

**AMS: à procura de matéria escura e
antimatéria**
Participação do IST/LIP no projecto



Luísa Arruda
Fernando Barão
Rui Pereira
(LIP - Lisboa)

Raios cósmicos

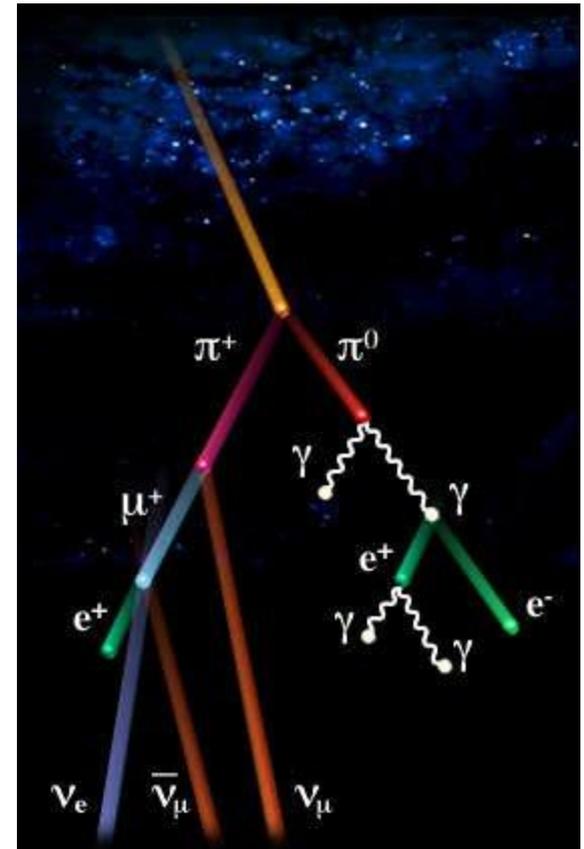
- Descobertos por Victor Hess em 1912
 - ◆ Medida de radiação aumenta com a altitude
- O que são?
 - ◆ **Partículas de elevada energia que percorrem o espaço interestelar e atingem a atmosfera terrestre**
- Constituintes:
 - ◆ protões (~90%)
 - ◆ partículas α (~10%)
 - ◆ outros núcleos
 - ◆ electrões
 - ◆ positrões
 - ◆ anti-protões
 - ◆ outros ...



Victor Hess no seu balão (1912)

Porquê um detector no espaço?

- Não é possível detectar directamente as partículas constituintes dos raios cósmicos primários ao nível do solo
 - ◆ Atmosfera muito espessa
 - ◆ O que se pode detectar no solo é o resultado de uma cadeia de interacções ocorridas ao longo da atmosfera
- Solução: **colocar detectores acima da atmosfera**
 - ◆ Duas possibilidades:
 - ★ Balões a grande altitude
 - ★ Detectores em órbita
- Os balões têm o inconveniente de não estarem totalmente acima da atmosfera e não poderem transportar cargas pesadas
- **No espaço existe um vácuo quase perfeito, sendo possível colocar em órbita um detector de grande dimensão e operá-lo durante vários anos**



Cascata atmosférica

Um detector no espaço: uma série de desafios

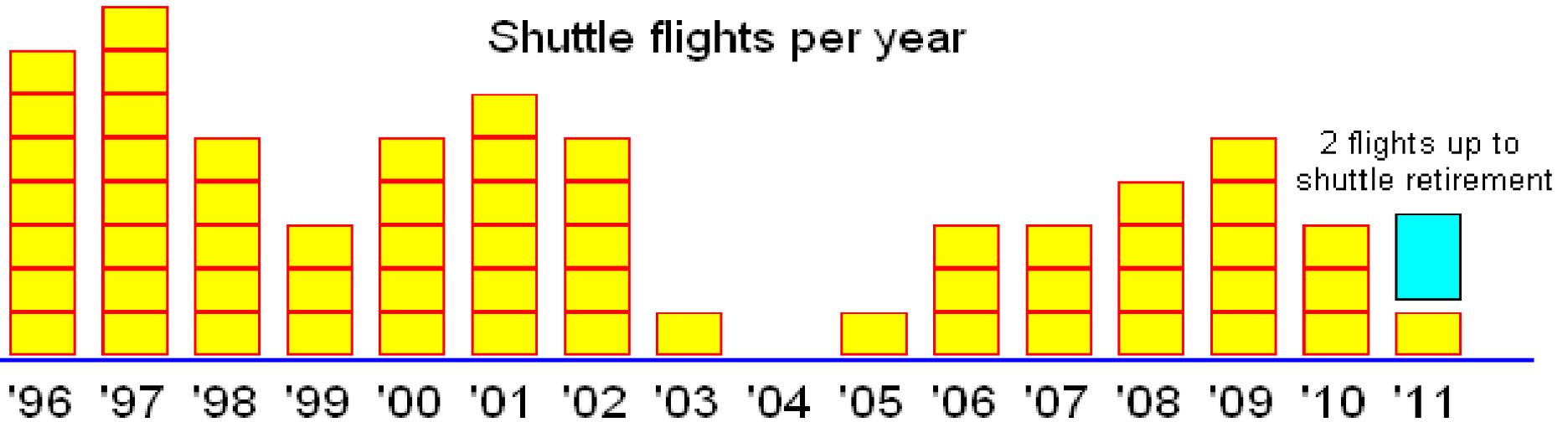
- As experiências no espaço lidam com um conjunto de requisitos:
 - ◆ Ausência de manutenção
 - ◆ Fortes constrangimentos na massa
 - ◆ Limites na potência de consumo
 - ◆ Vácuo
 - ◆ Forte radiação
 - ◆ Variações extremas de temperatura
- ... Mas o espaço, mesmo numa órbita próxima da Terra, oferece uma janela para o Universo exterior
 - ◆ Detecção directa da maioria dos raios cósmicos primários carregados o que é impossível à superfície terrestre



A Estação Espacial Internacional

AMS-02 na ISS: um longo trilho...

Shuttle flights per year



↑
STS-91 flight (Jun 98)



BESS-POLAR (2004, 2007-08)



FERMI (June 2008)



PAMELA (June 2006)

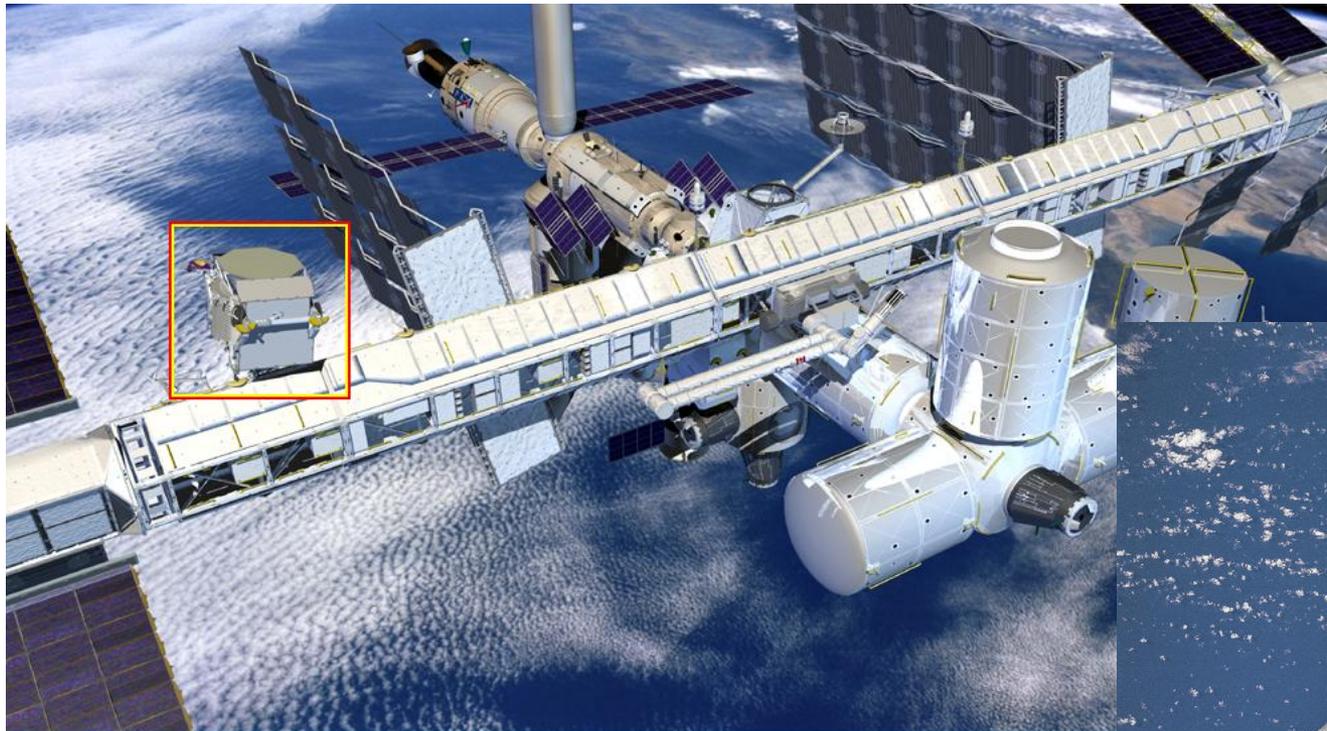
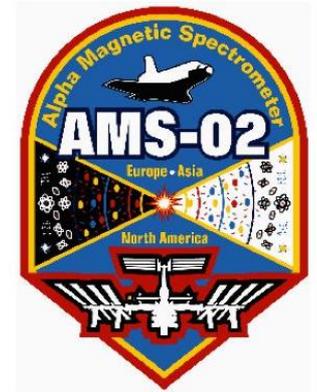


AMS to ISS (Feb-Apr/2011)

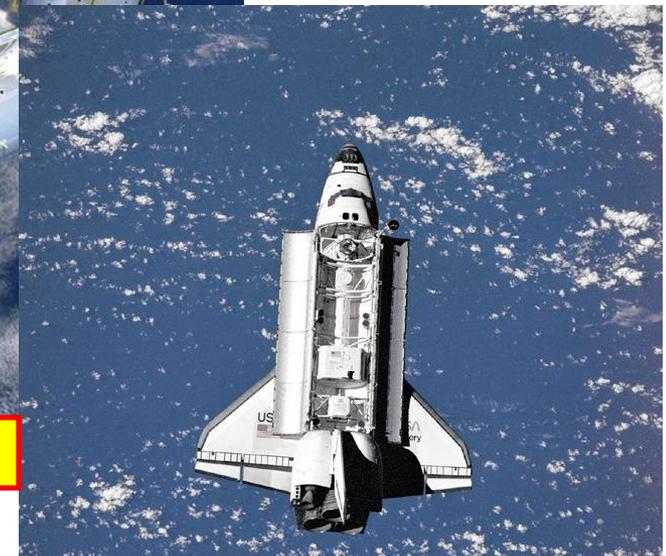


Alpha Magnetic Spectrometer

- Vasta colaboração internacional (cerca de 600 cientistas, 56 instituições, 16 países) para a detecção de raios cósmicos primários no espaço



O detector AMS-02 na Estação Espacial Internacional



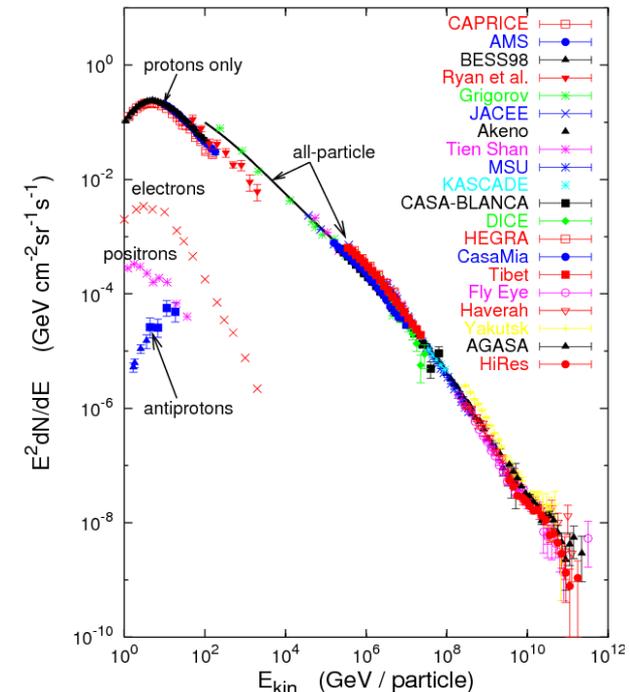
Protótipo no vaivém espacial (1998)

A experiência AMS

- Aquisição de dados: >3 anos na Estação Espacial Internacional
 - ◆ Protótipo **AMS-01** testado com sucesso a bordo do vaivém Discovery em Junho de 1998
 - ◆ Detector final **AMS-02** deverá ser lançado no vaivém Endeavour (STS-134) em 29 de Abril de 2011
- Objectivo: **Estudo detalhado do espectro de raios cósmicos**
 - ◆ O detector AMS-02 registará um numero sem precedentes (*mais de 10.000 milhões*) de eventos de raios cósmicos com energias de 100 MeV a 1 TeV, aproximadamente
 - ◆ **Identificação de cargas** dos núcleos atômicos até ao ferro (Z=26)
 - ◆ **Medição precisa de velocidades**, permitindo separação de isótopos no caso de partículas com energias na região do GeV



Estação Espacial Internacional

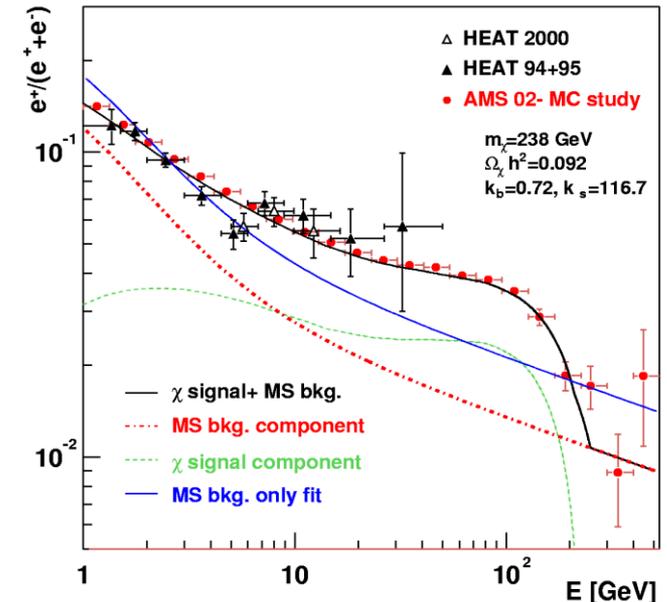


Espectro dos raios cósmicos

O que AMS procura...

■ Onde está a antimatéria?

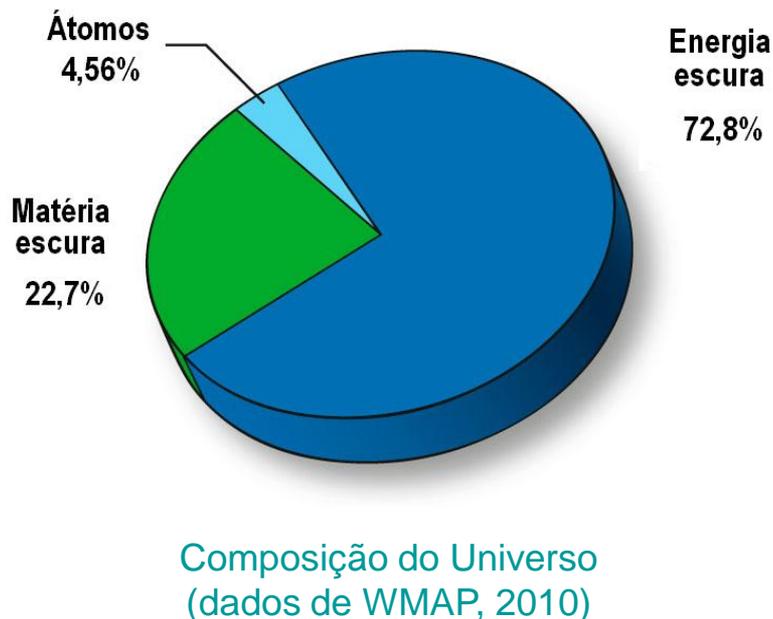
- ◆ Pensa-se que no Big Bang se formaram quantidades iguais de matéria e antimatéria
- ◆ Não existem quantidades significativas de antimatéria na nossa região do Universo: será assim em toda a parte?
- ◆ A presença de anti-núcleos pesados ($Z \geq 2$) nos raios cósmicos indicará que existem domínios de antimatéria no Universo



O que AMS procura...

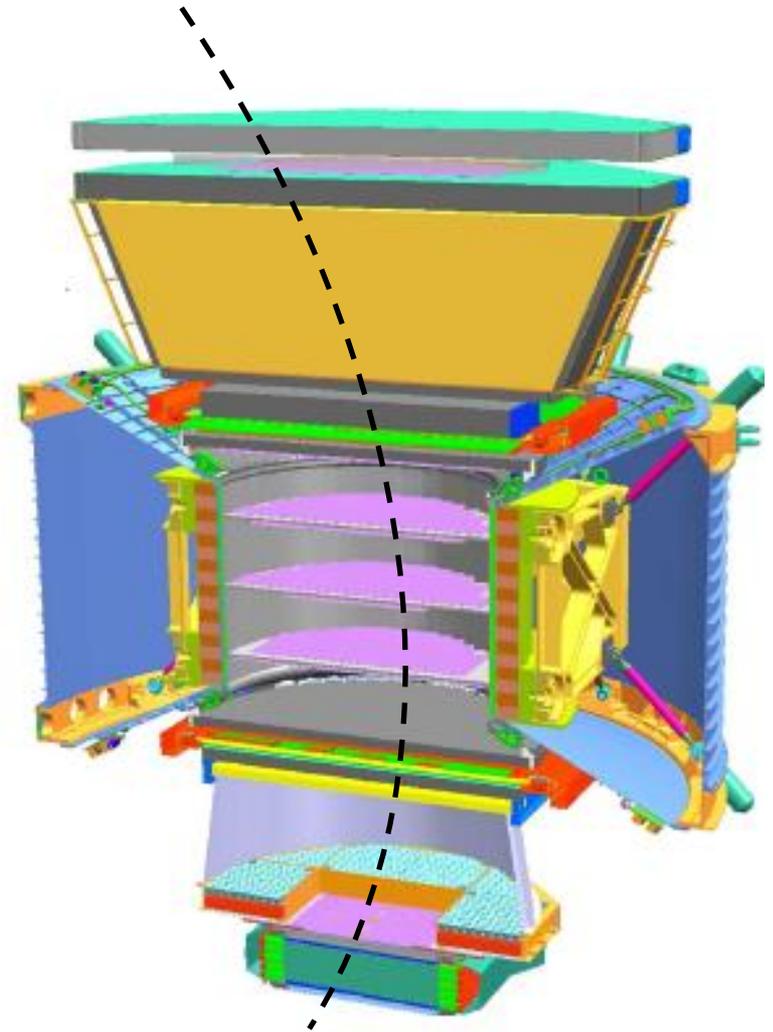
■ De que é feita a matéria escura?

- ◆ As observações astronómicas indicam que a maior parte da matéria do Universo será constituída por partículas desconhecidas
- ◆ Os detalhes do espectro de raios cósmicos podem dar informação sobre as partículas constituintes da matéria escura



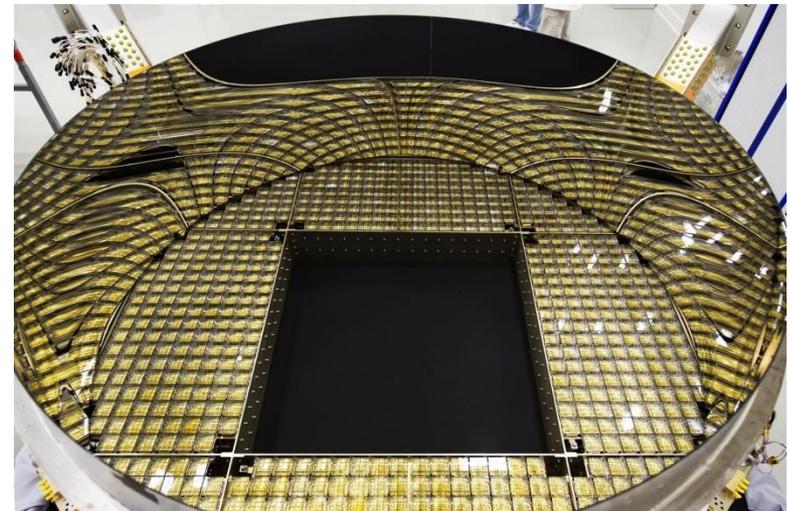
Detector AMS-02

- Sub-detectores:
 - ◆ TRD (*radiação de transição*)
 - ◆ TOF (*tempo de voo*)
 - ◆ Tracker (*detector de traços*)
 - ◆ **RICH (*anéis de Cherenkov*)**
 - ◆ ECAL (*calorímetro electromagnético*)
 - ◆ ACC (*anti-coincidências*)
- Capacidades do detector AMS:
 - ◆ *Encurvamento de trajetórias*
 - ★ magneto permanente (0.15 T)
 - ◆ *Medidas de dados da partícula:*
 - ★ **Rigidez = p/Z** (Tracker)
 - ★ **Direcção** (TOF, Tracker, RICH)
 - ★ **Velocidade** (RICH, TOF, TRD)
 - ★ **Carga** (RICH, Tracker, TOF)
 - ◆ *Trigger*
 - ★ TOF, ECAL, ACC
- Estatística total: $>10^{10}$ eventos



Participação portuguesa em AMS

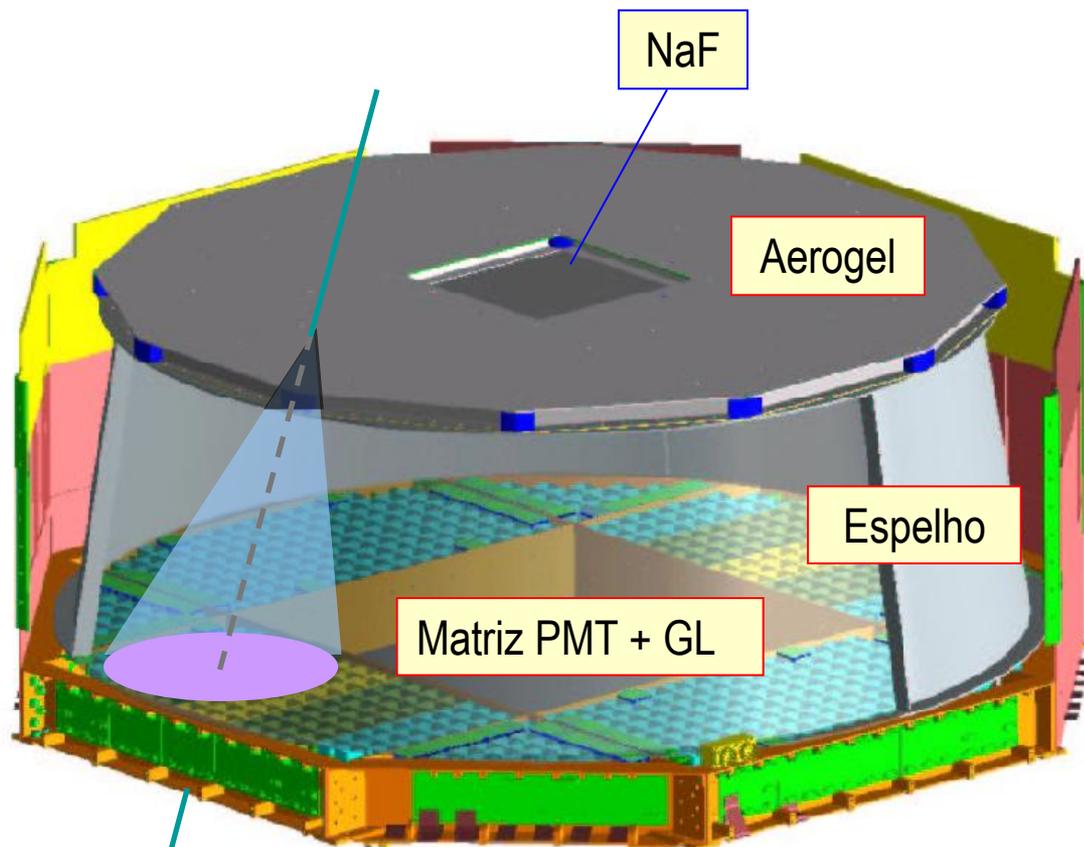
- Portugal participa na experiência AMS através do **LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas** e do **IST – Instituto Superior Técnico**
 - ◆ A participação portuguesa na experiência iniciou-se em 1997
 - ◆ Actividades centradas no sub-detector RICH: testes, análise de dados e simulação
- Membros do grupo AMS do LIP:
 - ◆ Fernando Barão (líder do grupo)
 - ◆ Luísa Arruda (pós-doc)
 - ◆ Rui Pereira (pós-doc)



O detector RICH de AMS-02
(espelho e matriz de detecção)

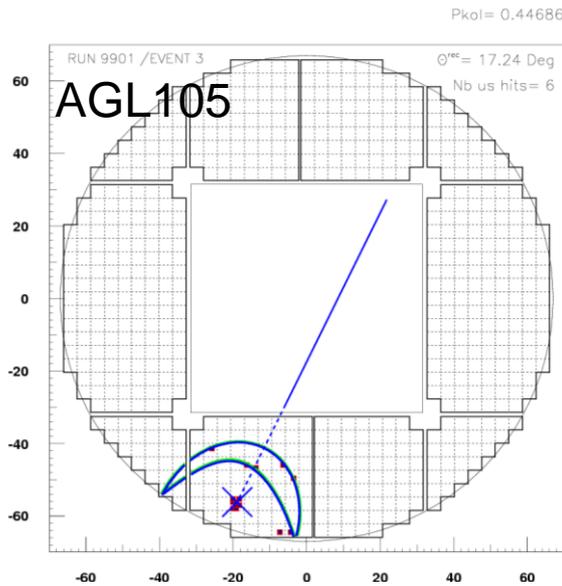
RICH detector

- Detector de focagem aproximada
- Dois radiadores
 - ◆ *NaF* ($n=1.334$) – quadrado central
 - ◆ *Aerogel* ($n=1.05$) – região exterior
- Espelho cónico (~85% reflectividade)
- Matriz de detecção com 680 PMTs + guias de luz cada um com 16 píxeis
 - ◆ *Tamanho do pixel: 8.5 mm*



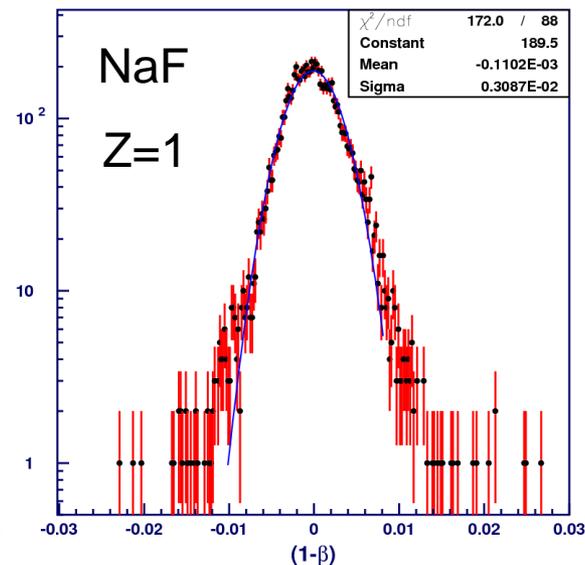
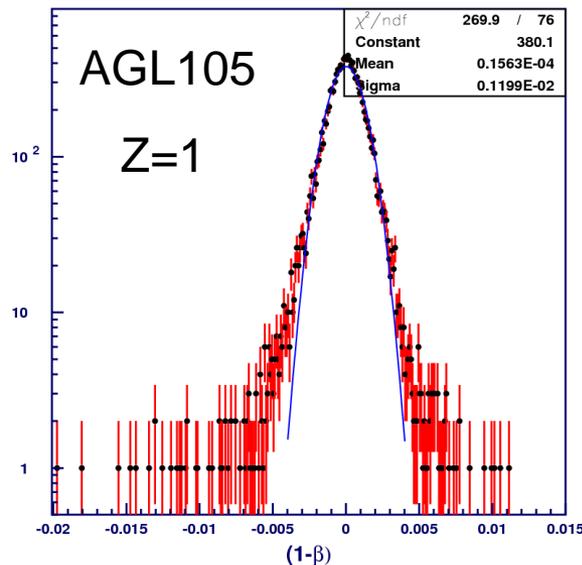
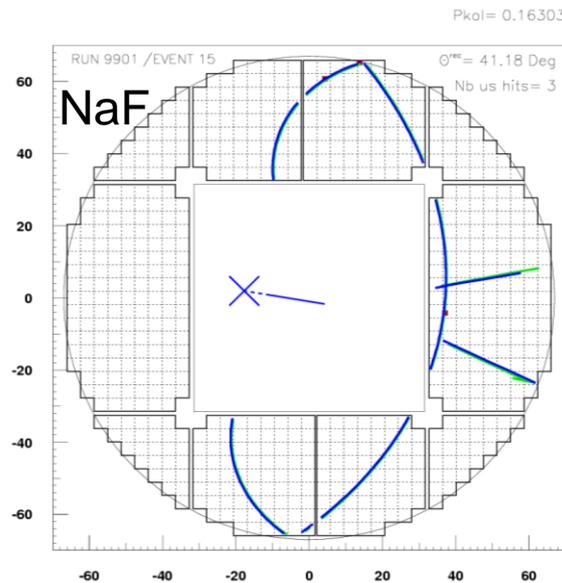
- Montagem do detector RICH ocorreu no CIEMAT, Madrid
- Detector transportado para o CERN em Janeiro 2008

Medida da velocidade com o RICH



- O tracker fornece a direcção da partícula (θ , ϕ) e o ponto de impacto no radiador;
- Anel de Cherenkov é função do θ_c : método de máxima verosimilhança aplicado para reconstruir o θ_c ;
- Velocidade obtido da medida de θ_c :

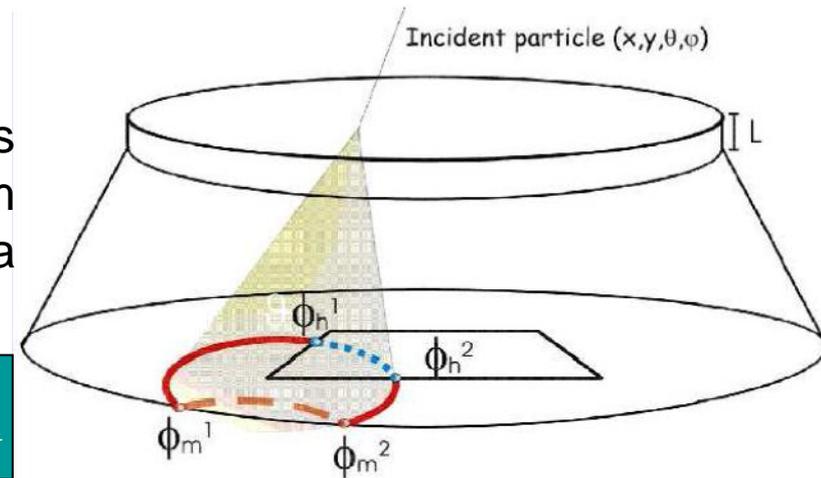
$$\beta = 1/n \cos \theta_c$$



Medida da carga eléctrica com o RICH

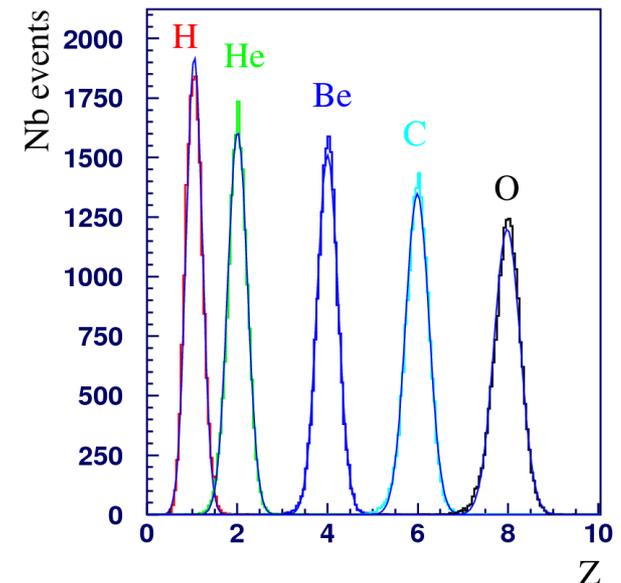
O número de fótons de Čerenkov radiados quando uma partícula carregada atravessa um certo comprimento de radiador ΔL depende da sua carga Z

$$N_{pe} \propto Z^2 \Delta L \sin^2 \theta_c \epsilon_{rad} \epsilon_{geo} \epsilon_{lg} \epsilon_{pmt}$$



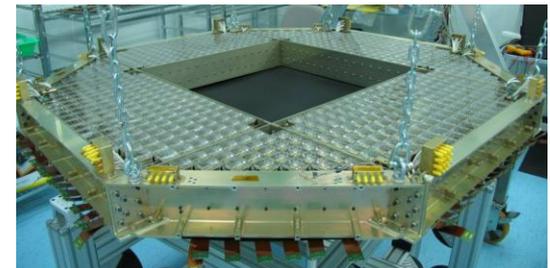
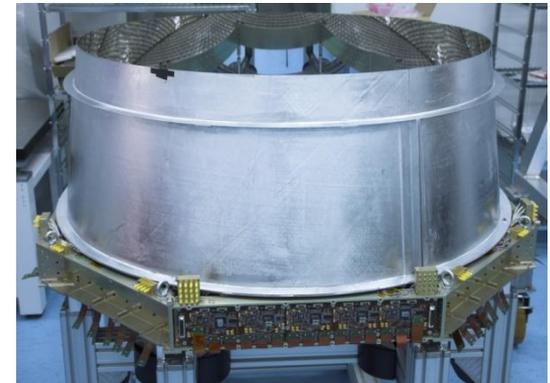
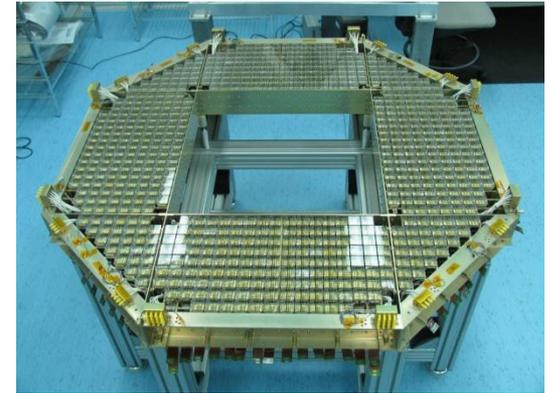
A reconstrução de carga necessita de:

- Reconstrução do ângulo de Čerenkov (θ_c);
- Estimativa do comprimento atravessado pela partícula ΔL ;
- Contagem dos fotoelectrões associados ao anel de Čerenkov;
- Determinação da eficiência de detecção dos fótons

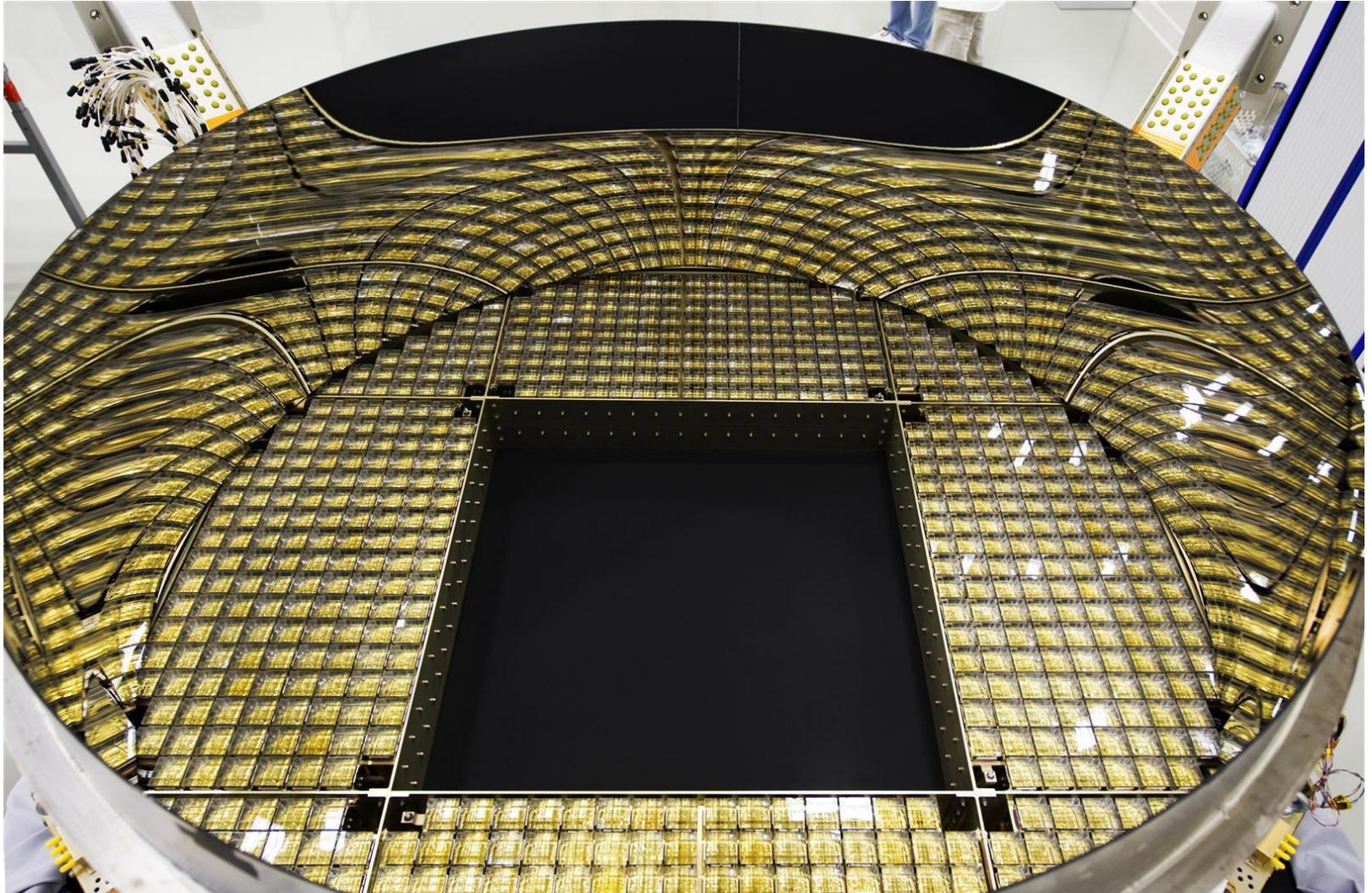


Montagem do RICH

- Algumas imagens do RICH durante a sua montagem no CIEMAT...



Espelho e matriz de detecção



Experiência AMS: pré-montagem

- 2008: pré-integração do detector AMS-02 no CERN
 - ◆ Montagem do detector sem magneto
 - ◆ Subdetectores testados
 - ◆ Eventos cósmicos adquiridos



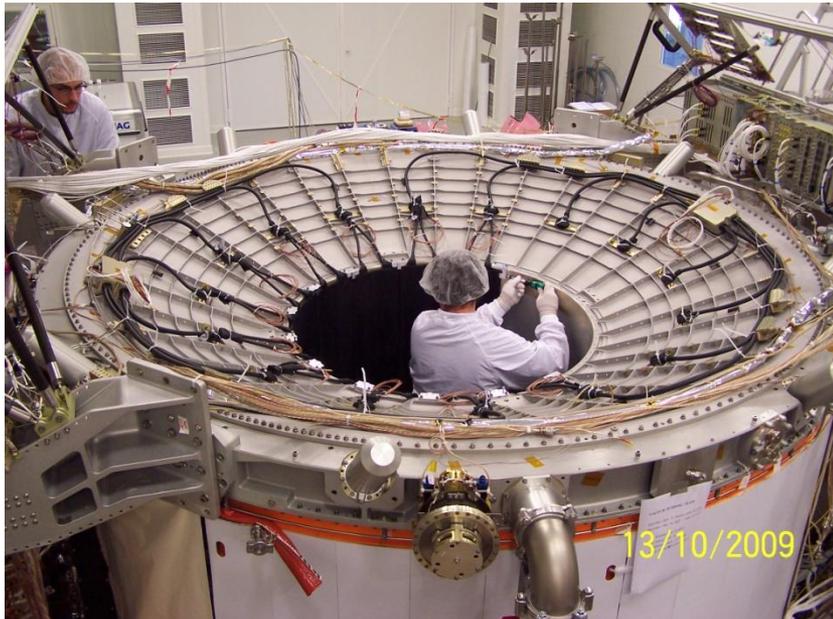
AMS & RICH durante a pré-montagem, Janeiro 2008



Chegada do magneto, Dezembro 2008

Montagem e testes do detector AMS-02

- Detector AMS-02 montado no CERN entre 2008 e 2010
 - ◆ Sub-detectores montados previamente em diversos locais
 - ◆ Testes ao detector efectuados no CERN e no ESTEC



Montagem do detector, CERN, Outubro 2009



Visita dos astronautas, Outubro 2009

Testes AMS-02 no ESTEC

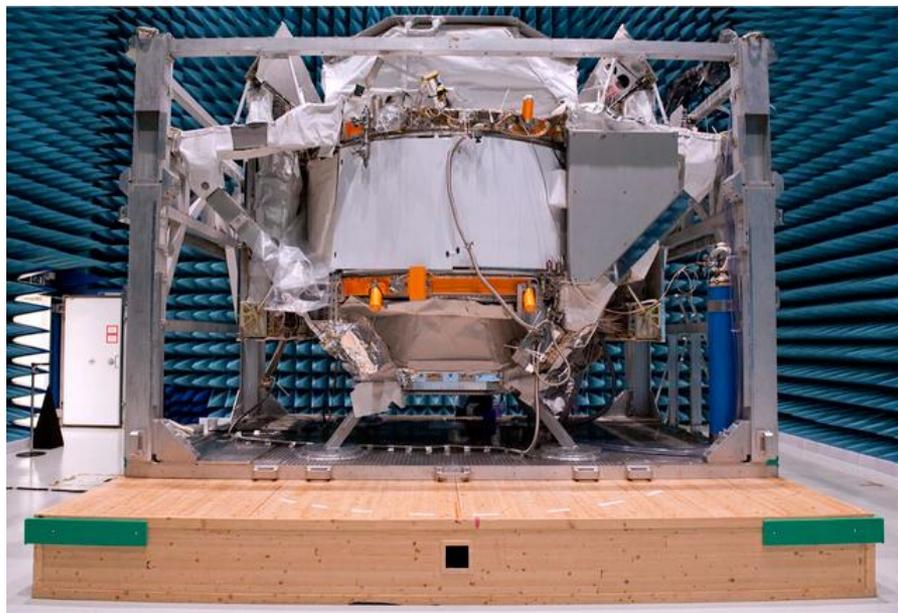
- Tiveram lugar entre Fevereiro e Abril de 2010 no ESTEC (ESA) em Noordwijk, Holanda
- Teste de compatibilidade electromagnética: avaliação da sensibilidade do detector à radiação EM
- Teste térmico e de vácuo: detector submetido à simulação das condições espaciais (vácuo + ciclos de temperatura), temperaturas testadas até -90°C dentro do *Large Space Simulator* do ESTEC



Grande Simulador Espacial no ESTEC



AMS-02 no ESTEC

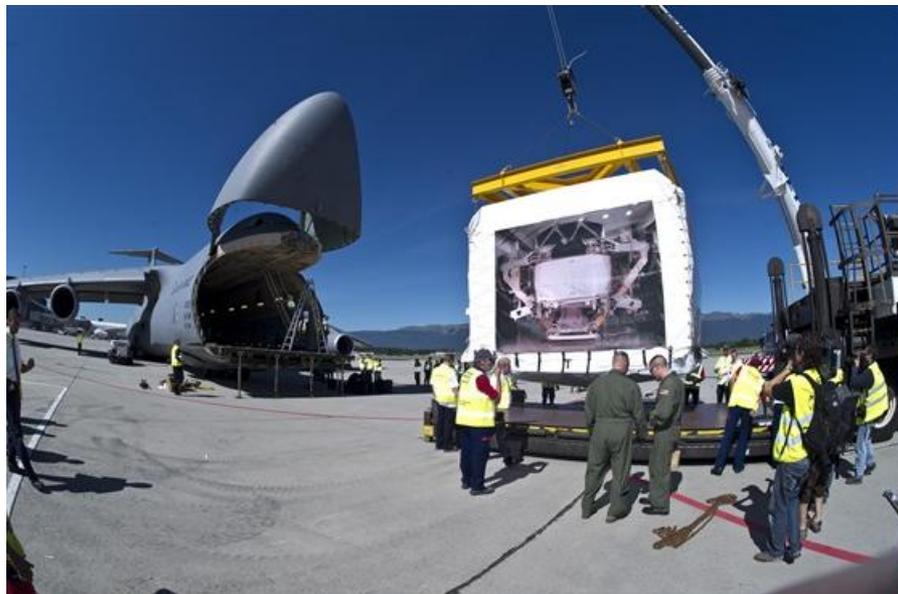


Testes do detector, ESTEC, Abril 2010



Alan Walters / Universe Today

Chegada a Cabo Canaveral, 26-08-2010



Embarque do detector em Genebra, 26-08-2010



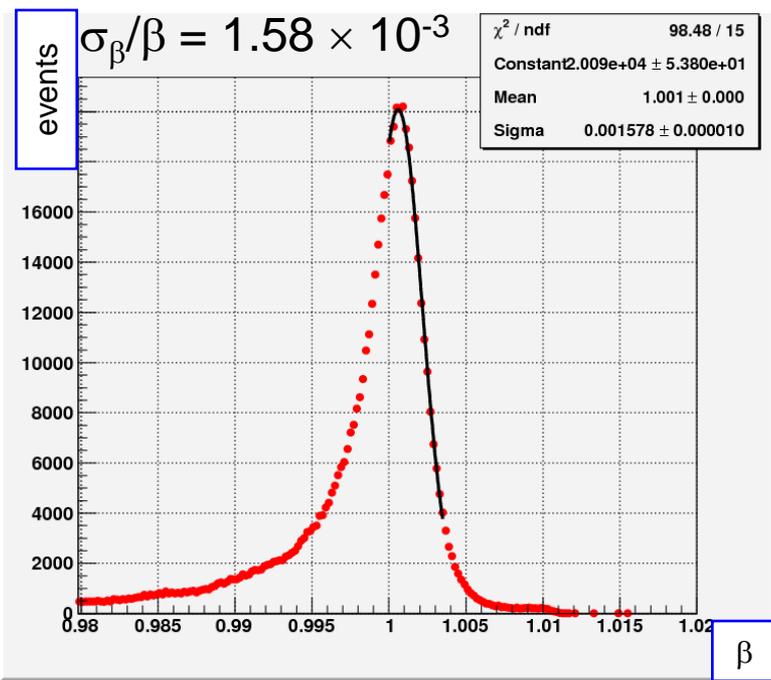
AMS-02 em Cabo Canaveral, Setembro 2010

Instituto Superior Técnico, 12 de Abril de 2011

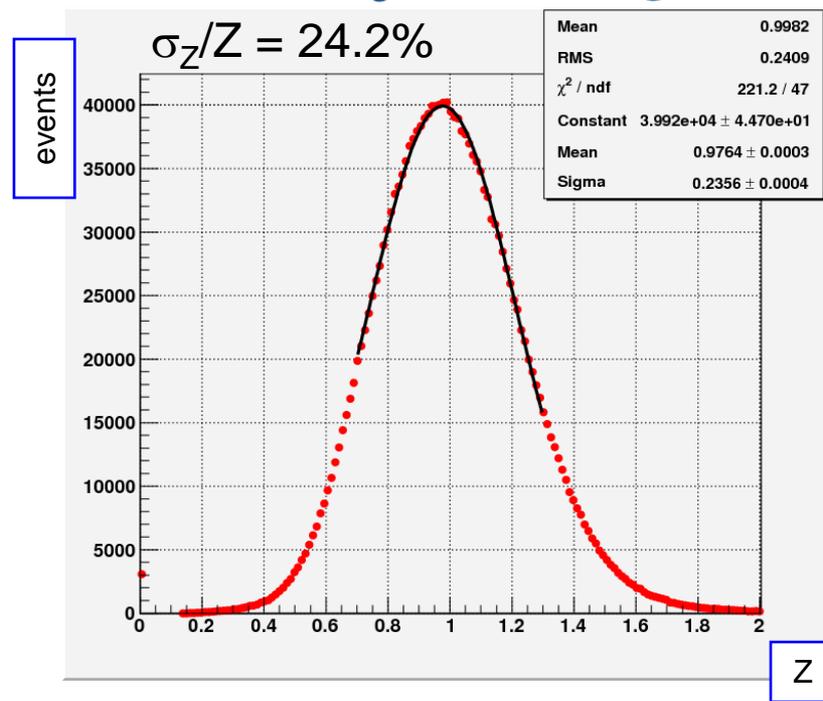
Testes de AMS no solo

- Tomada de dados de raios cósmicos no KSC desde Agosto 2010: uma larga estatística de muões

Reconstrução de velocidade

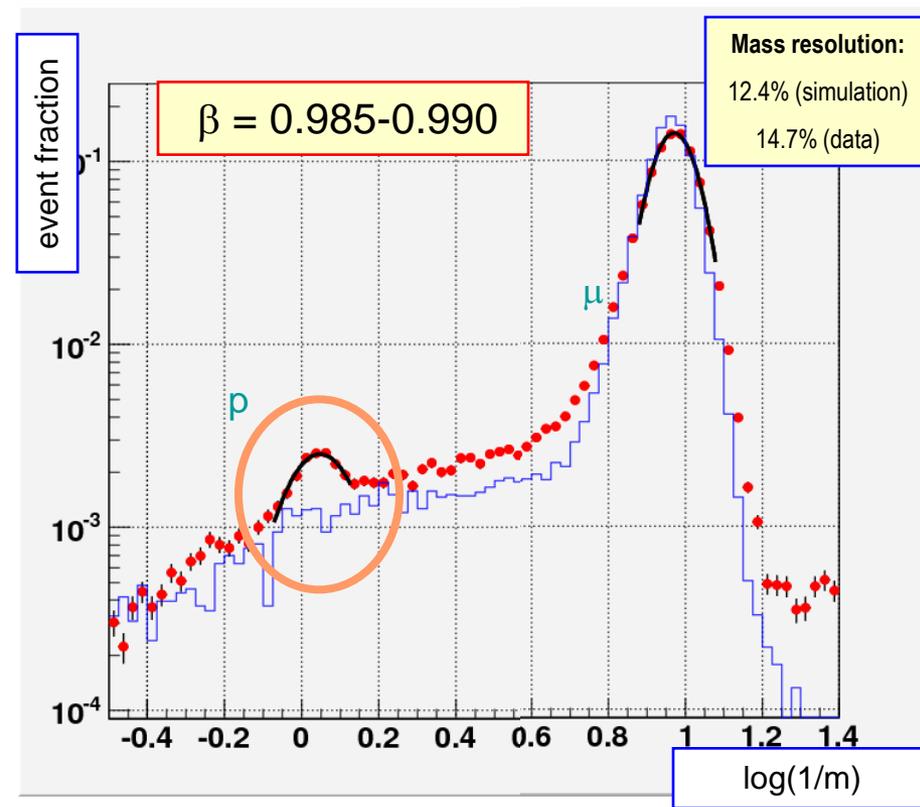
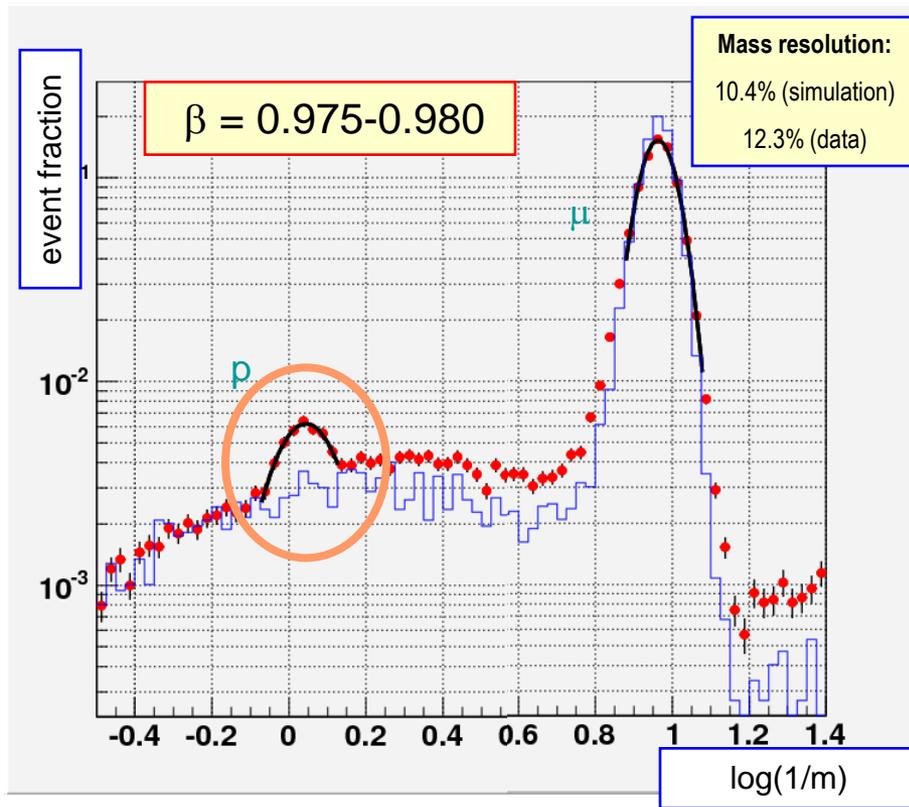


Reconstrução de carga



Reconstrução de massa: resultados

- Pico de prótons visível nos dados



Partida para a ISS

- AMS-02 partirá para a Estação Espacial Internacional a 29 de Abril de 2011
- O voo de AMS (STS-134, vaivém Endeavour) será o penúltimo voo do programa de vaivéns da NASA iniciado em 1981



O vaivém Endeavour



Tripulação do voo STS-134



AMS-02 na Estação Espacial Internacional

AMS-02: oportunidade única

- AMS-02 aparece nestas últimas décadas e nas próximas como uma experiência ímpar que dificilmente se repetirá:
 - ◆ Experiência na ISS
 - ◆ Equipada com um magneto (0.15 T)
 - ◆ Larga aceitação ($0.5 \text{ m}^2\text{sr}$)
 - ◆ Largo tempo de coleção (>3 anos)



Fiquem atentos: resultados muito interessantes para breve...

<http://www.ams02.org>

<http://www.lip.pt/~amswww>



<http://www.facebook.com/AMS02>



<http://www.youtube.com/ams02tv>



<http://www.flickr.com/photos/ams02/>



<http://twitter.com/ams02twitt>

Contactos: Fernando Barão (barao@lip.pt)
Luísa Arruda (luisa@lip.pt)
Rui Pereira (pereira@lip.pt)

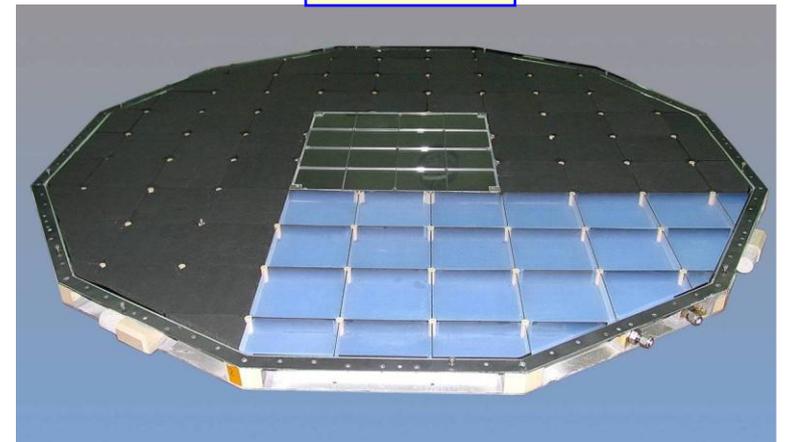
BACKUP SLIDES

RICH: radiador

- Radiador duplo
- Silica aerogel:
 - ◆ 92 telhas, $n = 1.05$
 - ◆ $11.3 \text{ cm} \times 11.3 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$
 - ◆ Aerogel: material com índice de refração mais baixo de entre os “sólidos”
 - ◆ Limiar de radiação $E_{\text{kin}} > 2.1 \text{ GeV/nuc}$
- NaF: região central
 - ◆ 16 telhas, $n = 1.334$
 - ◆ $8.5 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$
 - ◆ Elevado ângulo de Cerenkov ($\sim 40^\circ$) reduz perda de fótons na zona central
 - ◆ Estende o limiar do RICH para energias mais baixas ($E_{\text{kin}} > 0.5 \text{ GeV/nuc}$)



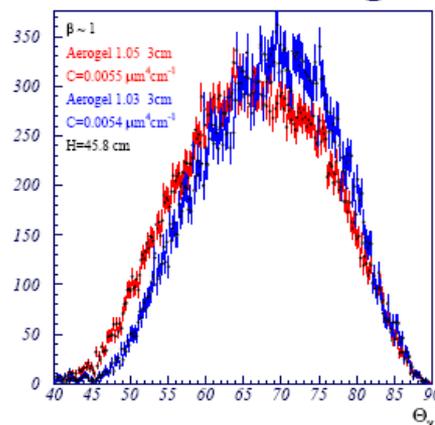
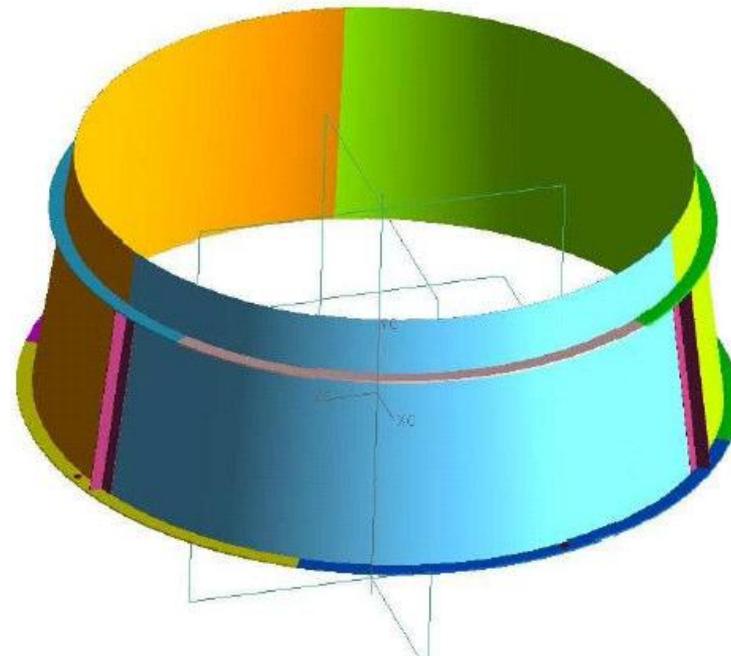
Telha de aerogel



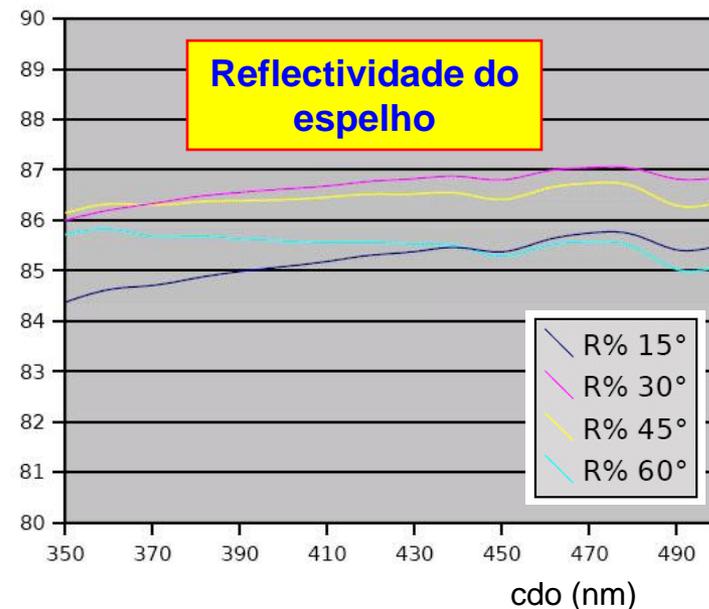
Suporte do radiador com NaF e 1/4 das telhas de aerogel

RICH: espelho

- ~33% dos fótons que saem do radiador apontam para fora da matriz
- Espelho cónico incluído para aumentar a colecção de luz
- Estrutura: fibra de carbono (3 segmentos)
- Reflector: 100 nm Al-Ni + 300 nm SiO₂
- Elevada reflectividade (>85% a $\lambda=420$ nm)
- Dimensões
 - ◆ Altura: 46 cm
 - ◆ raio superior: 60 cm
 - ◆ raio inferior: 67 cm

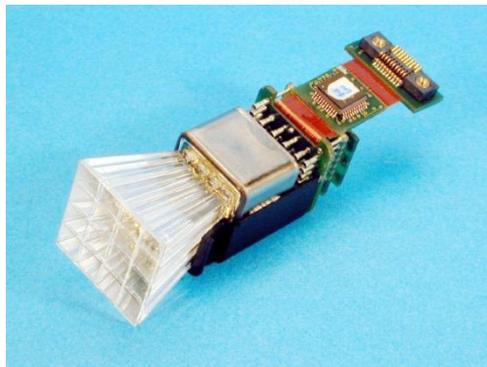
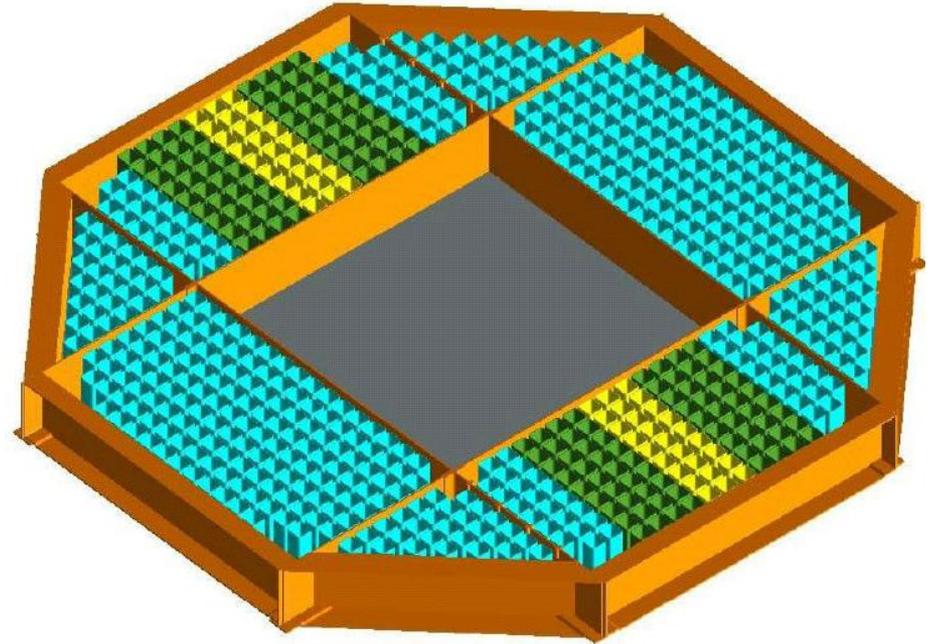


Ângulos de incidência no espelho (aerogel)



RICH : matriz de detecção

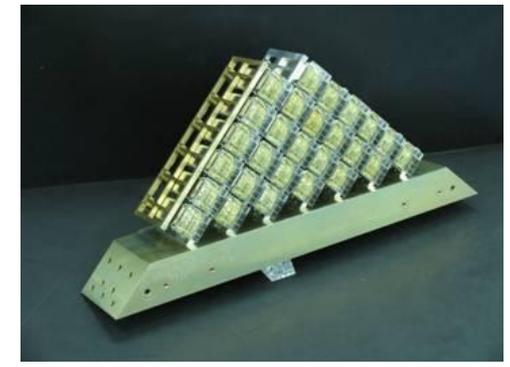
- 8 grelhas (4 rectangulares + 4 triangulares)
- 680 PMTs acoplados a guias de luz
- 16 pixeis (4×4) por PMT
- Buraco central devido à inserção do calorímetro electromagnético



Célula de detecção



Grelha rectangular

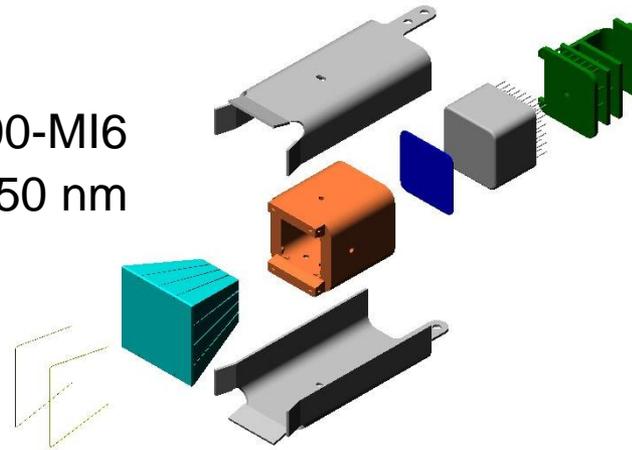


Grelha triangular

RICH : célula de detecção

■ Fotomultiplicadores

- ◆ Modelo: Hamamatsu R7900-M16
- ◆ Resposta espectral: 300-650 nm (pico nos 420 nm)
- ◆ pitch: 4.5 mm



■ Guias de luz

- ◆ material: Plexiglas ($n=1.49$)
- ◆ Aumento da colecção de luz
- ◆ Pixel efectivo: 8.5 mm

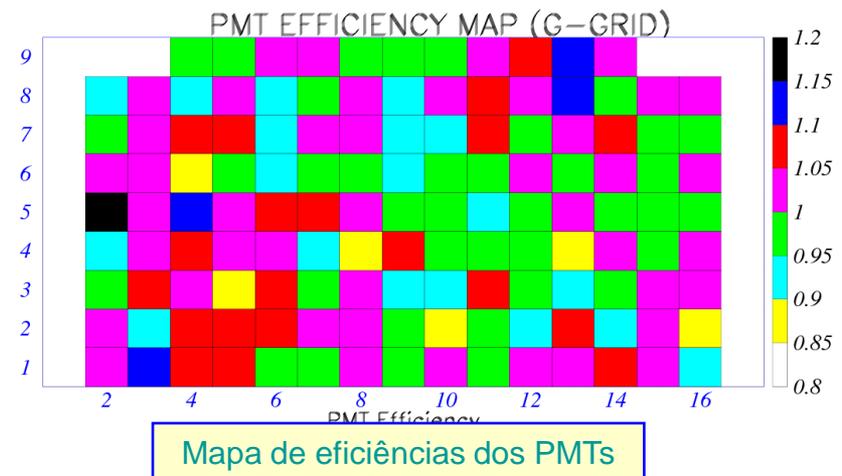
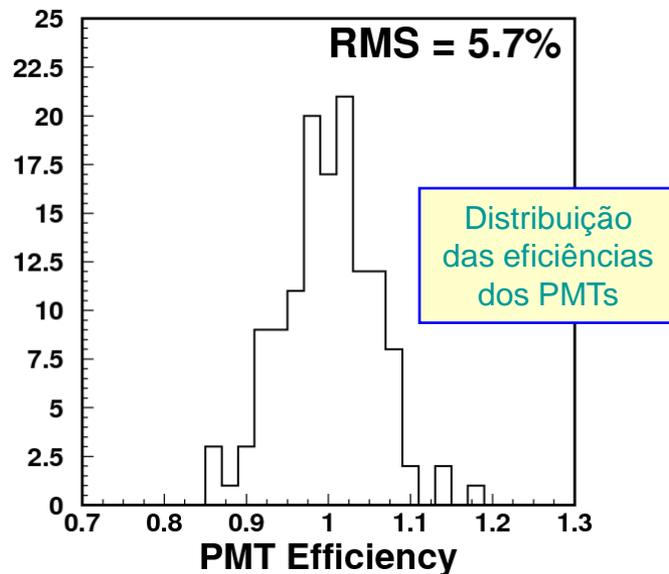
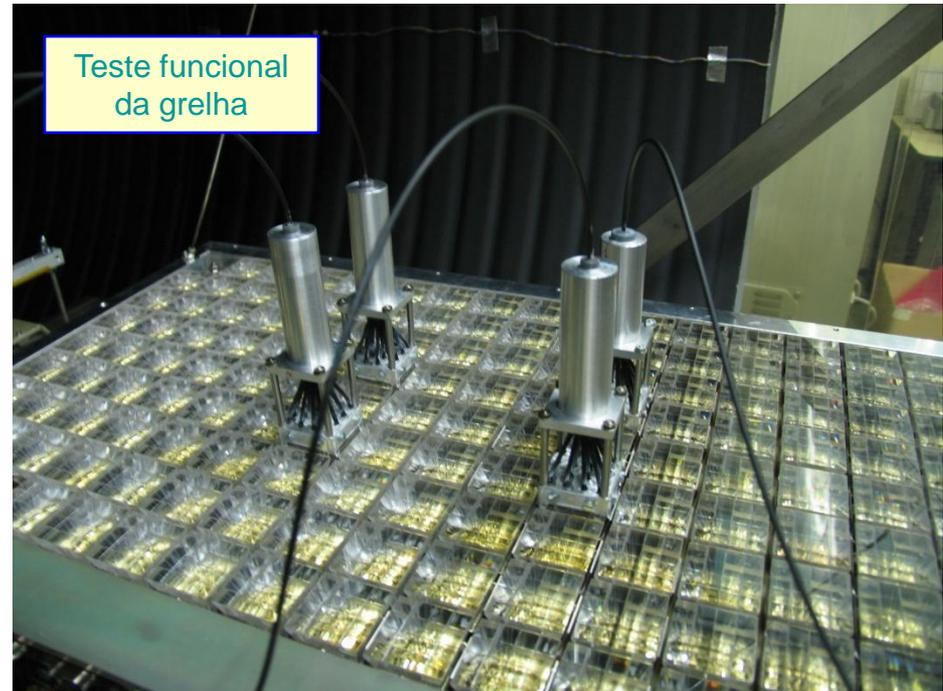
■ Escudo magnético

- ◆ (0.8-1.3 mm)
- ◆ Necessários devido ao elevado campo magnético residual no plano de detecção (~ 300 G)



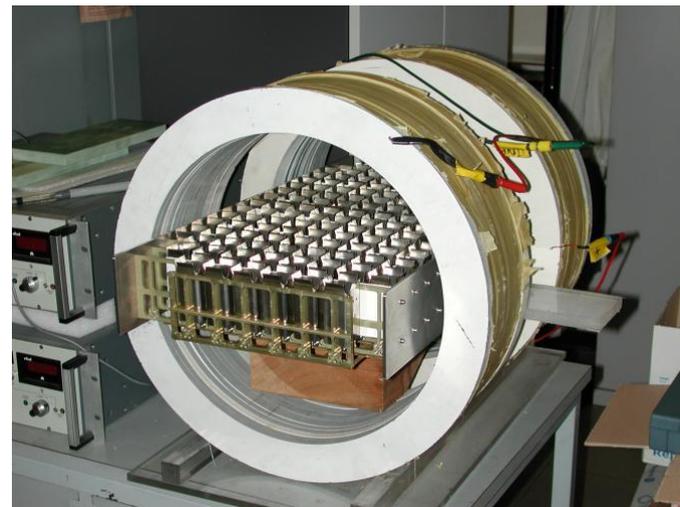
Monitorização: caracterização da célula unitária

- Estudos caracterização das células unitárias feitas no CIEMAT, Madrid
 - Todos PMTs testados
- Uniformidade PMT: distribuição do sinal do fotoelectrão medida é uniforme dentro 5-6%

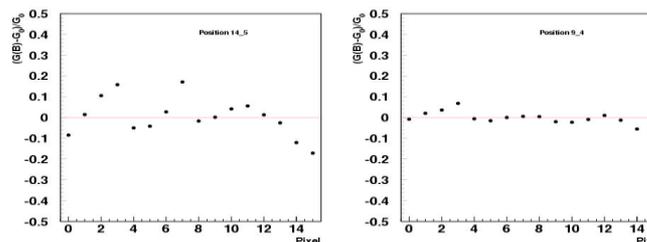
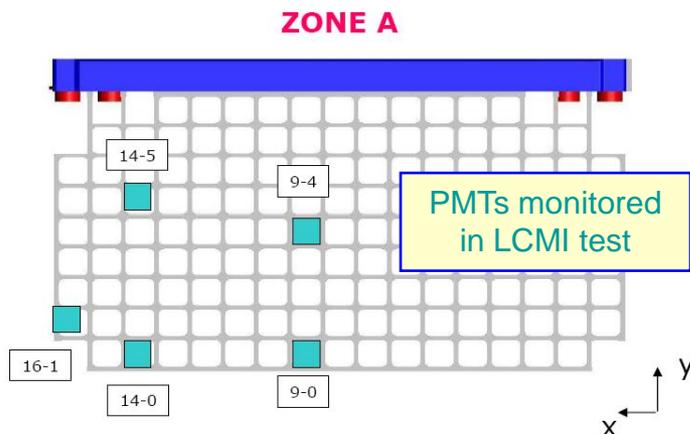


Pre-asse tests: magnetic field

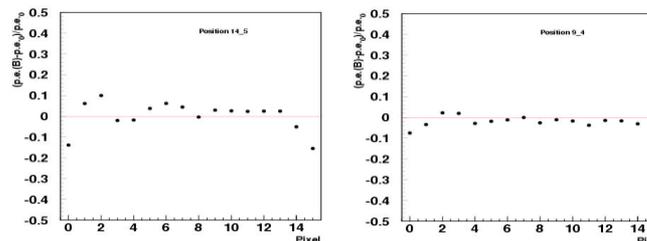
- Magnetic field tests performed at CERN and at LCMI, Grenoble
 - ◆ Expected stray field in PMT grid: up to ~ 300 G
- LCMI test: one rectangular grid, several PMTs monitored in all pixels
 - ◆ No significant change on average PMT gain
 - ★ variation at pixel level observed
 - ★ mean pixel gain variation below 10% in worst case
 - ★ Magnetic field induces cross-talk between pixels



Shielded PMT grid in magnetic field



gain variation



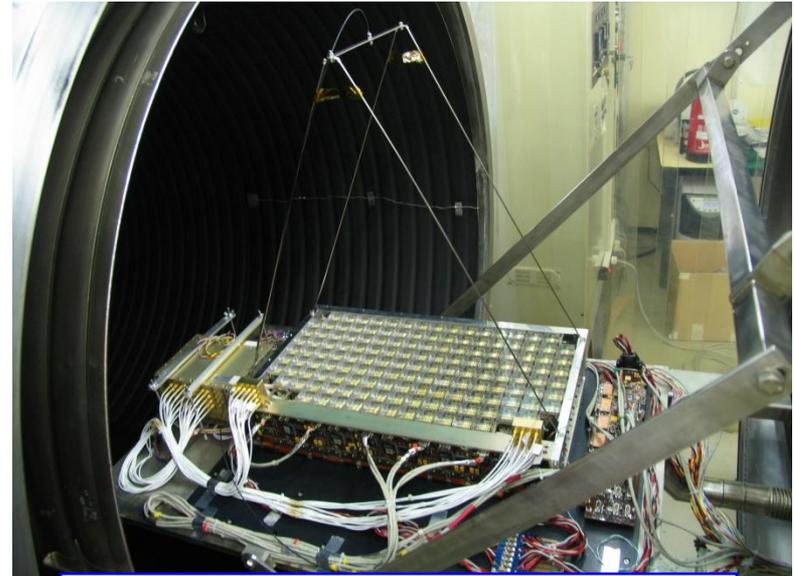
N_{pe} variation

14-5

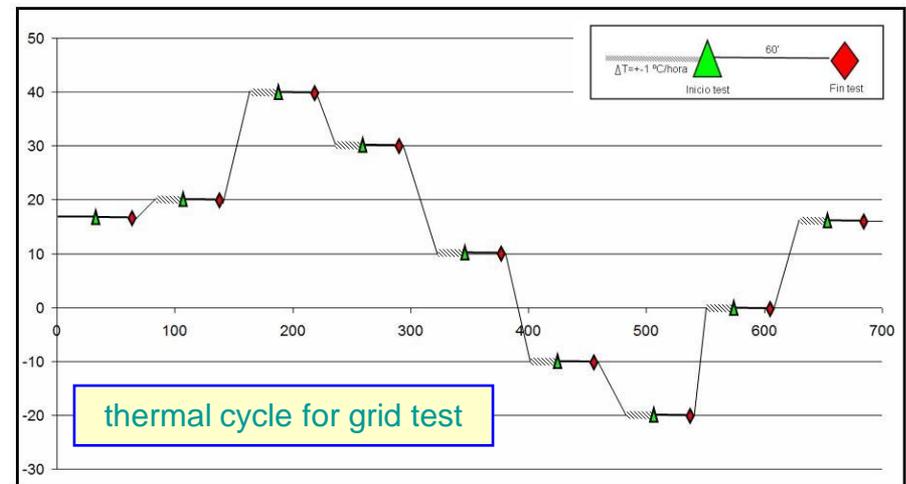
9-4

Pre-assembly tests: thermal & vacuum

- Thermal and vacuum testing performed at CIEMAT
- Thermal cycling performed on individual PMTs (-35°C to 55°C) and on rectangular grid ($\sim 1/5$ of total matrix, -20°C to 40°C)
- Response to single photon measured in temperature range
- Vacuum test performed on rectangular grid



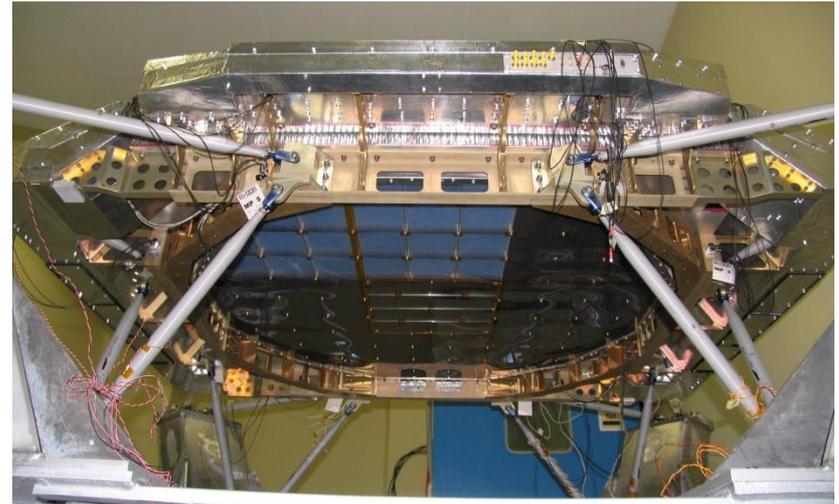
setup for thermal and vacuum tests with grid



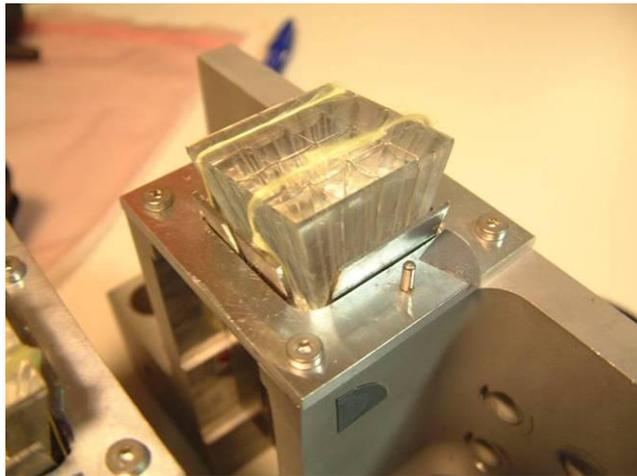
thermal cycle for grid test

Pre-assembly tests: vibration

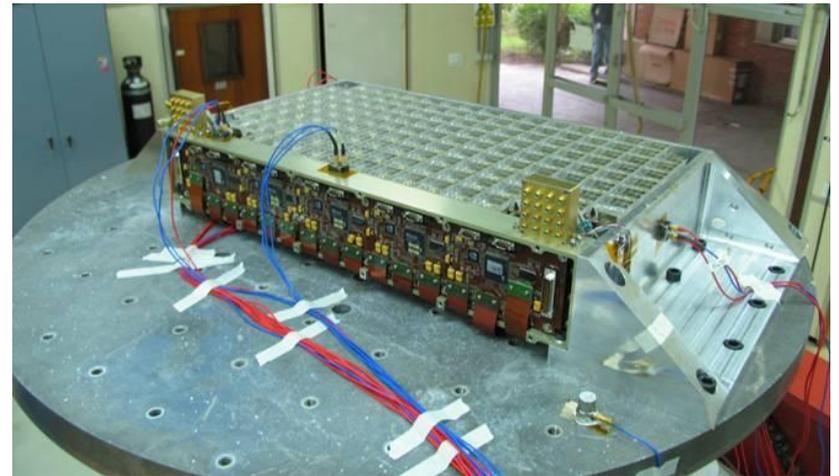
- Test of radiator container at SERMS, Terni
 - ◆ All NaF + 1/4 of aerogel tiles vibrated with lower ToF
- Test of PMT grid at INTA, Madrid
 - ◆ One rectangular grid tested (~1/5 of total matrix)
- Vibration tests also performed on individual unit cells



setup for RICH radiator + ToF vibration test



unit cell in vibration test



setup for grid vibration test