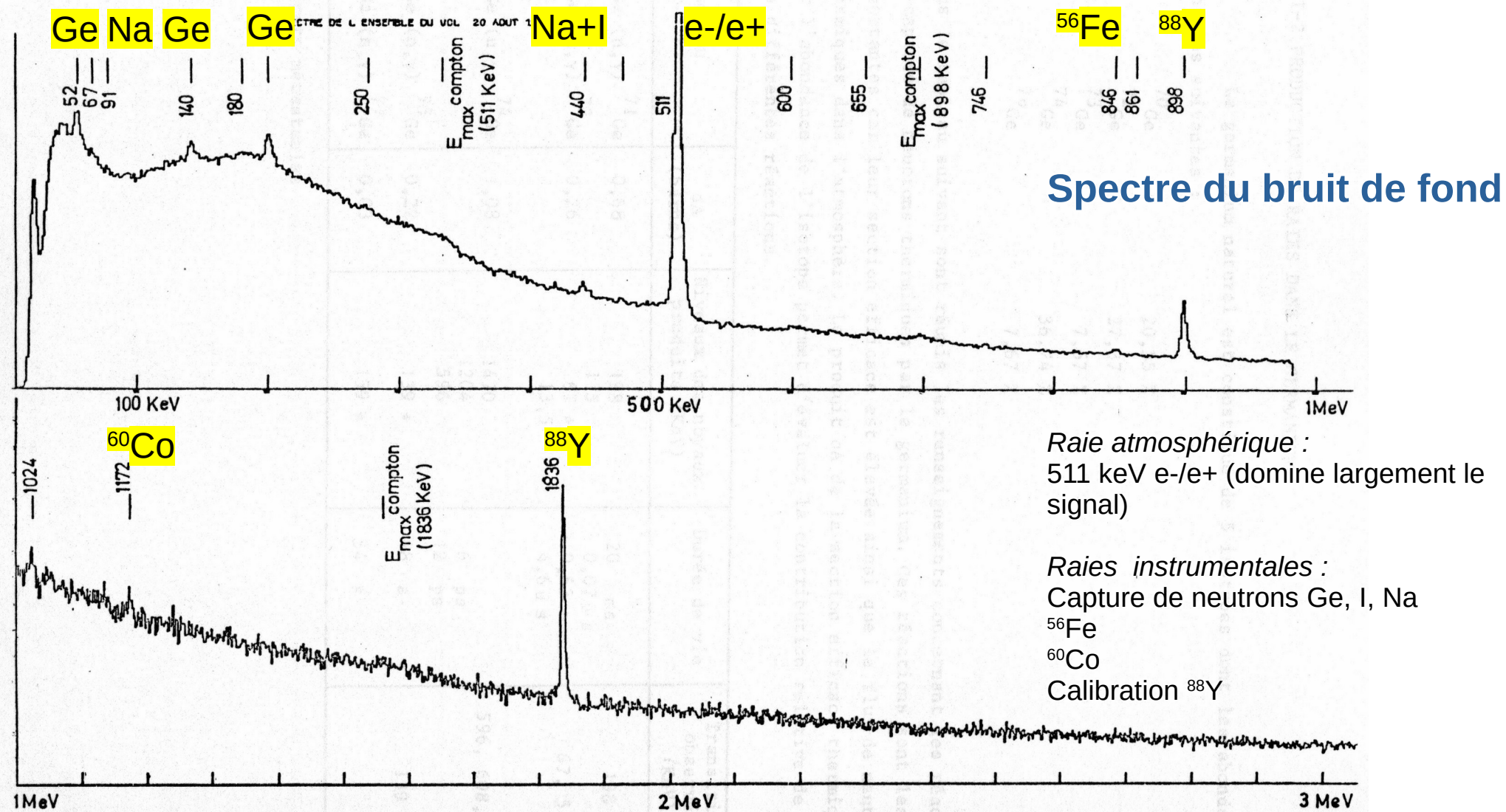


Figure 11. Spectre de bruit de fond - temps d'intégration 22 heures (20 août 1978)

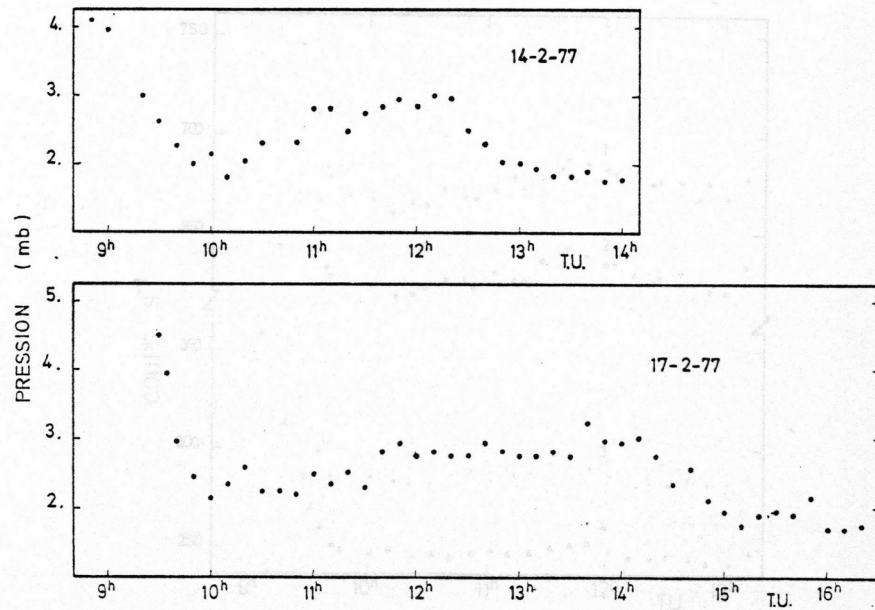


Figure 12. Evolution temporelle de la pression
(14 et 17 février 1977).

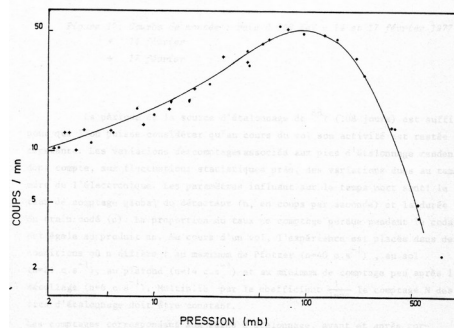


Figure 16. Courbe de montée : raie à 511 KeV - 14 et 17 février 1977

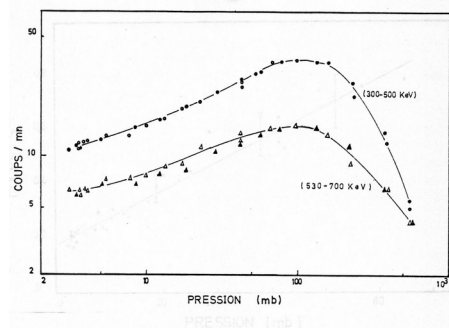


Figure 18. Courbes de montée : taux de comptage associés aux bandes d'énergie
(300-500 KeV) et (530-700 KeV)

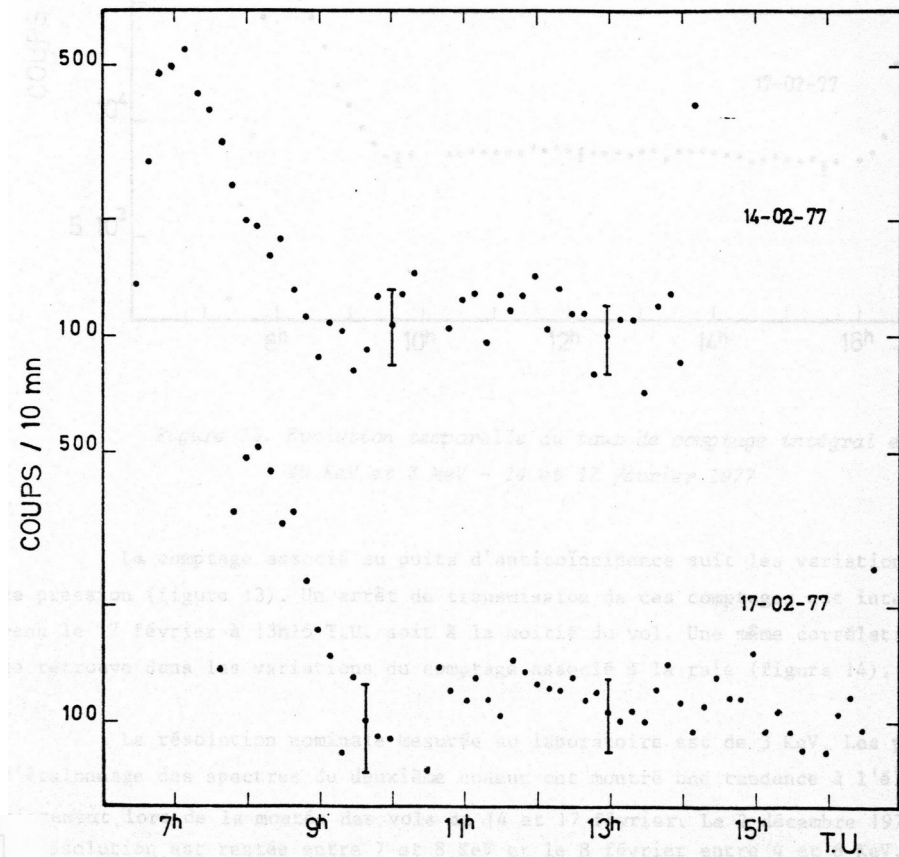


Figure 14. Evolution temporelle de l'intensité de la raie à
511 KeV les 14 et 17 février 1977

Observation du centre galactique

Le détecteur est vertical, le CG passe au zénith

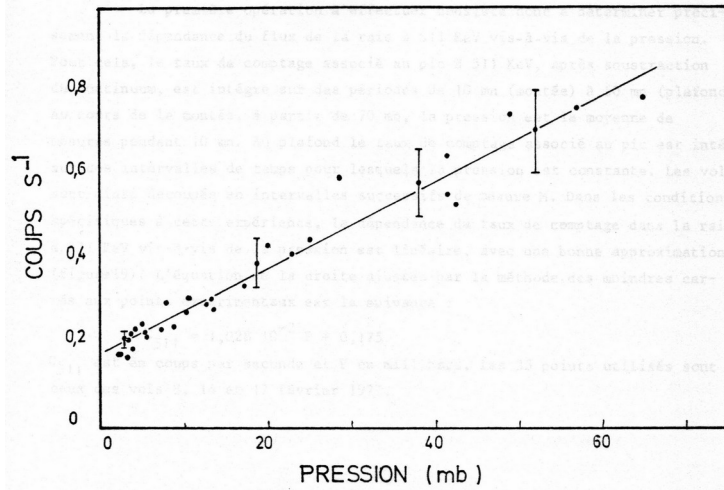


Figure 19. Taux de comptage associé à la raie à 511 KeV (C_{511}) en fonction de la pression entre 70 mb et le plafond (8,14 et 17 février 1977)

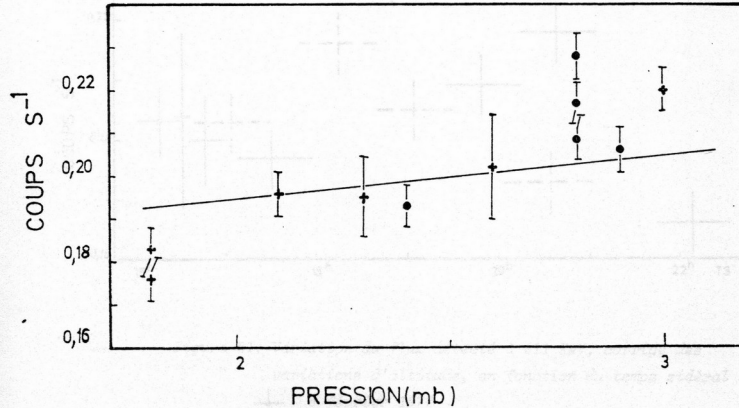


Figure 20. Taux de comptage associé au pic à 511 KeV en fonction de la pression
 • observation du centre galactique
 + bruit de fond

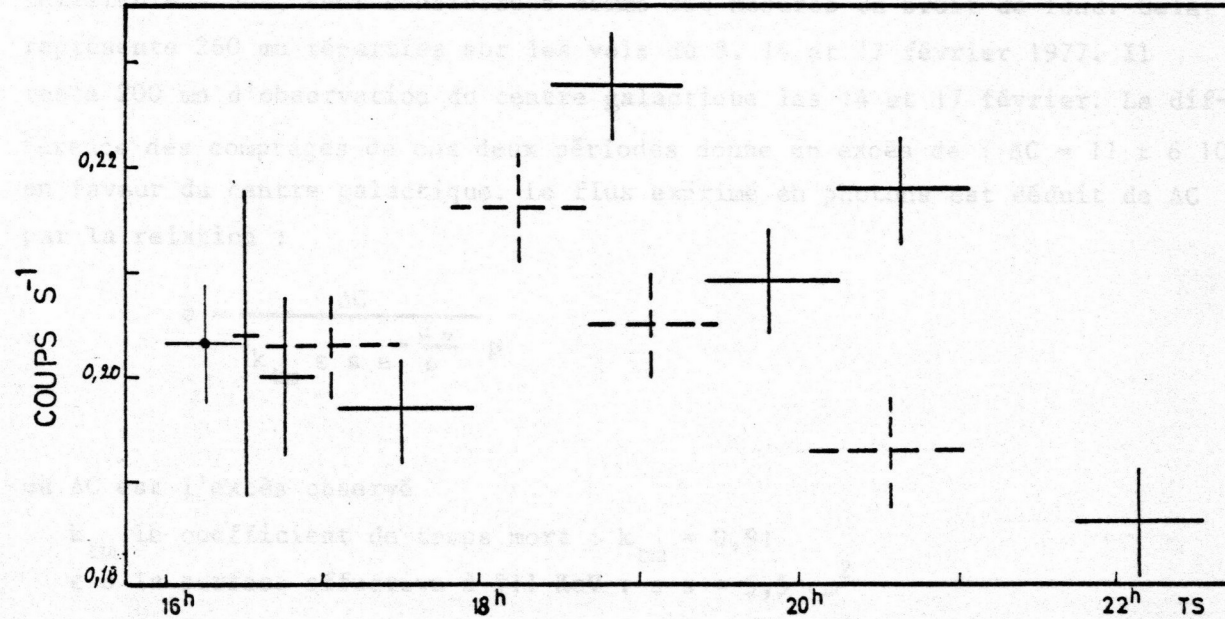
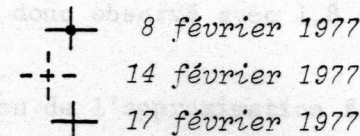


Figure 21. Variation du flux détecté à 511 KeV, corrigé des variations d'altitude, en fonction du temps sidéral



Mesure du flux de la raie à 511 keV

Flux mesuré : $2.9 \pm 1.6 \cdot 10^{-3}$ photons $s^{-1} cm^{-2}$ (1.8σ ! 😞)

Comparaison avec les mesures contemporaines

Première expérience utilisant un détecteur au germanium.

Confirme que l'émission à 511 keV est étendue et non ponctuelle.

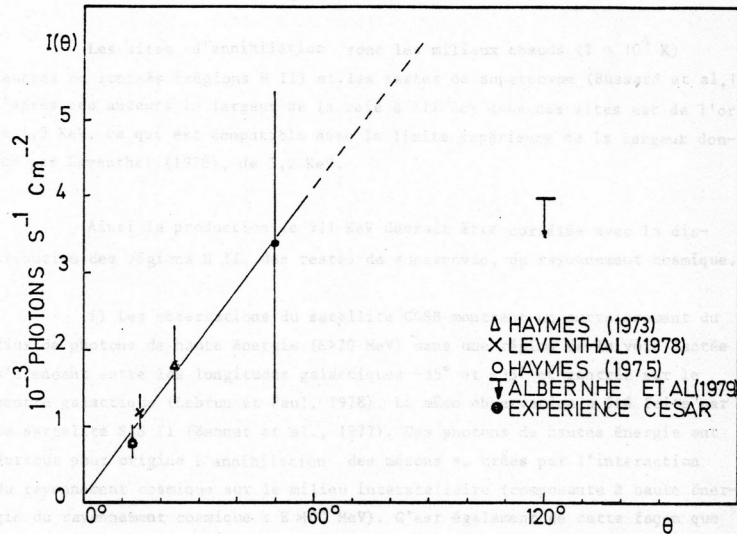


Figure 25. Flux observés à 511 KeV en fonction du champ du détecteur

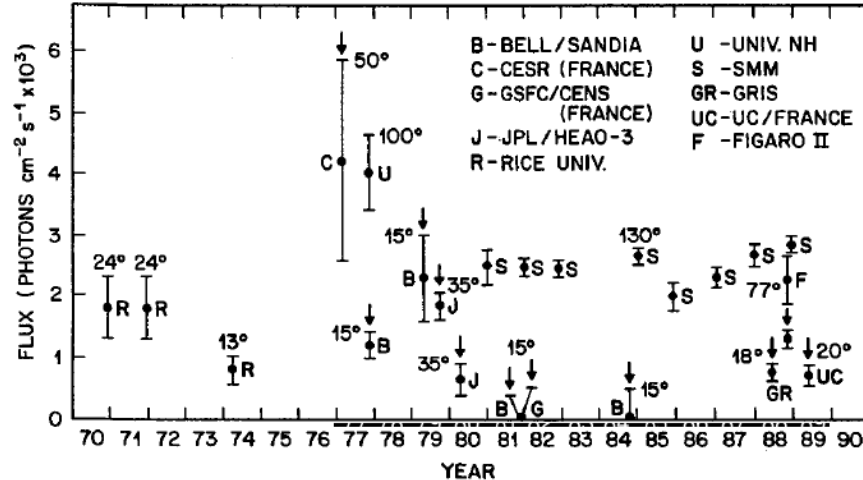


Fig. 1. Observations of 511 keV line emission from the GC direction. Equivalent point source fluxes are plotted for the wide FOV experiments. Measurements made with Ge detectors are indicated with an arrow. Only statistical error bars are shown for the SMM results.

Mesures récentes : le satellite Integral (2002)

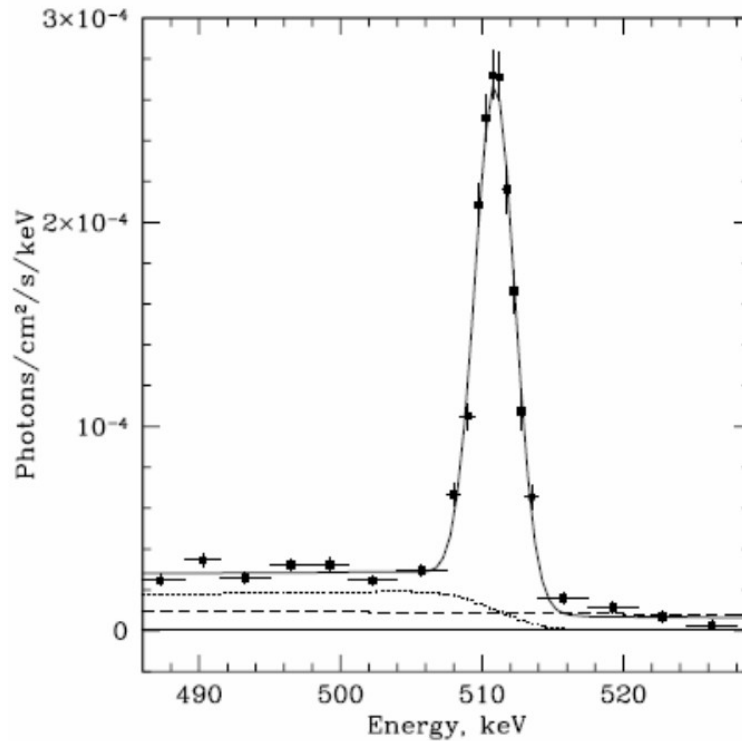
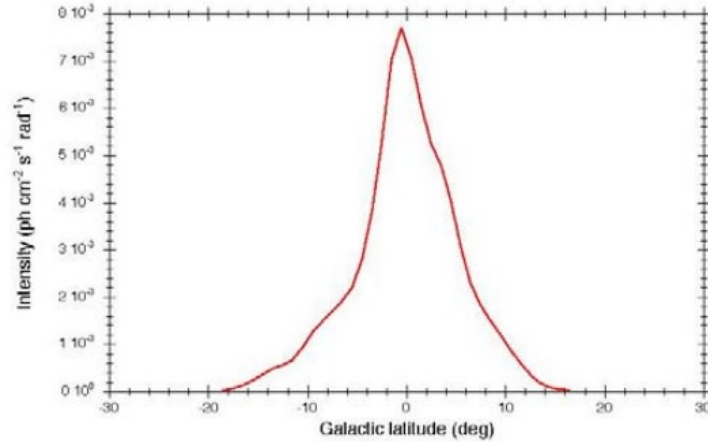
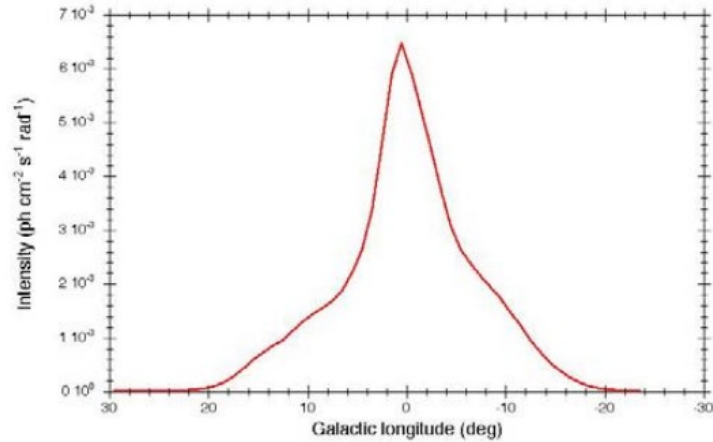
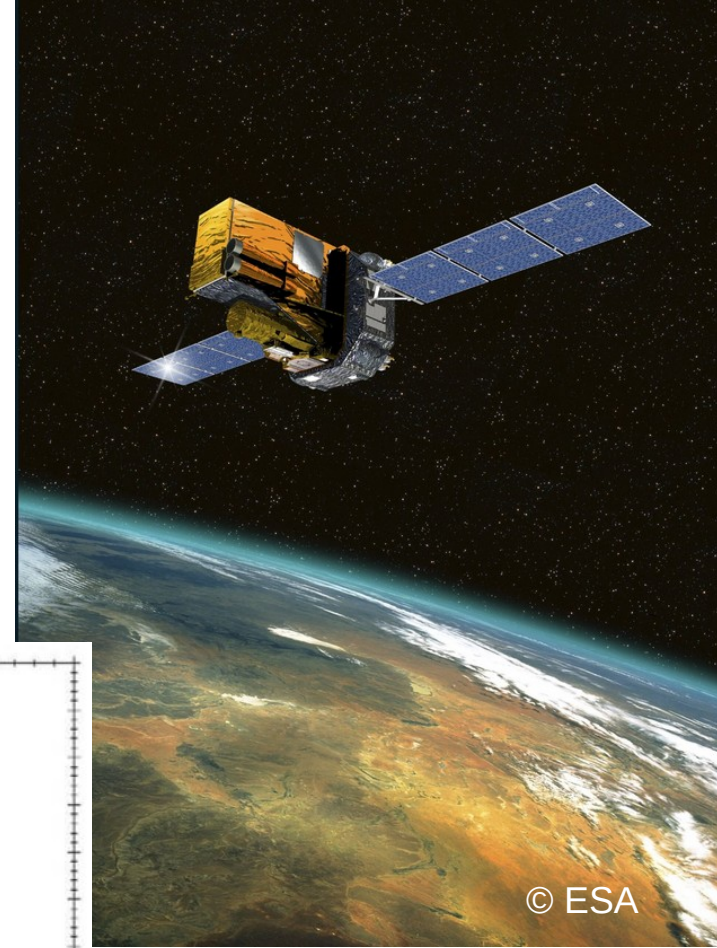
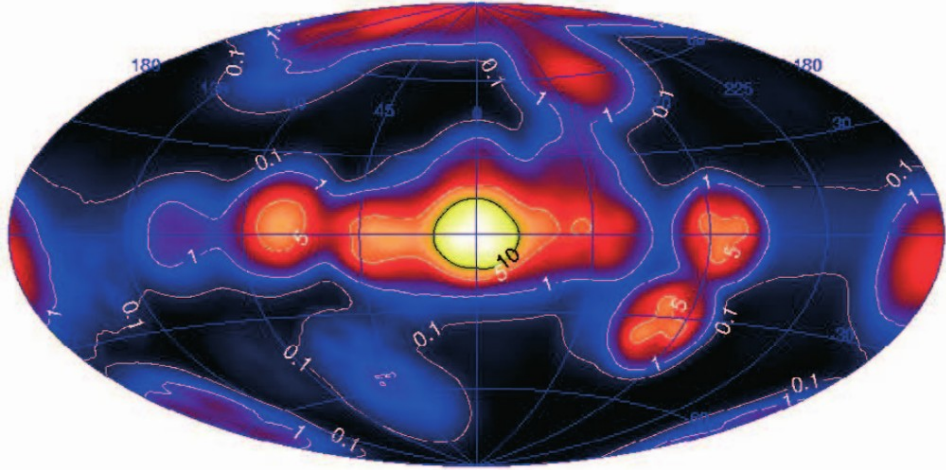


Figure 1. Spectrum of the e^+e^- annihilation radiation (fixed background model) detected by SPI from the GC region and the best-fitting model (thick solid line, see Table 1 for parameters). The dotted line shows the orthopositronium radiation and the dashed line shows the underlying power-law continuum.



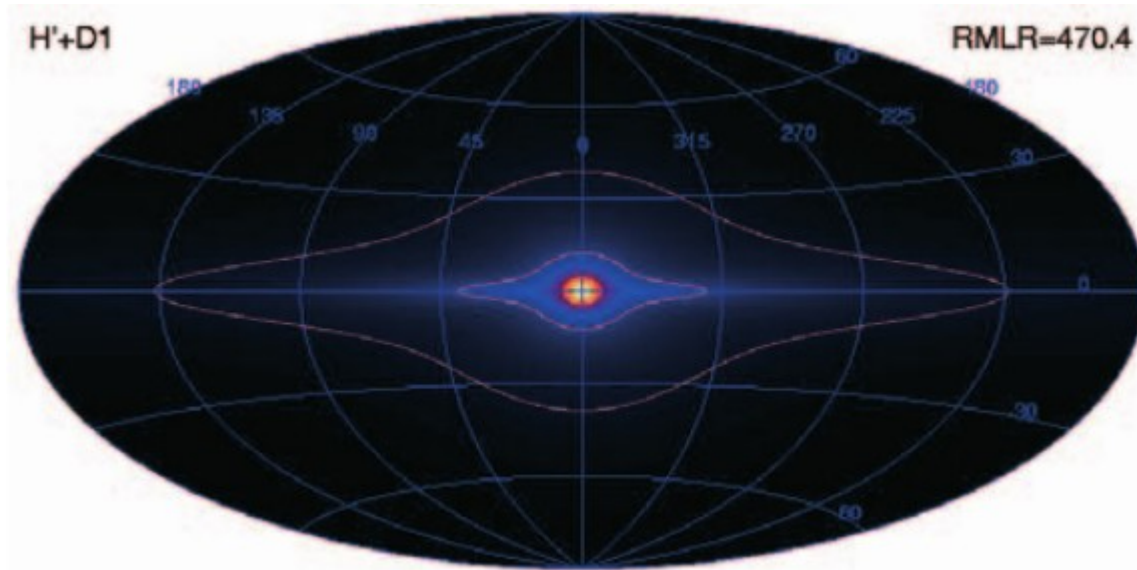
Mesures récentes : le satellite Integral (2002)



Knödseder et al., 2005, A&A 441,513.

Mesures récentes : le satellite Integral (2002)

Modèle possible de distribution de l'émission à 511 keV, avec une composante du bulbe et du disque :



Origine des positrons galactiques

Sources possibles de positrons galactiques (J. Knödlseeder, 2005) :

L'émission à 511 keV est essentiellement observée dans le bulbe galactique avec une distribution à symétrie sphérique.

Faible contribution dans le disque.

Les sources suivantes sont improbables pour le CG parce qu'elles se répartissent dans le disque :

- Les étoiles Wolf-Rayet et les SN produisent des radio-isotopes β^+ .
- Une supernova récente au centre galactique.
- Interactions des rayons cosmiques : $N + p \longrightarrow \pi^+ \longrightarrow e^+$
- Binaires X de grande masse : trou noir ou étoile à neutrons + étoile supergéante bleue ou Wolf-Rayet.
- Trous noirs galactiques et microquasars.

Elles peuvent expliquer la composante du disque.

Origine des positrons galactiques

Sources possibles de positrons galactiques (J. Knödlseider, 2005) :

L'émission à 511 keV est essentiellement observée dans le bulbe galactique avec une distribution à symétrie sphérique.

Faible contribution dans le disque.

***Les sources suivantes sont possibles** parce qu'elles se concentrent dans le bulbe :*

- **Binaires X de faible masse (LMBX)** : trou noir ou étoile à neutrons + étoile de petite masse (séquence principale ou géante rouge).
- **Supernovae de type Ia (SNs thermonucléaires)** : Systèmes binaires serrés avec une naine blanche et une autre étoile quelconque. Produisent des radio-isotopes β^+ de ^{56}Co ($\tau=111\text{day}$)
- Hypothétiques WIMPS (weakly interactive massives particles)

