

# Mesures du rendement de fluorescence des électrons dans l'azote et l'air sous conditions atmosphériques avec l'accélérateur PHIL

Delphine Monnier Ragaigne<sup>1</sup> Sylvie Dagoret Campagne<sup>1</sup>  
Philippe Gorodetzky<sup>2</sup> Carl Blaksley<sup>2</sup> Francois Wicek<sup>1</sup>  
Hugues Monard<sup>1</sup> Alexandre Gonin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LAL - Université Paris sud, Orsay, France

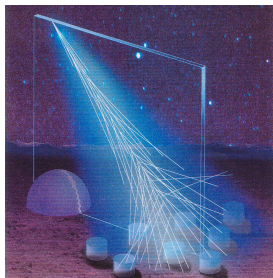
<sup>2</sup>APC, Paris, France

RAPA, 12 Janvier, 2012

# La mesure de l'énergie est fondamentale dans l'étude des rayons cosmiques

## 2 types de mesures actuellement utilisées

- mesure de l'énergie basée sur le **réseau de détecteurs de particules secondaires**
- mesure de l'énergie basée sur **les télescopes de fluorescence** qui détectent les photons issus de l'interaction entre les électrons de la gerbe atmosphérique et l'azote de l'atmosphère



## La méthode de fluorescence.

La mesure de la lumière de fluorescence produite par l'azote de l'air au passage de la gerbe est la méthode la plus précise pour estimer l'énergie des rayons cosmiques, cette technique est (sera) utilisée par l'observatoire Pierre Auger et le futur telescope JEM-EUSO .

### P. Auger : Précision de 22%

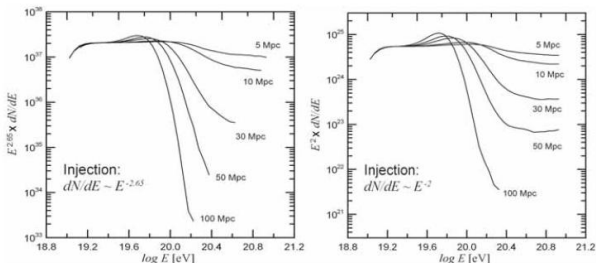
- Rendement de fluorescence connu avec une précision de 14%
- Reconstruction de la gerbe : 10%
- Calibration du telescope 9.5%
- Effets atmosphériques 6 à 8%
- Energie "invisible" 4%

### Pour JEM-EUSO : valeur estimée à 20%

Pour des gerbes d'énergie  $10^{19.5}$  eV avec un angle zenithal de plus de  $45^\circ$ , mais répartition différente.

## Une mesure de l'énergie plus précise : pourquoi ?

- Meilleure estimation du  $X_{max}$  (maximum de développement de la gerbe) = étude sur la composition
- Etude de la coupure GZK : la forme du "bump" et de la coupure renseigne sur la distance des sources comme le montre la figure ci dessous

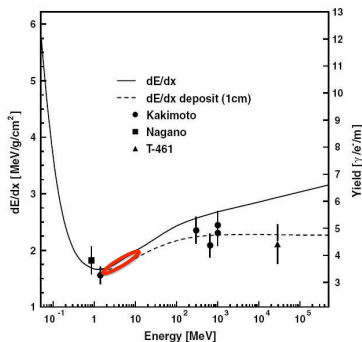


Passer de 15% à 5% sur la précision du rendement de fluorescence améliorera de 22% à 17% la précision sur l'énergie de l'observatoire P. Auger

## Rendement de fluorescence : points importants

1. Les photons de fluorescence sont produits dans le proche UV (300 - 430 nm) par de-excitation des molécules d'azote atmosphérique elles même excitées par les électrons de la gerbe.
2. Les molécules excitées peuvent aussi se de-exciter par collisions avec les autres molécules (collisional quenching). Cet effet croît donc avec la pression  $P$  et n'est pas simulable.
3. La température et la composition (humidité) interviennent aussi : beaucoup étudié mais uniquement sur une raie du spectre.
4. Les électrons secondaires issus des processus d'ionisation sont les principaux acteurs de la lumière de fluorescence, la section efficace d'excitation étant fortement décroissante avec l'énergie de l'électron.

## le rendement de la fluorescence



**FIGURE:** Résultats avec une précision de 15%, l'ellipse rouge correspond à la zone de résultats couverte par les mesures, la courbe en pointillés est un effet du volume d'observation trop petit (1 cm)

## Bilan des mesures existantes

Experience	source	energie (MeV)	$\Delta\lambda$ (nm)	P (hPa)	T(K)	Erreur
Nagano	$^{90}\text{Sr}$	0.85	337	1013	293	13%
Kakimoto	$^{90}\text{Sr}$	1.4	337	800	288	10%
Kakimoto	$^{90}\text{Sr}$	1.4	300-400	1013	288	10%
FLASH	elec	28.5GeV	300-420	1013	304	7.5%
MACFLY	elec	20 et 50 GeV	290-440	1013	296	13%
Lefeuvre	$^{90}\text{Sr}$	1.1	300-430	1005	296	5%

La grande majorité des mesures a été calibrée par la lumière cerenkov qui n'est pas assez précise.

Pas de mesures tenant compte des variations atmosphériques, peu de spectres complets et précis, et variations sur les valeurs trouvées !

## Bilan des mesures

Les mesures utilisées aujourd'hui sont encore imprécises et reposent sur la simulation pour reproduire les effets atmosphériques. Ce qui manque actuellement dans ce domaine :

- des mesures précises du rendement de fluorescence du spectre complet
- la validation des modèles reproduisant les effets atmosphériques par des mesures de chaque raie
- des mesures de la totalité du signal de fluorescence émis, c'est à dire tenant compte du volume fiduciel



## Ce que nous voulons faire

### Mesure du rendement de fluorescence en variant :

- La pression (1 à moins de 0.1 atm) correspondant à une altitude de 0 à 40 km
- La température (+50 à  $-70^{\circ}\text{C}$ )
- la composition (humidité, méthane...)

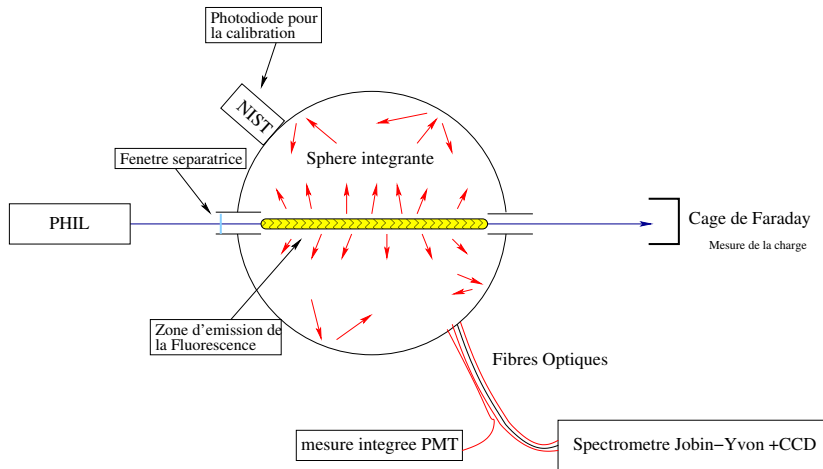
### matériel

- faisceau d'électrons avec une énergie entre 1 et 10 MeV
- Sphère intégrante (position du détecteur indépendante de la zone de production de la lumière) reproduisant les conditions atmosphériques (cryostat) et assez grande pour contenir le volume fiduciel
- Spectromètre, détecteur CCD, PMT calibrés à quelques %

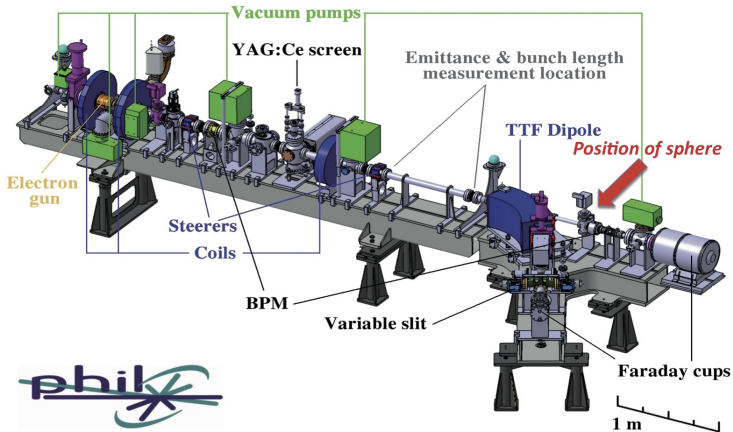
## Principe de la mesure

- Le faisceau d'électrons interagit avec le gaz à l'intérieur de la sphère.
- La lumière de fluorescence est mesurée avec le spectrometre + CCD et le PMT.
- La sphère intégrante permet de faire une mesure indépendante de la position du détecteur autour de la sphère et de la zone de production de la lumière. Le téflon est le composant de la sphère pour ses propriétés optiques.
- La taille de la sphère dépend de deux paramètres : le volume fiduciel (électrons secondaires) et la diffusion multiple du faisceau. 2 ou 3 sphères seront nécessaires pour couvrir la gamme en pression entre 6 cm et 20-30 cm.

## schéma de principe



# PHIL



## Caracteristiques du faisceau

- Charge per bunch : between 50 pC to 300 pC
- Energy : 3-5 MeV
- Energy spread : less than 10%
- Transverse normalized emittance : approximately 1mm, 10 mrad
- Bunch length : less than a fw ns
- Beam transverse dimensions : 0.5mm (X and Y).

## Déroulement de l'expérience

### Première étape

Calibration des détecteurs (PMT et CCD) en utilisant deux photodiodes calibrées à 1.5% (NIST).

Mesure avec une sphère intégrante de 6 cm de diamètre à pression atmosphérique pour valider l'ensemble du dispositif.

### Deuxième étape

Mise en place d'un système de variation de la température, pression composition pour couvrir une gamme entre 1 atm et 0.1 atm et 50° C à -70° C, étude de l'humidité.

L'utilisation de 2 voir 3 sphères sera nécessaire pour couvrir la gamme en pression (volume fiduciel augmentant avec la pression).

## Précisions attendues

- Charge du faisceau : 2%
- Calibration du PMT, et de la caméra CCD : 3%
- La précision totale devrait être autour de 5%

## Précisions sur la procédure

### La calibration

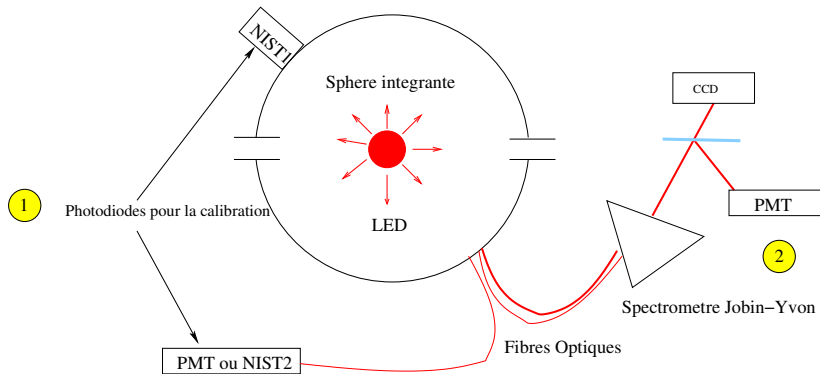
- La calibration du PMT est basée sur la comparaison du signal pour une même source (LED) observée par le PMT et 2 NISTs
- La calibration du CCD se fait via un miroir dans le spectromètre par le même signal observé par le CCD et le PMT calibré

### La mesure

- Le PMT mesure directement le spectre intégré, il aura les mêmes filtres que JEM-EUSO et l'observatoire Pierre Auger
- le CCD mesure l'ensemble du spectre
- un run (conditions atmosphériques définies) dure une ou deux journées



# Principe de la calibration





## Du rendement de fluorescence à l'énergie du primaire.

Pour déduire l'énergie du rayon cosmique primaire, on considère le nombre de photons déposés dans chaque pixel. Ce nombre varie avec le nombre de photons produits. Le signal de fluorescence reçue à un instant donné est :

$$N_{pe} = N_e(E) Y(E) A Q \frac{\Delta L}{4\pi r^2} e^{\frac{-r}{r_{ext}}}$$

$N_{pe}$  nombre de photoélectrons

$N_e(E)$  nombre d'électrons pour une énergie  $E$  donnée ;

$Y(E)$  rendement de la fluorescence pour une énergie  $E$  donnée ;

$A$  surface de collection du miroir du télescope (quelques  $m^2$ ) ;

$Q$  efficacité du photomultiplicateur ;

$L$  est la portion de la trace de la gerbe vue par le pixel ;

$r$  distance du détecteur au lieu d'émission de la fluorescence (env 10km) ;

$r_{ext}$  est la longueur d'extinction de la lumière.

# Résultats expérimentaux normalisés à 337nm et 300 K et 800hPa

Table 1: Comparison of absolute values of fluorescence yield from several experiments. Experimental results as given by the authors are quoted in column 6. The last column shows the fluorescence yield in units of photons/MeV resulting from the normalization to 337 nm, 800 hPa and 293 K (dry air) using the assumptions/calculations of the authors (left side) or the results from our simulations (right side). See text for details.

Experiment	$\Delta\lambda$ (nm)	$P$ (hPa)	$T$ (K)	$E$ (MeV)	Experimental result	Error	$I_{337}/I_{\Delta\lambda}$	$Y_{337}$ (ph/MeV)
	337	800	288	1.4	5.7 ph/MeV	10%	1	5.8 / <b>6.1</b>
Kakimoto [14]	300 - 400	1013	288	1.4	3.3 ph/m	10%	0.279	5.7 / <b>6.0</b>
				300	4.9 ph/m			5.6 / <b>7.0</b>
				650	4.4 ph/m			4.8 / <b>6.1</b>
				1000	5.0 ph/m			5.4 / <b>6.9</b>
Nagano [16]	337	1013	293	0.85	1.021 ph/m	13%	1	6.4 / <b>6.8</b>
Lefevre [17]	300 - 430	1005	296	1.1	3.95 ph/m	5%	0.262	6.5 / <b>7.0</b>
				1.5	4.34 ph/m			7.1 / <b>7.7</b>
MACFLY [13]	290 - 440	1013	296	1.5	17.0 ph/MeV	13%	0.255	5.5 / <b>5.6</b>
				$20 \cdot 10^3$	17.4 ph/MeV			5.6 / <b>5.3</b>
				$50 \cdot 10^3$	18.2 ph/MeV			5.9 / <b>5.5</b>
FLASH [20]	300 - 420	1013	304	$28.5 \cdot 10^3$	20.8 ph/MeV	7.5%	0.272	7.0 / <b>6.9</b>
AirLight <sup>a</sup> [18]	337	-	-	0.2 - 2	$Y^0 = 384$ ph/MeV	16%	1	7.4 / <b>6.9</b>
AIRFLY <sup>b</sup> [21]	337	993	291	350	4.12 ph/MeV	-	1	5.1 / -

<sup>a</sup>The listed experimental result is the fluorescence yield at null pressure reported by the authors which, together with their measured quenching parameters, allows the evaluation of the fluorescence yield at any atmospheric condition.

<sup>b</sup>Preliminary result.

Rosado 2010.

Dispersion =  $\pm 20\%$  at 337nm

## Calibration of the PMT

### Principle

The purpose is to measure the PMT detection efficiency (product of the filter transmission factor, quantum efficiency, photoelectron collection efficiency).

An integrated sphere is used. The sphere is illuminated by either a pulsed LED or a big LED lighthouse. The light measurement is done by two configurations using two NISTs or NIST+PMT.

- step 1 : two NISTs,  $NIST_1$ ,  $NIST_2$  , LED
  - $NIST_2$  has the reduction factor of the PMT
- step 2 : with the  $NIST_1$  and the PMT with the reduction system flux, LED

## Calibration of the PMT

### NIST measurement

The NIST measures the light and deliver a current proportional to the incoming lightpower from an uncalibrated light source. The calibration of NIST is known with an accuracy of 1.5%.

$$I = kS\mathcal{L}_0$$

- $\mathcal{L}_0$  light in the integrated sphere,
- $S$  is the effective surface of the NIST photocathode,
- $k$  is the factor that convert the light into a current. It is stable with 50 % detection efficiency

## Calibration of the PMT

- step 1 : two NISTs,  $NIST_1$ ,  $NIST_2$  and  $NIST_2$  has the reduction factor  $k_2 S_2$  of the PMT  $k_{PM} S_{PM}$ ,

$$\left\{ \frac{k_2 S_2}{k_1 S_1} = \frac{I_{NIST_2}}{I_{NIST_1}} \right.$$

- step 2 : with the  $NIST_1$  and the PMT with the reduction system flux
- The  $NIST_1$  measure in a DC mode the current.
- The PMT record photoelectrons at a mean rate  $\mu = 0.01$  per LED pulse. This PMT has the same reduction system flux as  $NIST_2$
- By comparison between  $\frac{I_{PMT}}{I_{NIST_1}}$  and  $\frac{I_{NIST_2}}{I_{NIST_1}}$ , we can estimate  $\epsilon_{PM}$  at the percent level.

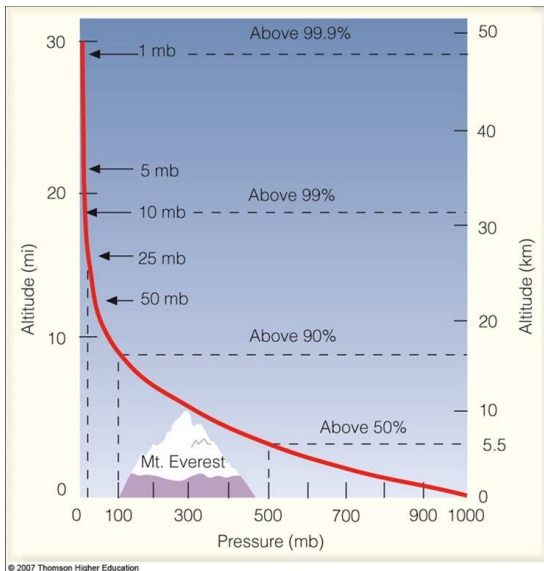
## Calibration of the CCD

The calibrated PMTs will be used to calibrate spectrometer+CCD :

- Spectrometer has 2 outputs
- CCD is on the output1
- PMT is on the output2
- led will be used as source for the spectrometer
- mirror can select output1 or 2
- calibration of CCD is made relatively to PMT with same accuracy



## profil de pression



## Apports scientifiques

- Les expériences comme Pierre Auger et JEM-EUSO ont besoin de ce type de mesure :  $X_{\max}$  (identification) et forme de la coupure GZK (distance des sources)
- Apport en physique des gaz (quenching)
- Le groupe "rayons cosmiques" pourra acquérir de nouvelles compétences en instrumentation, simulation et en physique de l'atmosphère
- Des contacts sont pris pour développer des collaborations avec le Japon, l'Espagne
- Des publications sur la méthode et les résultats.
- une contribution a été acceptée au prochain ICRC (aout)
- Le projet sera aussi présenté lors du prochain meeting international sur la fluorescence (septembre)

## Collaboration

- LAL groupe : D. Monnier Ragaigne (75%), S. Dagoret(25%), F. Wicek
- APC groupe : P. Gorodetzky(50%), C. Blaksley (50%)(these JEM-EUSO)
- équipe de PHIL (Hugues Monard), équipe de la mécanique, équipe du vide

Les sphères sont dessinées et réalisées au LAL.

Les détecteurs et le spectromètre sont financés et fournis par l'APC (60 k€).

Nous sommes en contact avec Fernando Arqueros pour la simulation.

### Etape 1 :

financée par le LAL et le GdR PCHE (10 k€+ 5 k€)

### Etape 2 :

pas encore totalement financée : ANR ? Université ? LAL ?

Un postdoc et/ou une thèse (Fluo/JEM-EUSO ou Fluo/EUSO-Ballon, cotutelle ?) sont recherchés