

Vertiefung in die Extraterrestrische Physik

Photonen

Hadronische Wechselwirkungen

Bernd Heber

25.11.2007



Wechselwirkung von Photonen mit Materie

1. Die für Photonen relevanten Energiebereiche sind wie folgt:
 - ★ UV-Licht: eV
 - ★ Röntgenstrahlung (X-rays): eV–keV
 - ★ Gammastrahlung (γ -rays): keV–MeV
2. Beim Durchgang eines Photonstrahls durch Materie bleibt die Energie der im Strahl verbleibenden Photonen unverändert. Es verringert sich allerdings die Intensität des Photonstrahls.

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Die Abschwächung eines Photonstrahls in Materie erfolgt **exponentiell** gemäß der Formel:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$I(x)$... Intensität bei Eindringtiefe x

I_0 ... Intensität des einfallenden Strahls

μ ... Abschwächungs- bzw. Absorptionskoeffizient

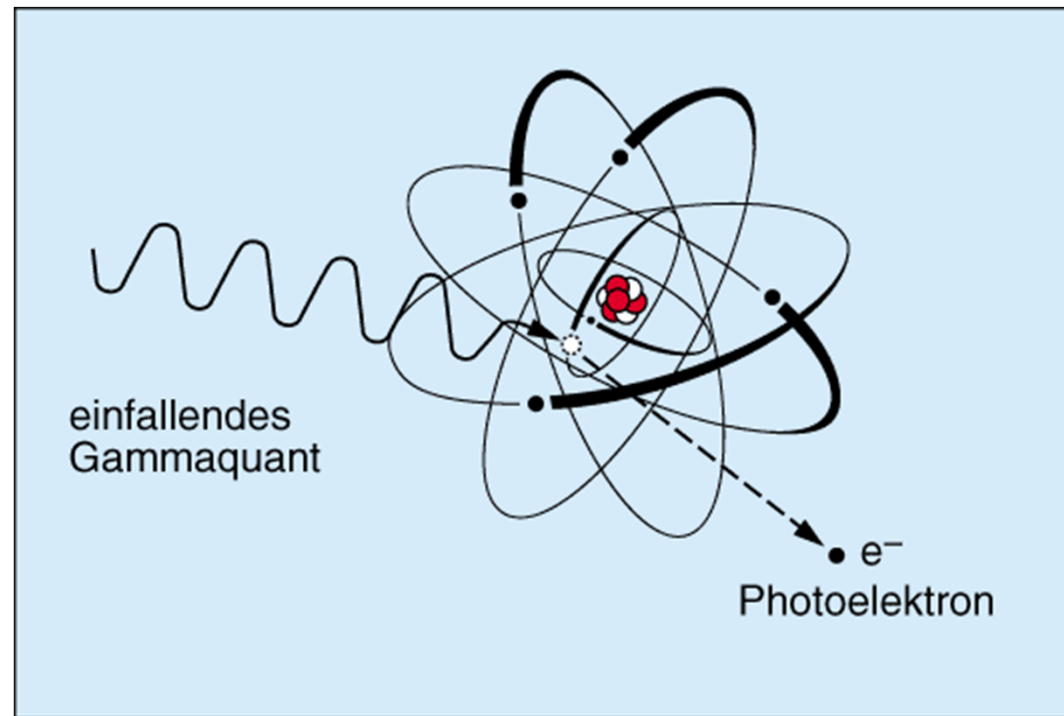
Der **Massenabsorptionskoeffizient*** μ enthält die Wirkungsquerschnitte σ_i für die einzelnen möglichen Wechselwirkungsprozesse der Photonen:

$$\mu = \frac{N_A \rho}{A} \sum_i \sigma_i$$

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

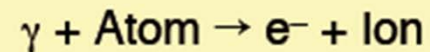
1. Die für Photonen relevanten Energiebereiche sind wie folgt:
 - ★ UV-Licht: eV
 - ★ Röntgenstrahlung (X-rays): eV–keV
 - ★ Gammastrahlung (γ -rays): keV–MeV
2. Beim Durchgang eines Photonstrahls durch Materie bleibt die Energie der im Strahl verbleibenden Photonen unverändert. Es verringert sich allerdings die Intensität des Photonstrahls.
3. Für die Detektion von Photonen sind die folgenden Primärprozesse relevant:
 - ★ niedrige Energie: Photoeffekt
 - ★ mittlere Energie: Compton-Streuung
 - ★ hohe Energie: Paarerzeugung von e^+e^-
4. Die meisten Prozesse absorbieren bzw. streuen einzelne Photonen und entfernen sie dadurch aus dem Strahl.

Photoeffekt



Photoeffekt

Das Photon wird von einem Elektron der Atomhülle absorbiert. Durch die übertragene Energie wird das Elektron freigesetzt:



Aus Impulserhaltungsgünden ist dieser Prozess nur im Feld des Atomkerns, welcher den Rückstoß “auffängt”, möglich – d.h. freie Elektronen können kein Photon absorbieren. Die Energie des freiwerdenden Elektrons beträgt:

$$E_e = E_\gamma - \Phi = h\nu - \Phi$$

E_e	...	kinet. Energie des emittierten Elektrons
E_γ	...	Energie des einfallenden Photons, $E_\gamma = h\nu$
ν	...	Frequenz des einfallenden Photons
Φ	...	Bindungsenergie des Elektrons

Photoeffekt

- ★ Im Energieverlauf des Wirkungsquerschnittes für den Photoeffekt sieht man die Schalenstruktur der Atome. σ_{photo} steigt jedes Mal abrupt an, sobald die Energie des Photons ausreichend ist, um eine Ionisation durch Freisetzen von M-, L- bzw. K-Elektronen des Atoms auszulösen.
- ★ Für Photonenergien oberhalb der “K-Kante” **dominieren die Elektronen der K-Schale** den Photoeffekt.
- ★ Der Photoeffekt zeigt eine **starke Materialabhängigkeit**. Der Wirkungsquerschnitt steigt annähernd mit Z^5 .
- ★ Wichtige Sekundärprozesse nach einem Photoeffekt sind die Emission von charakteristischer Röntgenstrahlung bzw. von Auger-Elektronen.

Photoeffekt

Born'sche Näherung für den Wirkungsquerschnitt (gilt im mittleren Energiebereich, *nicht* nahe einer Absorptionskante und *nicht* im relativist. Bereich):

$$\sigma_{\text{photo}} = 4 \sqrt{2} \alpha^4 \sigma_0 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{7/2} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}}$$

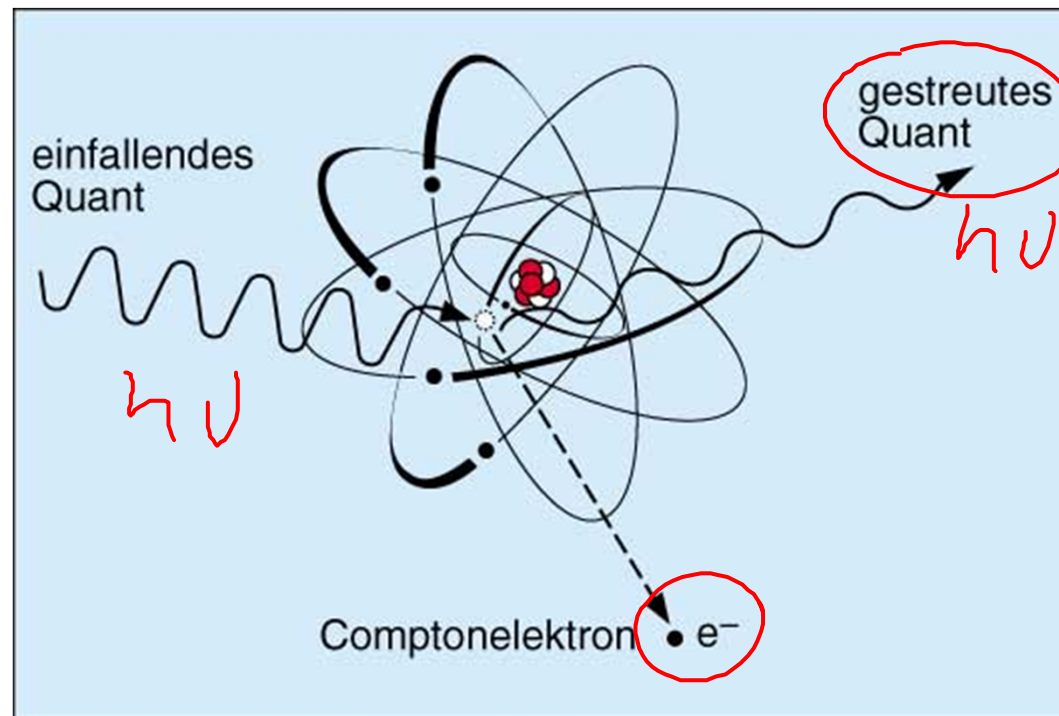
Für hohe Energien ($E_\gamma \gg$ Bindungsenergie der K-Schalen-Elektronen) gilt näherungsweise:

$$\sigma_{\text{photo}} = \frac{3}{2} \alpha^4 \sigma_0 Z^5 \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma}$$

Dabei ist σ_0 der sogenannte Thomson-Wirkungsquerschnitt (elastische Streuung von Photonen an Elektronen):

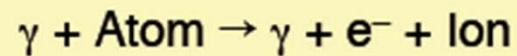
$$\sigma_0 = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 0.66 \text{ barn}$$

Compton-Effekt



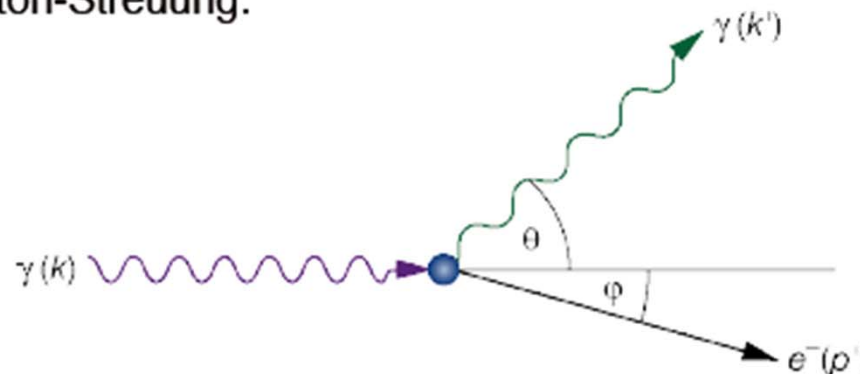
Compton-Effekt

Der Compton-Effekt beschreibt die Streuung eines Photons an einem “quasi-freien” Elektron. (Ist die Photonenergie groß im Vergleich zur Bindungsenergie der Hüllenelektronen, so kann letztere vernachlässigt werden.)



Das Photon wird von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt. Außerdem ändert sich durch den Energieübertrag an das Elektron seine Wellenlänge.

Kinematik der Compton-Streuung:



Compton-Effekt

Die Energie des gestreuten Photons beträgt:

$$E'_\gamma = E_\gamma \left(1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right)^{-1}$$

Dies entspricht einer Wellenlängenänderung von:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Für Detektoren ist die kinet. Energie des Elektrons eine wichtige Größe:

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \frac{\frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

E_e	kinet. Energie des emittierten Elektrons,	m_e ...	Elektronmasse
E_γ, ν, λ	Energie, Frequenz, und Wellenlänge des einfallenden Photons, $E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$		
$E'_\gamma, \nu', \lambda'$...	Energie, Frequenz, und Wellenlänge des gestreuten Photons		
θ	Streuungswinkel des Photons		

Klein – Nishina Formel

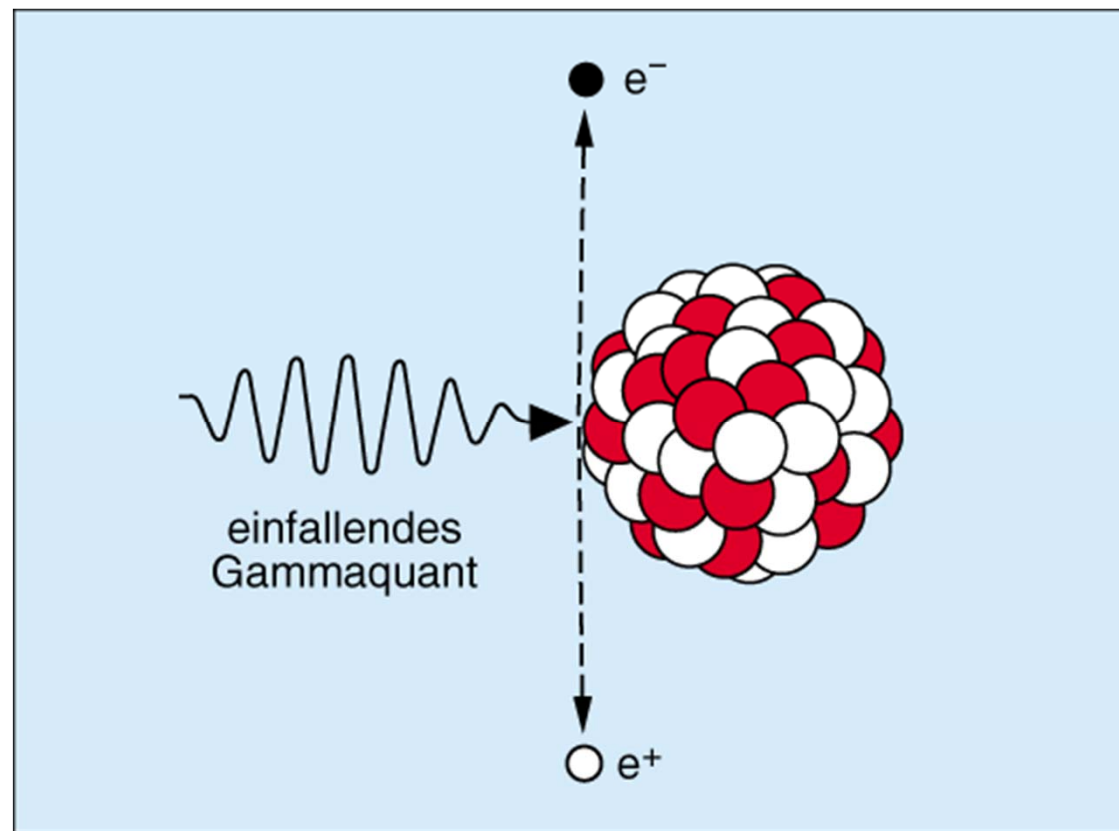
$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \kappa(1 - \cos \theta)]^2} \left(1 + \cos^2 \theta + \frac{\kappa^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \kappa(1 - \cos \theta)} \right)$$

$\kappa = E_\gamma / m_e c^2$... "reduzierte" Photonenergie

Integriert über den gesamten Raumwinkel ergibt sich (*pro Elektron*):

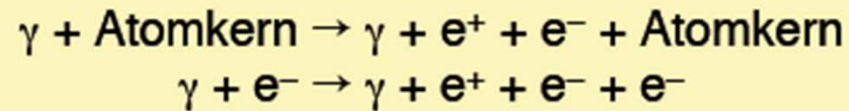
$$\sigma_c = 2\pi r_e \left\{ \frac{1 + \kappa}{\kappa^2} \left[\frac{2(1 + \kappa)}{1 + 2\kappa} - \frac{1}{\kappa} \ln(1 + 2\kappa) \right] + \frac{1}{2\kappa} \ln(1 + 2\kappa) - \frac{1 + 3\kappa}{(1 + 2\kappa)^2} \right\}$$

Paarerzeugung



Paarerzeugung

Paarerzeugung ist die Produktion eines Elektron-Positron-Paares durch ein Photon. Aus Gründen der Impulserhaltung ist dieser Prozess nur im Coulomb-Feld eines Stoßpartners, welcher den Rückstoß aufnimmt, möglich. Der Stoßpartner kann ein Atomkern oder ein Elektron sein; die Paarerzeugung im Feld eines Elektrons ist jedoch gegenüber jener im Kernfeld stark unterdrückt.



Das Photon muß mindestens die Ruhemasse des e^-e^+ -Paares sowie die Rückstoßenergie aufbringen, d.h.:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_{\text{Stoßpartner}}} c^2 > 1.022 \text{ MeV}$$

Bei hohen Energien dominiert die Paarerzeugung unter sämtlichen Photon-Materie-Wechselwirkungen.

Paarerzeugung

Für relativ niedrige Energien muß das Photon dem Atomkern sehr nahe kommen, um eine Paarerzeugung wahrscheinlich zu machen. In diesem Fall wechselwirkt das Photon mit dem “nackten” Kern. Der Wirkungsquerschnitt (pro Atom) in diesem Bereich hängt von der Photonenergie ab:

$$\sigma_{\text{pair, nucl}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{2E_\gamma}{m_e c^2} \right) - \frac{109}{54} \right] \quad \text{für} \quad 1 \ll \frac{E_\gamma}{m_e c^2} < \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

Für sehr hohe Energien ist Paarerzeugung auch bei großen Stoßparametern möglich. In diesem Fall muss aber die Abschirmung des Kernfeldes durch die Atomelektronen berücksichtigt werden. Der Wirkungsquerschnitt (pro Atom) strebt einem energieunabhängigen Grenzwert zu:

$$\sigma_{\text{pair, nucl}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right] \quad \text{für} \quad \frac{E_\gamma}{m_e c^2} > \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

Paarerzeugung

Um näherungsweise auch die Paarerzeugung im Feld der Hüllenelektronen einzubeziehen, muß in der Formel für den Wirkungsquerschnitt einfach der Faktor Z^2 durch $Z(Z+1)$ ersetzt werden.

Für den gesamten Wirkungsquerschnitt pro Materialvolumen muß schließlich noch wie üblich mit der Anzahl der Atome, $N_A \rho / A$, multipliziert werden.

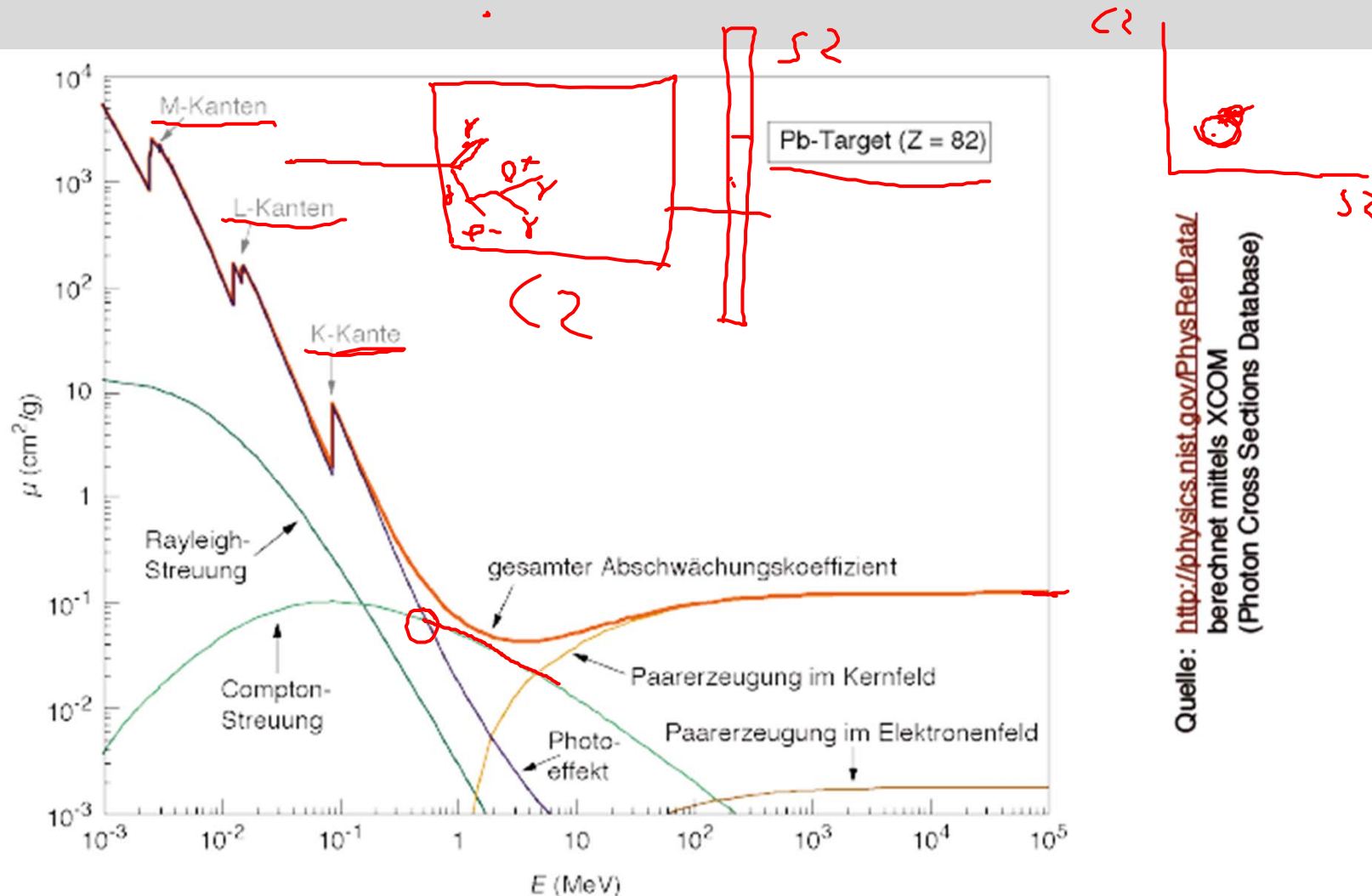
Aus dem gesamten Wirkungsquerschnitt kann man die **mittlere freie Weglänge** eines hochenergetischen Photons für Paarerzeugung berechnen:

$$\lambda_{\text{pair}} = \frac{A}{N_A \rho} \frac{1}{\sigma_{\text{pair, atom}}}$$

Ein Vergleich mit der Strahlungslänge ergibt:

$$\lambda_{\text{pair}} = \frac{9}{7} X_0$$

Wechselwirkung von Photonen mit Materie



Hadronic Interactions (Shower Generation)

Interactions of an incoming hadron
with absorber material (core); strong
interaction : range - 10^{-15} m

neutrons : few probability for charge per
: efficient to get close to
the core.

Hadronic Interactions (Shower Generation)

cross section:

$$\sigma_{\text{total}} = \sum \sigma_i = \sigma_{\text{elastic}} + \sigma_{n,n'}^{\text{inelastic}} + \sigma_{\text{capture}} + \sigma_{\text{fission}}$$

collision length

$$\lambda_c = \frac{A}{n_A} \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}/A} \quad I(x) = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda_c}}$$

Hadronic Interactions (Shower Generation)

Absorption-length:

$$\lambda_A = \frac{A}{N_A \rho} \frac{1}{\sigma_{inelastic}}$$

elastic scattering

$$A(n, n) A$$

inelastic "

$$A(n, n') A^*$$

$$A(n, n, 2) B$$

Hadronic Interactions (Shower Generation)

neutron capture:



fission

Hadronic Interactions (Shower Generation)

Hadronische Wechselwirkungen

Unter hadronischen Ww. faßt man all jene Interaktionen eines einfallenden Hadrons mit einem Atomkern des Targets zusammen, welche auf der starken Wechselwirkung basieren.

Beachte:

- ★ starke Ww. hat nur eine geringe Reichweite
- sehr geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen
- Neutronen (können nur stark ww.) sind sehr durchdringend

Hadronische Wechselwirkung für neutrale Hadronen relevant !
Geladene Hadronen Wechselwirken auch elektromagnetisch.

Hadronische Wechselwirkung

Je nach Projektilenergie ist eine Vielzahl nuklearer Prozesse möglich, z.B.:

- ★ Elastische Streuung: $A(n,n)A$
- ★ Inelastische Streuung: $A(n,n')A^*$, $A(n,2n)B$...
(Kern ist angeregt \rightarrow nachfolgende Emission von γ -Strahlung)
- ★ Neutroneneinfang: $n+(Z,A) \rightarrow \gamma+(Z,A+1)$
- ★ Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen:
 (n,p) , (n,d) , (n,α) , (n,t) , ...
- ★ Kernspaltung (fission)

Hadronische Wechselwirkungen, Wirkungsquerschnitte

Der gesamte hadronische Wirkungsquerschnitt ergibt sich aus der Summe der Wirkungsquerschnitte für die einzelnen Prozesse:

$$\sigma_{\text{total}} = \sum_i \sigma_i = \sigma_{\text{elastic}} + \sigma_{n,n'} (\text{inelastic}) + \sigma_{\text{capture}} + \sigma_{\text{fission}} + \dots$$

Eine wichtige Größe ist die Kernwechselwirkungslänge oder **Kollisionslänge**:

$$\lambda_t = \frac{A}{N_A \rho} \frac{1}{\sigma_{\text{total}}}$$

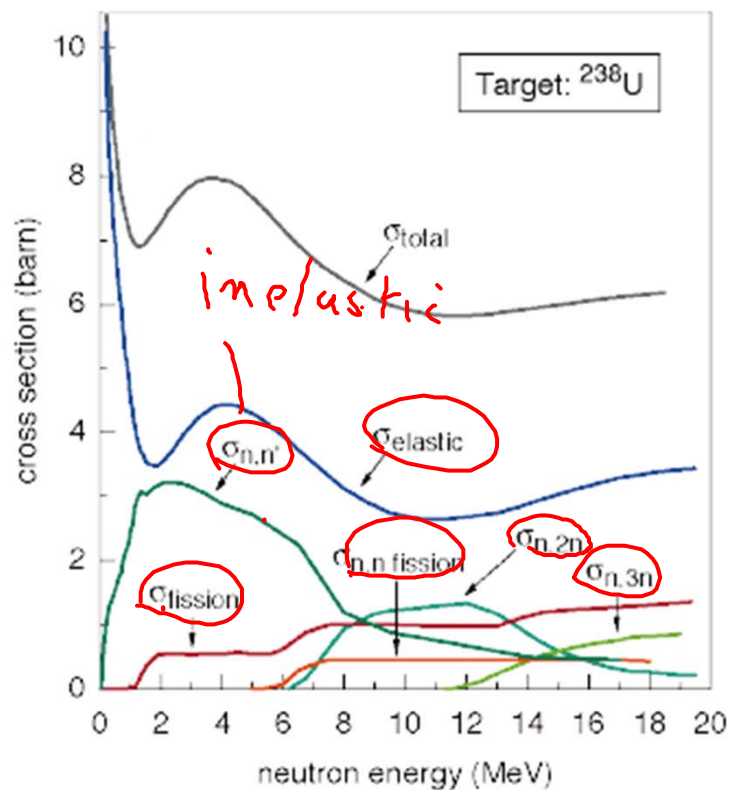
Von ähnlicher Bedeutung wie die Strahlungslänge bei den elektromagnetischen Reaktionen ist bei hadronischen Reaktionen die **Absorptionslänge**:

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \rho} \frac{1}{\sigma_{\text{inelastic}}}$$

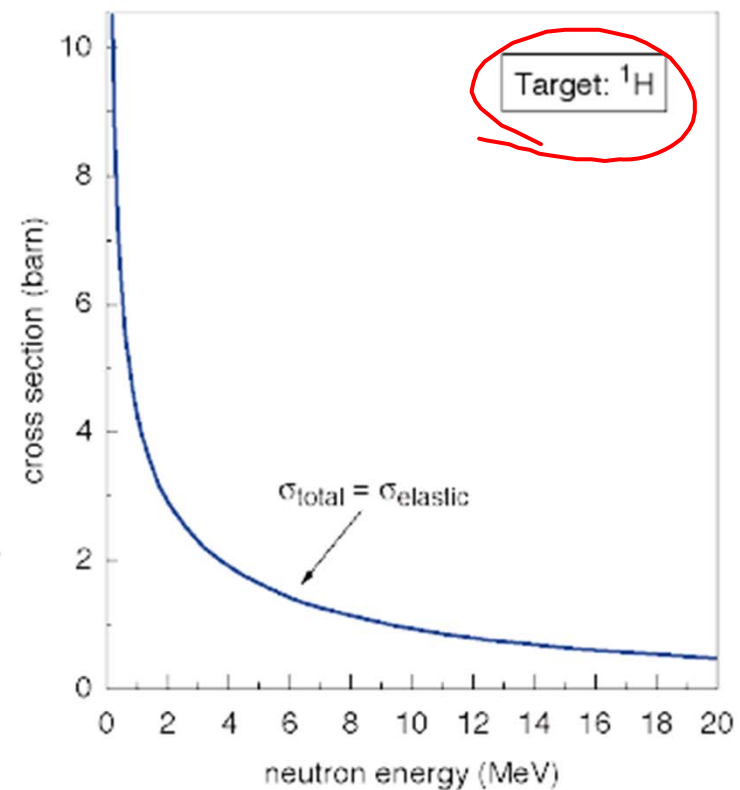
$\sigma_{\text{inelastic}} = \sigma_{\text{total}} - \sigma_{\text{elastic}}$... *gesamter* inelastischer Wirkungsquerschnitt für hadronische Ww.

Cross Sections for hadronic Processes

Hadronische Wirkungsquerschnitte für hochenergetische Neutronen in Uran bzw. in Wasserstoff. (Für Uran sind nicht alle möglichen Teilreaktionen dargestellt.)



Quelle: <http://www-nds.iaea.org:8080/exfor/endl00.htm>
berechnet mittels ENDF (Evaluated Nuclear Data File)



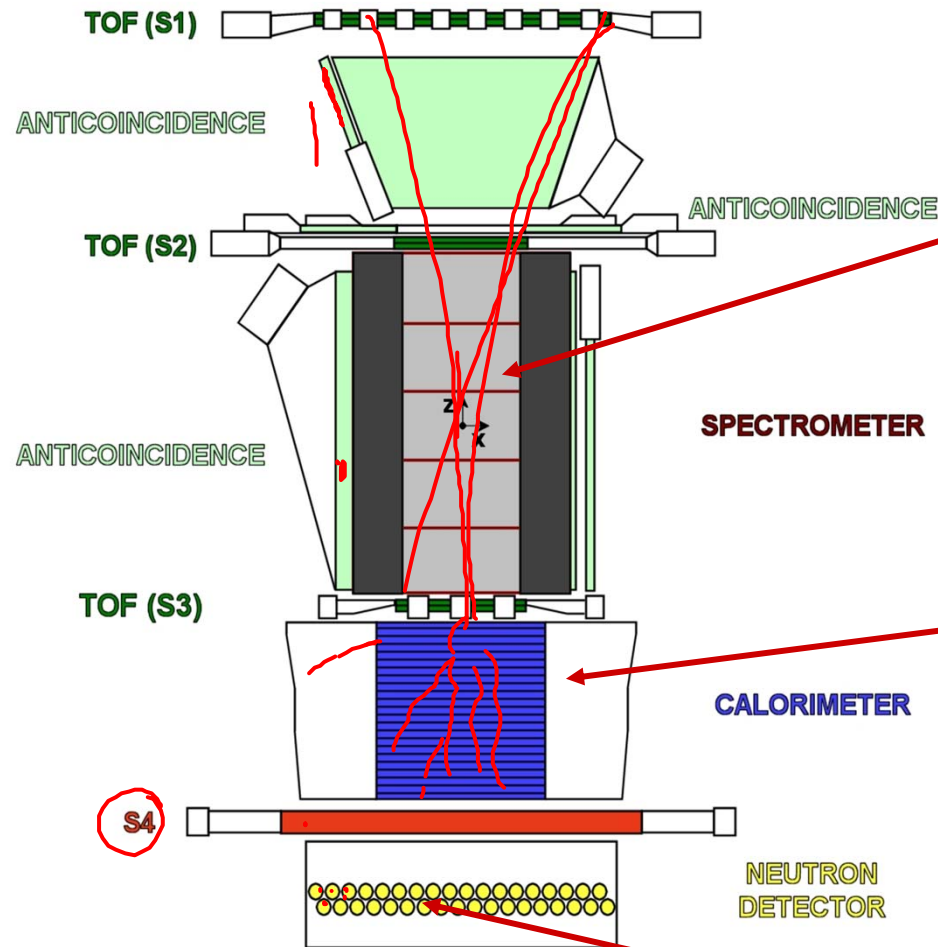
Examples

Wirkungsquerschnitte und Absorptionslängen für hochenergetische Neutronen (≈ 100 GeV) in diversen Materialien:

Material	σ_{tot} (barn)	$\sigma_{\text{inelastic}}$ (barn)	$\lambda_t \rho$ (g/cm ²)	$\lambda_a \rho$ (g/cm ²)	λ_t (cm)
H ₂	0.0387	0.033	43.3	50.8	516.7
C	0.331	0.231	60.2	86.3	26.6
Al	0.634	0.421	70.6	106.4	26.1
Fe	1.120	0.703	82.8	131.9	10.5
Cu	1.232	0.782	85.6	134.9	9.6
Pb	2.960	1.77	116.2	194	10.2
Luft (STP)			62.0	90.0	51.5
H ₂ O			60.1	83.6	60.1
Polystyrol			58.5	81.9	56.7

siehe z.B.: – C. Grupen, *Teilchendetektoren*, BI-Wissenschaftsverlag, 1993

Application: The PAMELA apparatus



Spatial Resolution

- $\cong 2.8 \mu\text{m}$ bending view
- $\cong 13.1 \mu\text{m}$ non-bending view

MDR from test beam data $\cong 1 \text{ TV}$

Calorimeter Performances:

- \bar{p}/e^+ selection eff. $\sim 90\%$
- p rejection factor $\sim 10^5$
- e^- rejection factor $> 10^4$

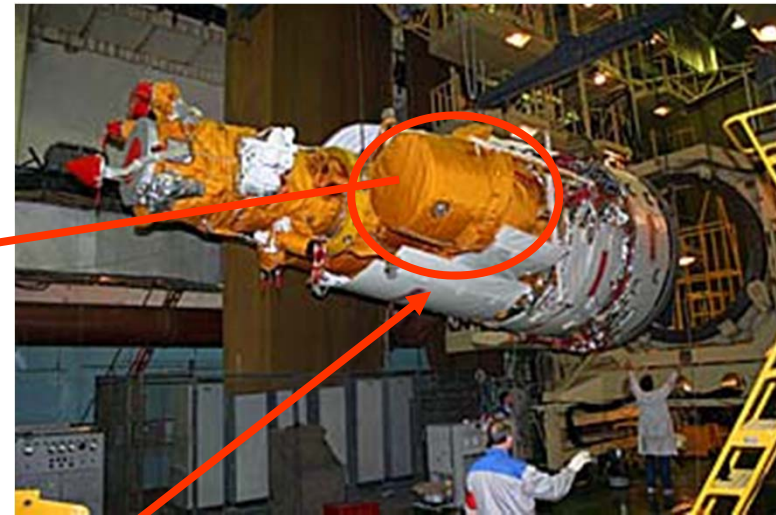
GF $\sim 20.5 \text{ cm}^2\text{sr}$

Mass: 470 kg

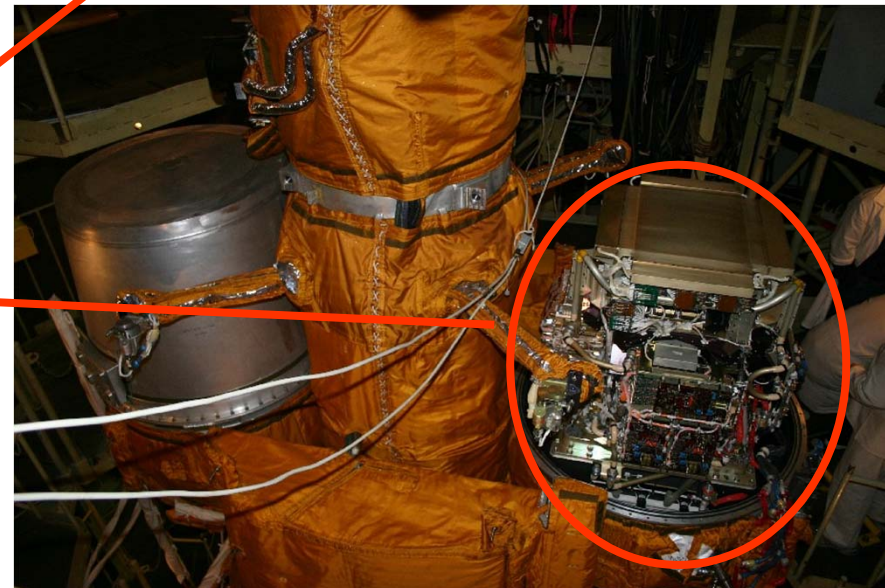
Size: $120 \times 40 \times 45 \text{ cm}^3$

Power Budget: 360 W

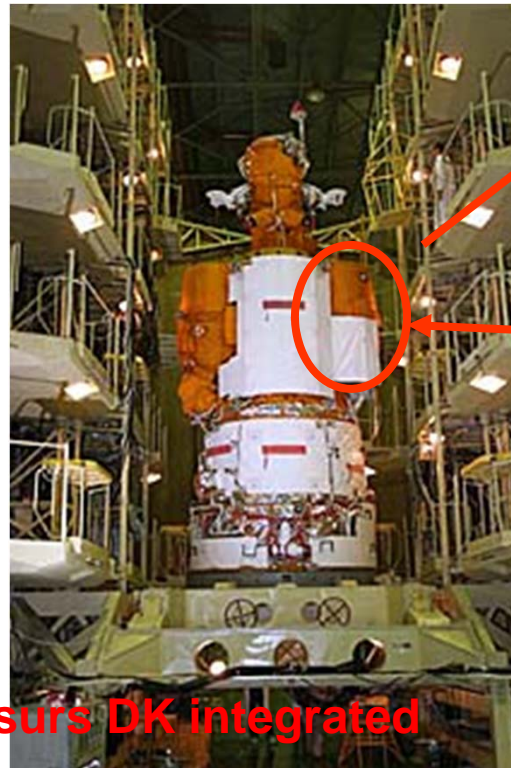
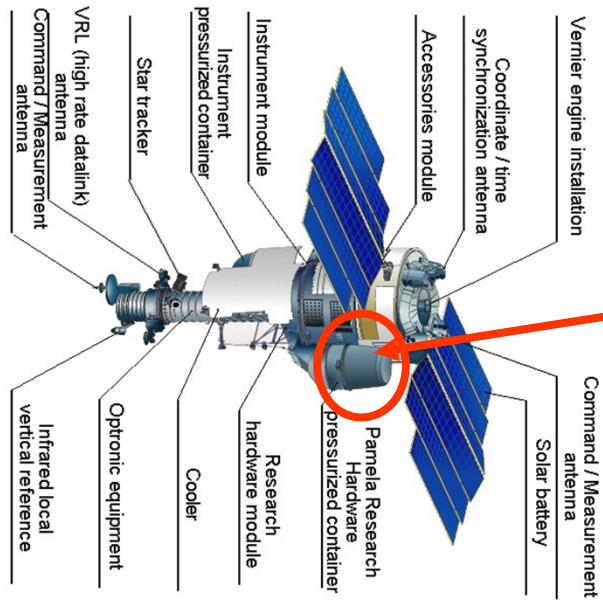
ND p/e separation capabilities > 10
above $10 \text{ GeV}/c$, increasing with energy



Coupling to Soyuz



Pamela during integration in Baikonur



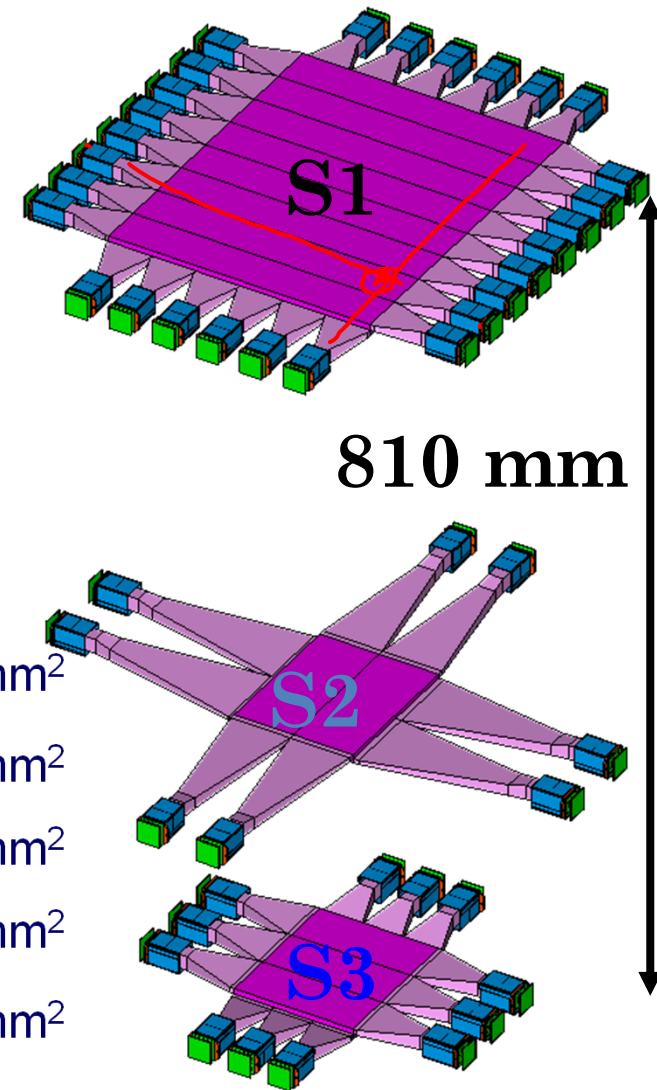
Resurs DK integrated

Time of Flight / Scintillator

- 6 x-y layers arranged on 3 planes;
- 48 channels.
- Albedo rejection dE/dx
- Part ident. Up to 1 GeV with 150ps resolution
- Nuclear identification up to Oxygen
- 3 double-layer scintillator paddles
- Timing resolution:
 - $\sigma(\text{paddle}) \approx \underline{110 \text{ ps}}$
 - $\sigma(\text{ToF}) \approx \underline{330 \text{ ps}}$ (MIPs)

DIMENSIONS

S11	8	330 x 51 mm ²	7 mm	357 mm ²
S12	6	408 x 55 mm ²	7 mm	385 mm ²
S21	2	180 x 75 mm ²	5 mm	375 mm ²
S22	2	150 x 90 mm ²	5 mm	450 mm ²
S31	3	150 x 60 mm ²	7 mm	420 mm ²
S32	3	180 x 50 mm ²	7 mm	350 mm ²



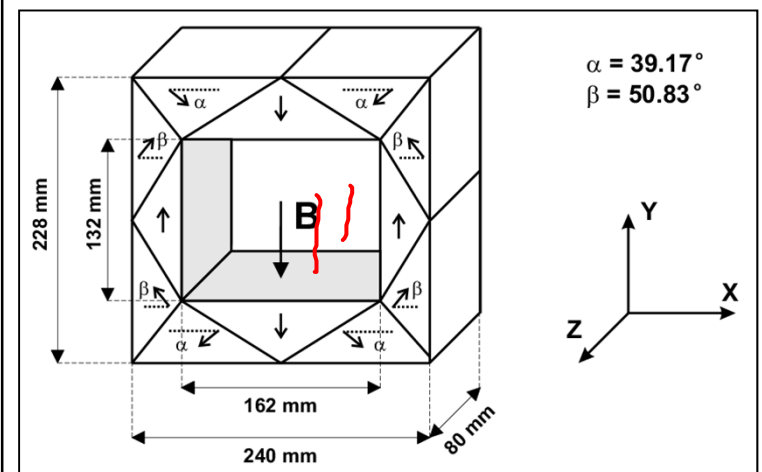
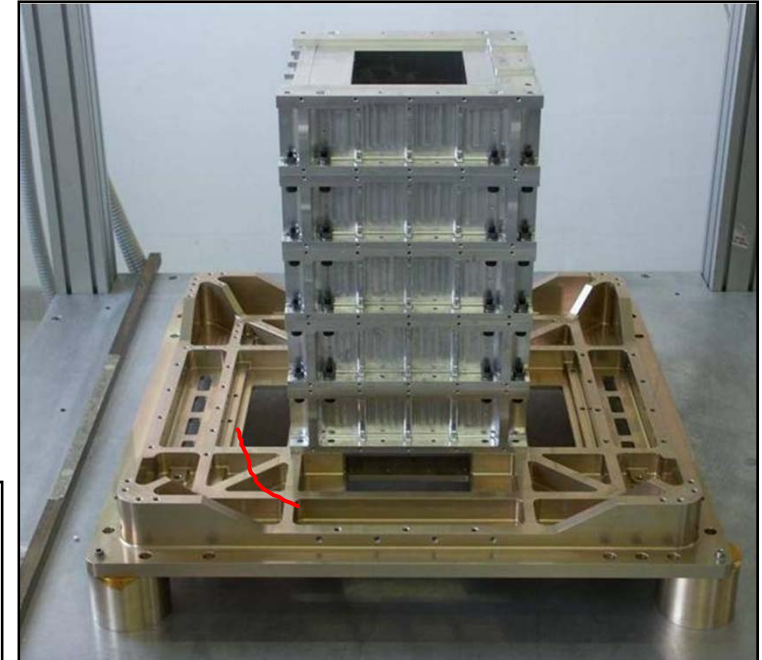
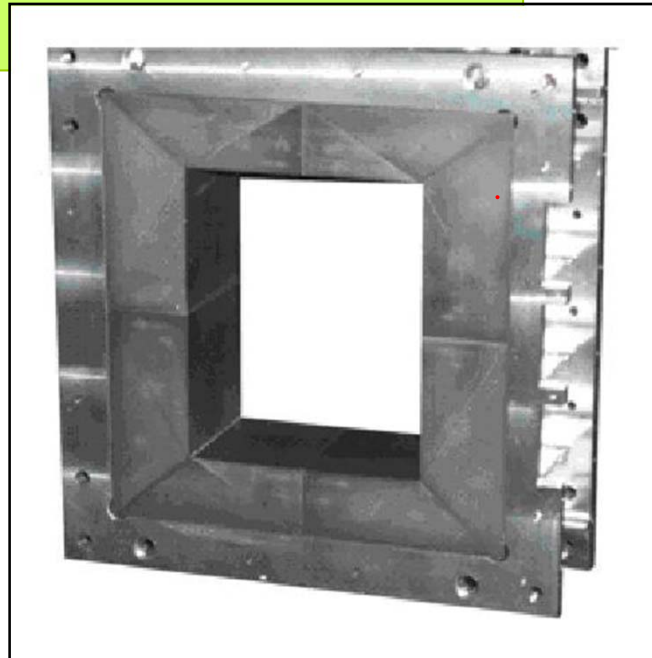
Adapted from W. Menn

15/04/2010

Bern,

The permanent magnet

- 5 magnetic modules
- Permanent magnet (Nd-Fe-B alloy) assembled in an aluminum mechanics
- Magnetic cavity sizes $(132 \times 162) \text{ mm}^2 \times 445 \text{ mm}$
- Field inside the cavity 0.48 T at the center
- Average field along the central axis of the magnetic cavity : 0.43 T
- Geometric Factor: $20.5 \text{ cm}^2\text{sr}$
- Black IR absorbing painting
- Magnetic shields

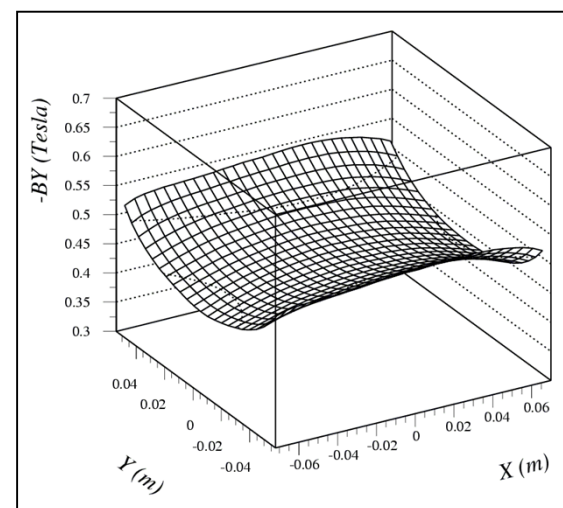
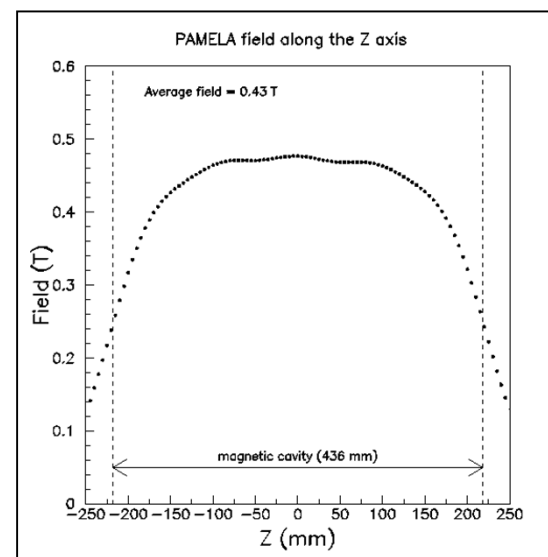


The permanent magnet

- 5 magnetic modules
- Permanent magnet (Nd-Fe-B alloy) assembled in an aluminum mechanics
- Magnetic cavity sizes $(132 \times 162) \text{ mm}^2 \times 445 \text{ mm}$
- Geometric Factor: **20.5 cm²sr**
- Black IR absorbing painting
- Magnetic shields

MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS

- Gaussmeter (F.W. Bell) equipped with 3-axis probe mounted on a motorized positioning device (0.1mm precision)
- Measurement of the three components in 67367 points 5mm apart from each other
- Field inside the cavity 0.48 T at the center
- Average field along the central axis of the magnetic cavity : **0.43 T**
- Good uniformity
- Measurement of external magnetic field – magnetic momentum < 90 Am²



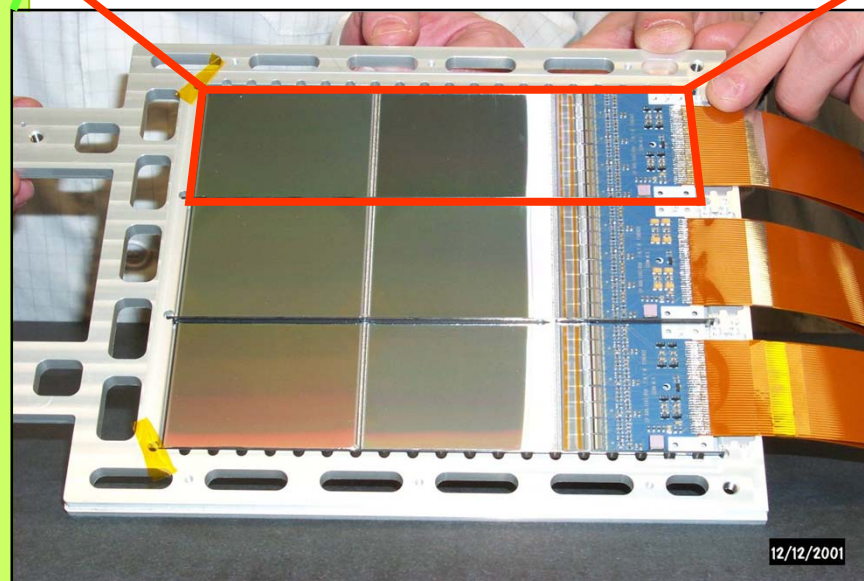
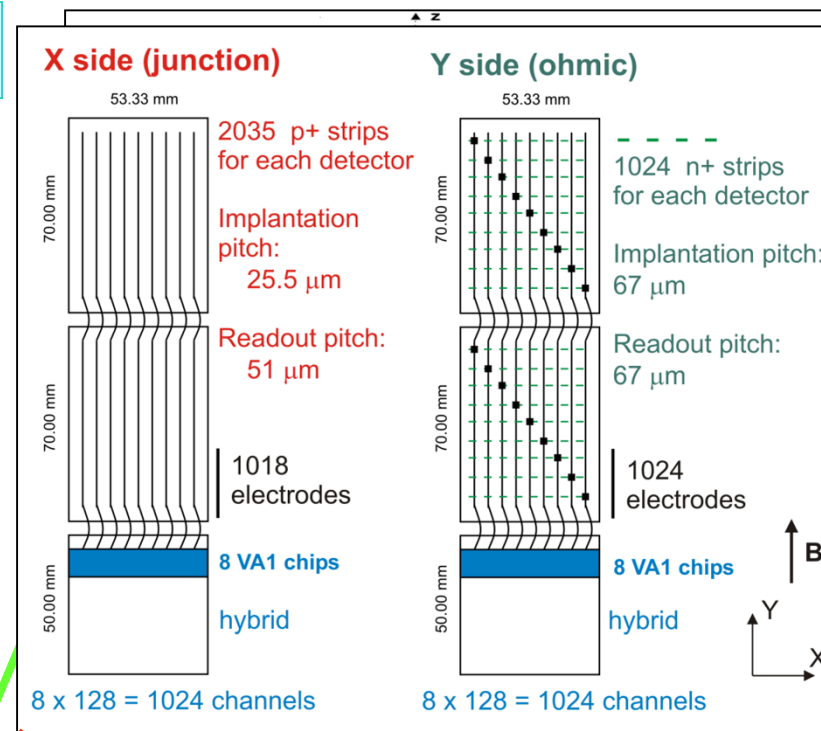
Valeria Di Felice

Bern,

The tracking system

6 detector planes composed by 3 “ladders”

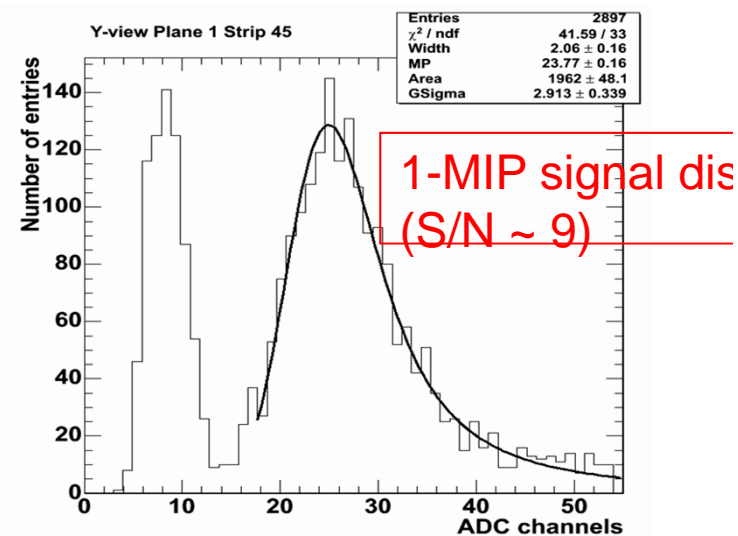
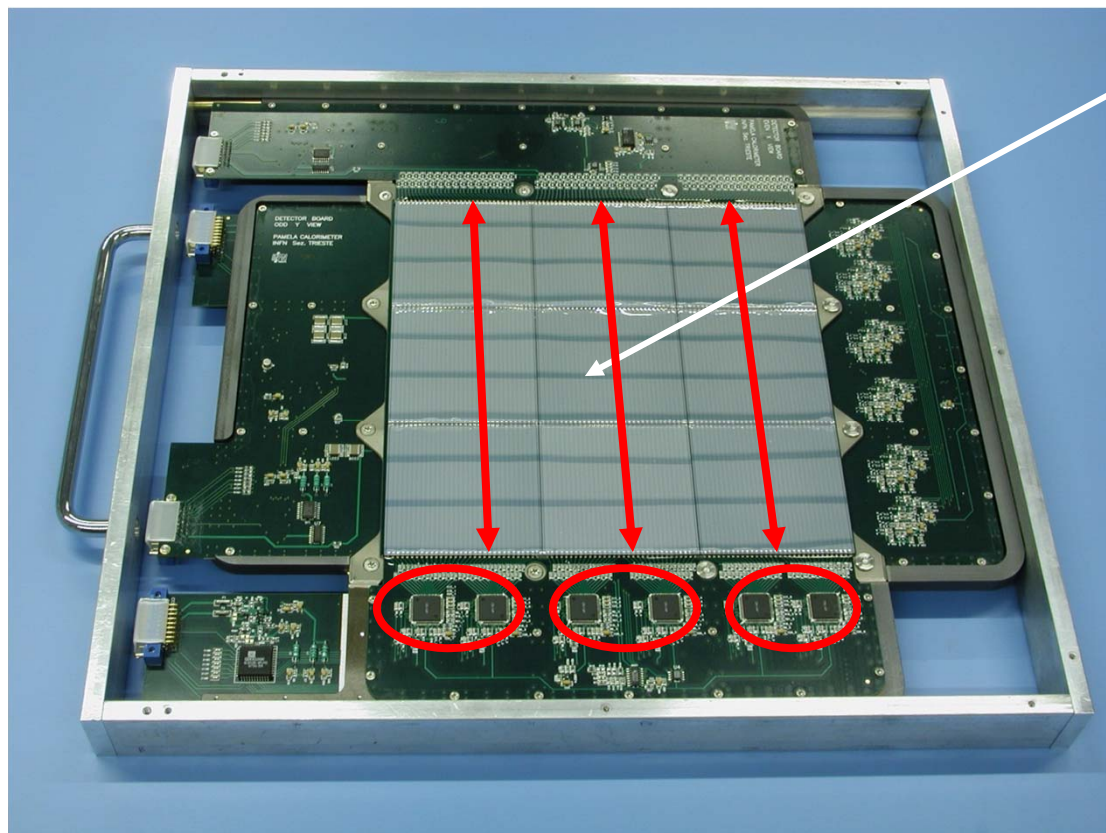
- Mechanical assembly
 - no material above/below the plane (1 plane = 0.3% X_0)
 - carbon fibers stiffeners glued laterally to the ladders
- ladder : - 2 microstrip silicon sensors
- 1 “hybrid” with front-end electronics
- silicon sensors (Hamamatsu):
 - 300 mm, Double Sided - x & y view
 - Double Metal - No Kapton Fanout
 - AC Coupled - No external chips
- FE electronics: VA1 chip
 - Low noise charge preamplifier -
 - Operating point set for optimal compromise:
 - total FE dissipation: 37 W on 36864 channels
 - Dynamic range up to 10 MIP
- DAQ: 12 DSPs
 - data compression (>95%)
 - on-line calibration (PED,SIG,BAD)



Imaging Calorimeter

44 Si detector views (22X and 22Y)

- 8x8 cm² detectors arranged in a 3x3 matrix
- 32 strips/detector, 2.4 mm pitch
- Strips of detectors in the same row (column) are bonded together (ladder) \Rightarrow 24 cm long strips
- Each ladder (32 channels) is read out by 2 CR1.4P front-end chips \Rightarrow 6 front-end chips/view
- In total:
 - 396 silicon detectors
 - 264 CR1.4P chips
 - 4224 channels



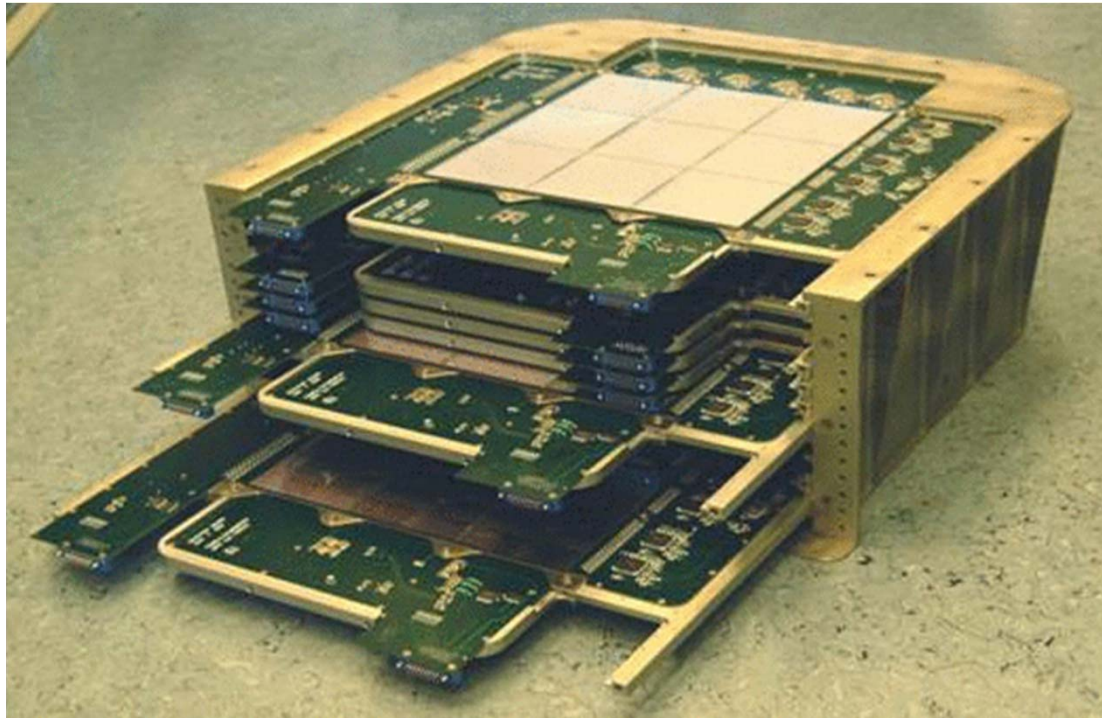
Valeria Di Felice

From V. Bonvicini

Berl

15/04/2010

Imaging Calorimeter



- **Main tasks:**
 - lepton/hadron discrimination
 - $e^{+/-}$ energy measurement
- **Characteristics:**
 - 22 W plates (2.6 mm / $0.74 X_0$)
 - 44 Si layers (X-Y), 380 μm thick
 - Total depth: $16.3 X_0$ / $0.6 \lambda_I$
 - 4224 channels
 - Self-triggering mode option ($> 300 \text{ GeV}$; $\text{GF} \sim 600 \text{ cm}^2 \text{ sr}$)
 - Mass: 110 kg
 - Power Consumption: 48 W
- **Design performance:**
 - p, e^+ selection efficiency $\sim 90\%$
 - p rejection factor $\sim 10^5$
 - e rejection factor $> 10^4$
 - Energy resolution $\sim 5\% @ 200 \text{ GeV}$

Valeria Di Felice

Adapted from V. Bonvicini

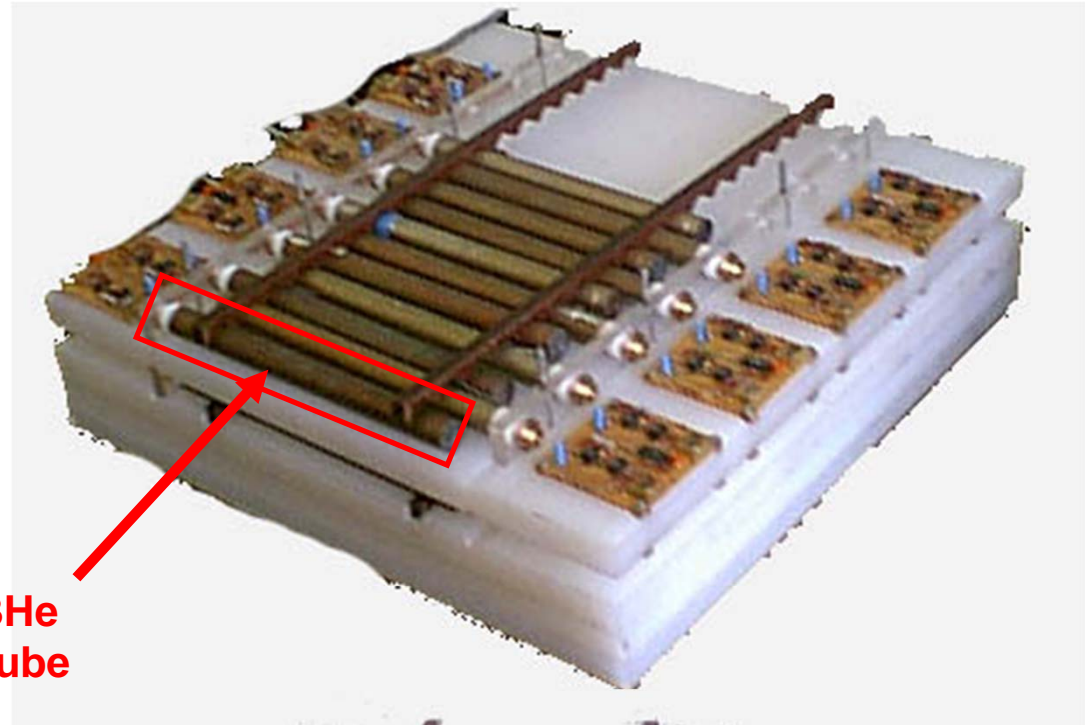
15/04/2010

Bern,

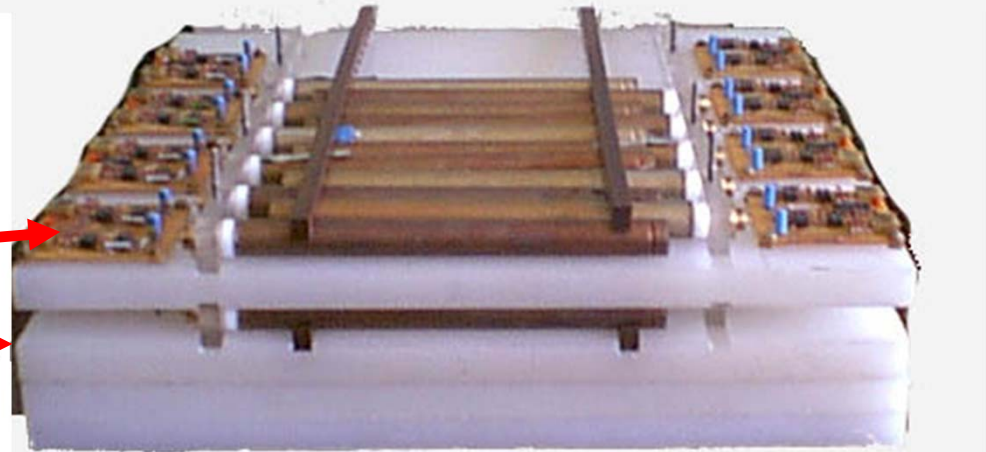
Neutron Detector

Lebedev Physical Institute Academy of Science, Russia

- 36 ^3He containers (2 planes)
- 9.5 cm polyethylene moderator enveloped in thin cadmium layer.
- 60x55x15 cm³, 30 kg, 10 W
- (10% eff for $E < 1\text{ MeV}$ n)
- Triggered counts
- Background counting



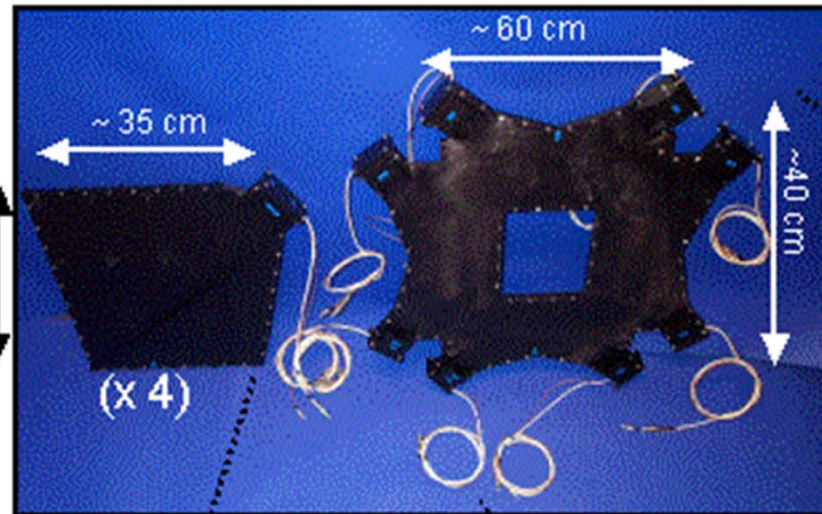
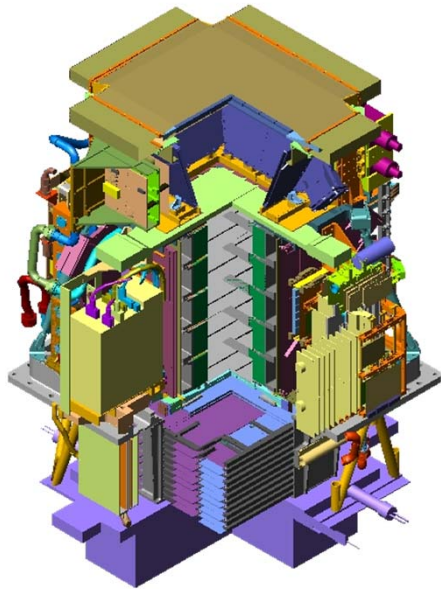
3He
tube



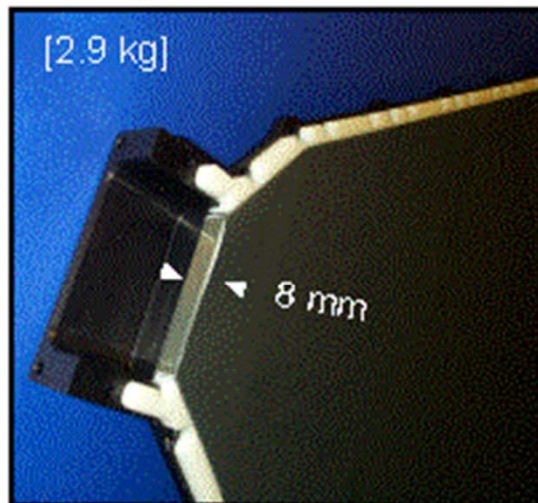
Plane 1

Plane 2

The Anticoincidence Systems



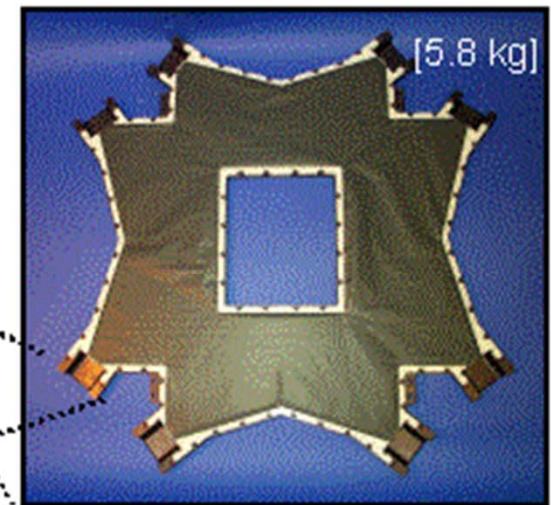
Anticoincidences are mounted on the sides, top and interscintillator area. They are used to reject false triggers coming from the satellite



[Bicron BC-448M]



[Hamamatsu R5900U]

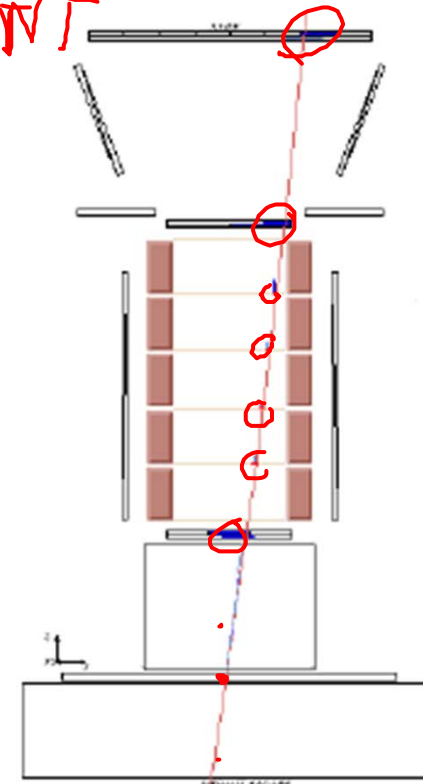
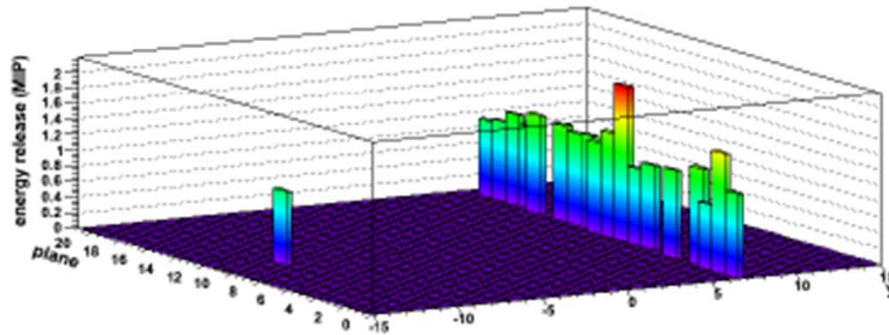
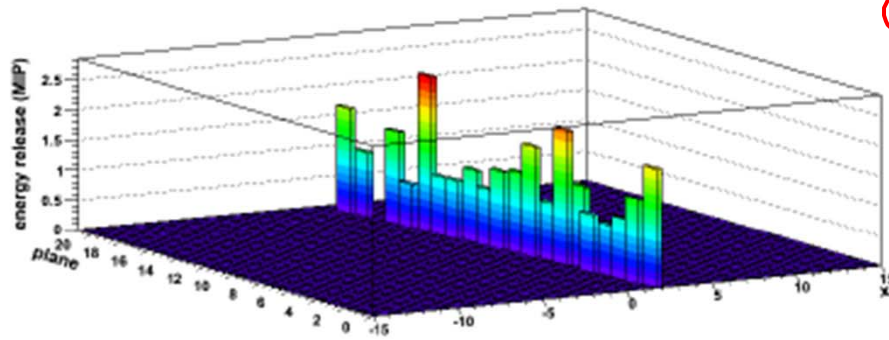


[3M Tedlar / Tyvek]

Non interacting proton in the calorimeter

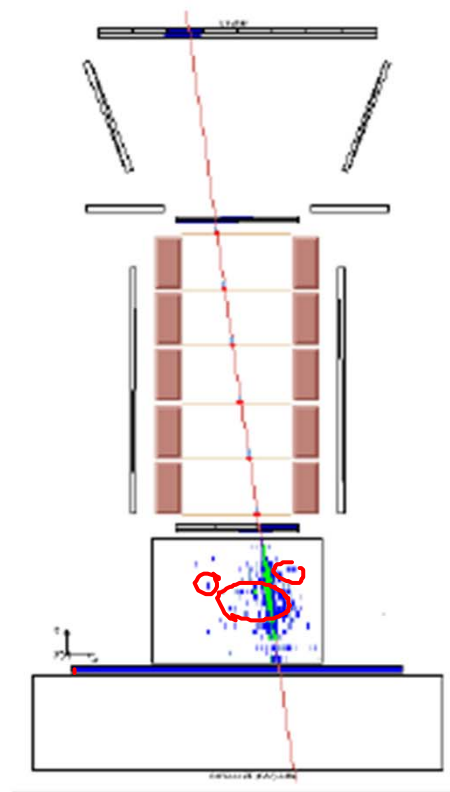
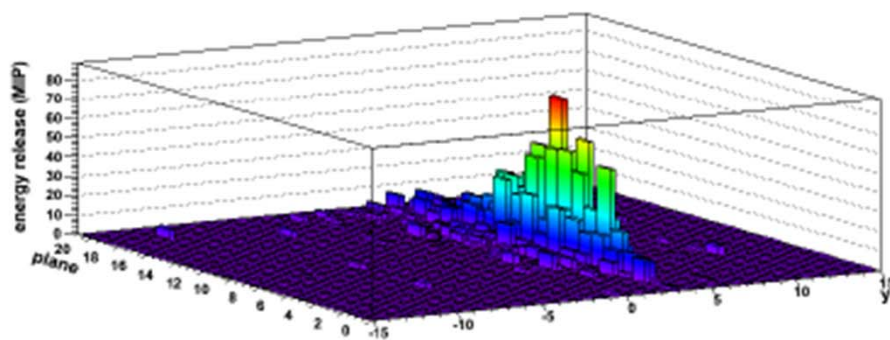
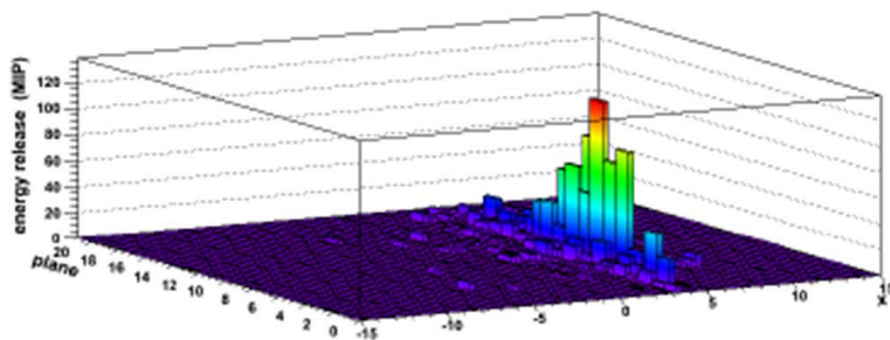
Generation and Tracking of Particles

GEANT



FLUKA

Positron in the calorimeter

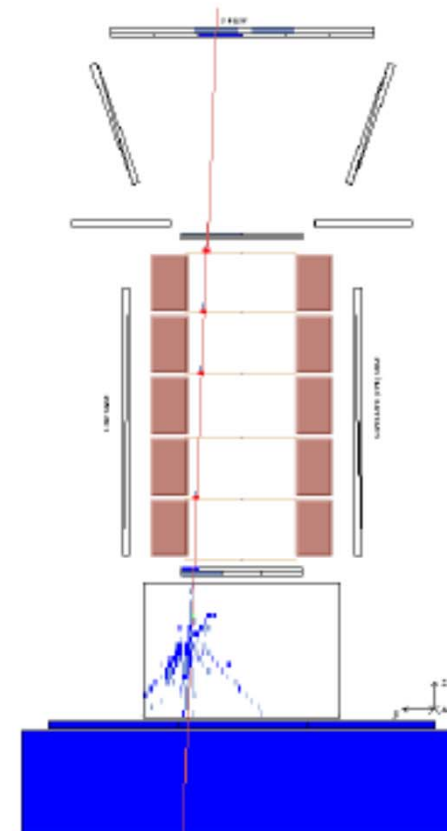
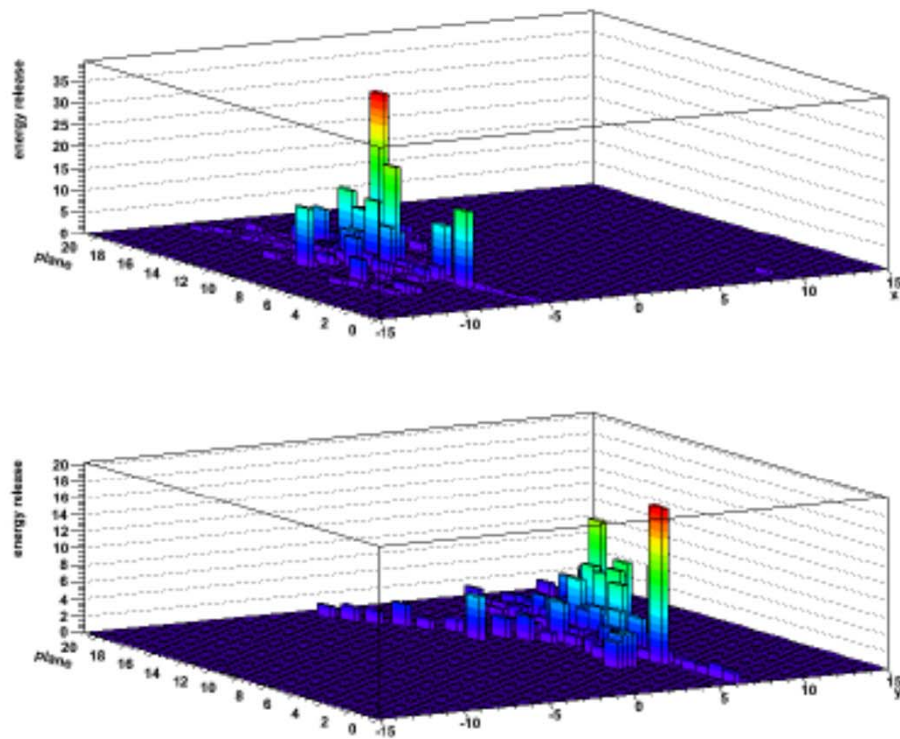


Valeria Di Felice

Bern,

15/04/2010

Interacting proton in the calorimeter

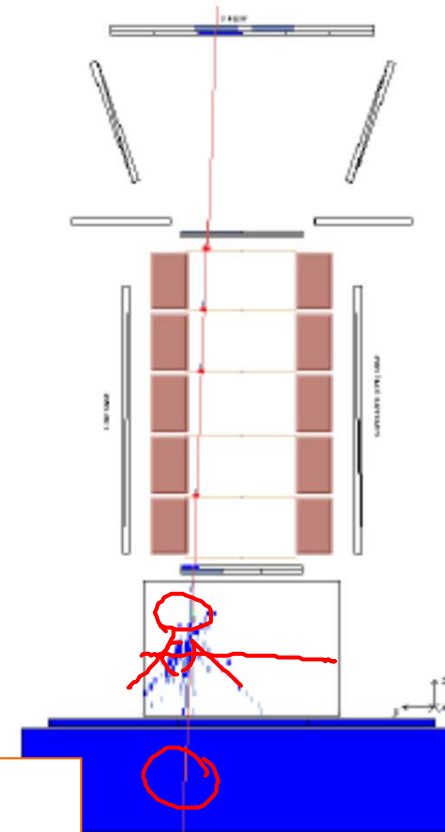
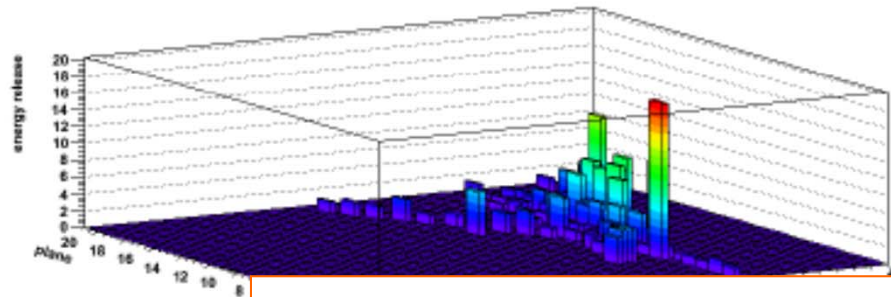
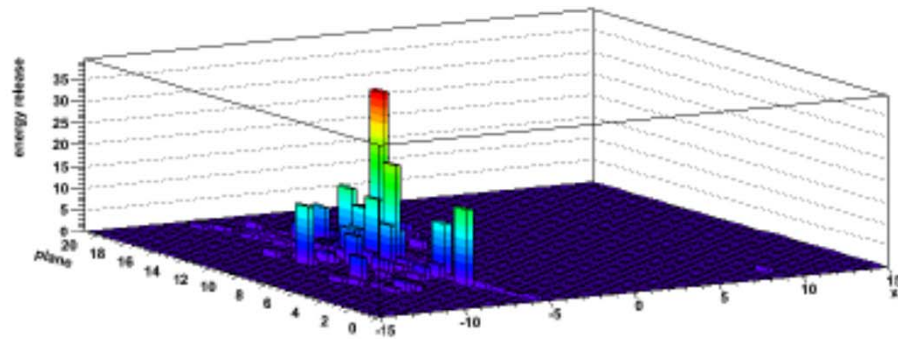


Valeria Di Felice

Bern,

15/04/2010

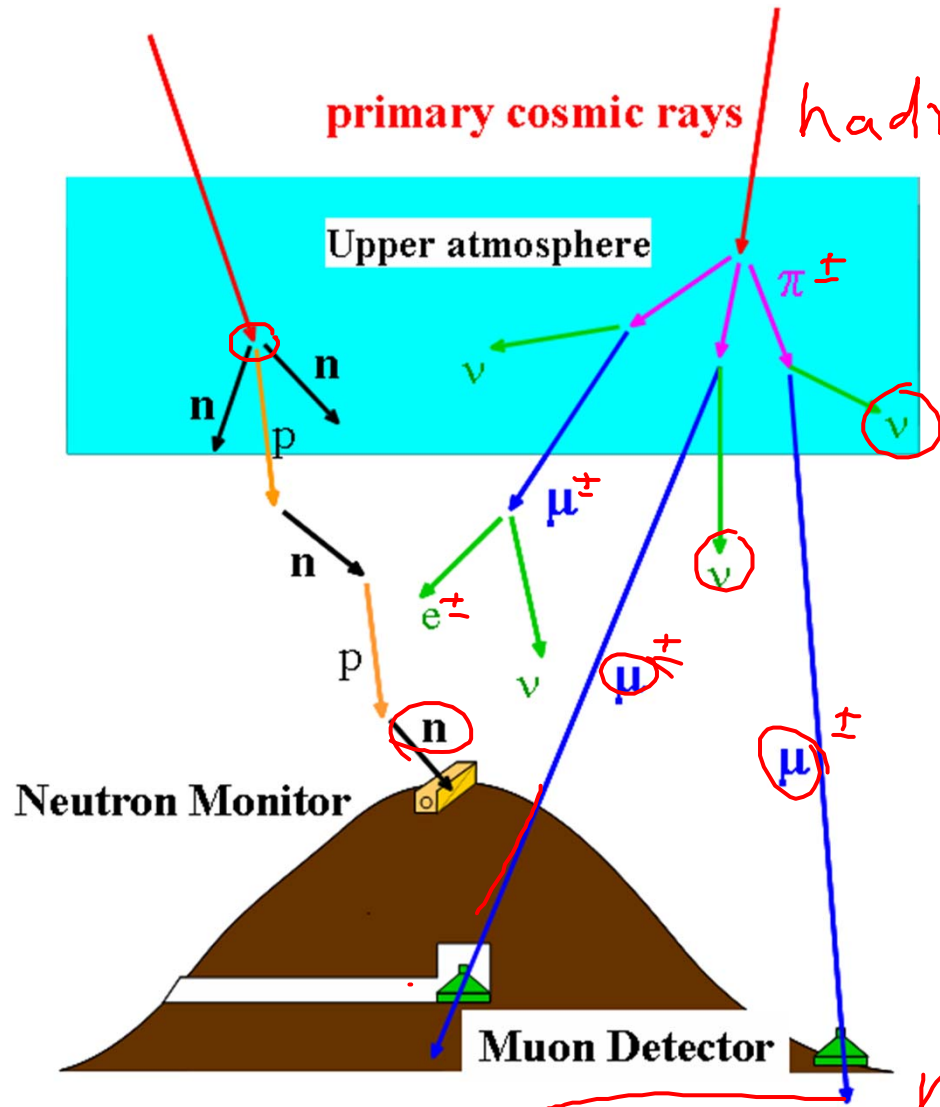
Interacting proton in the calorimeter



CALORIMETER CRITERIA

- Longitudinal profile
- Lateral profile
- Topological development
- Shower starting point

OBSERVATION OF COSMIC RAYS WITH GROUND-BASED DETECTORS

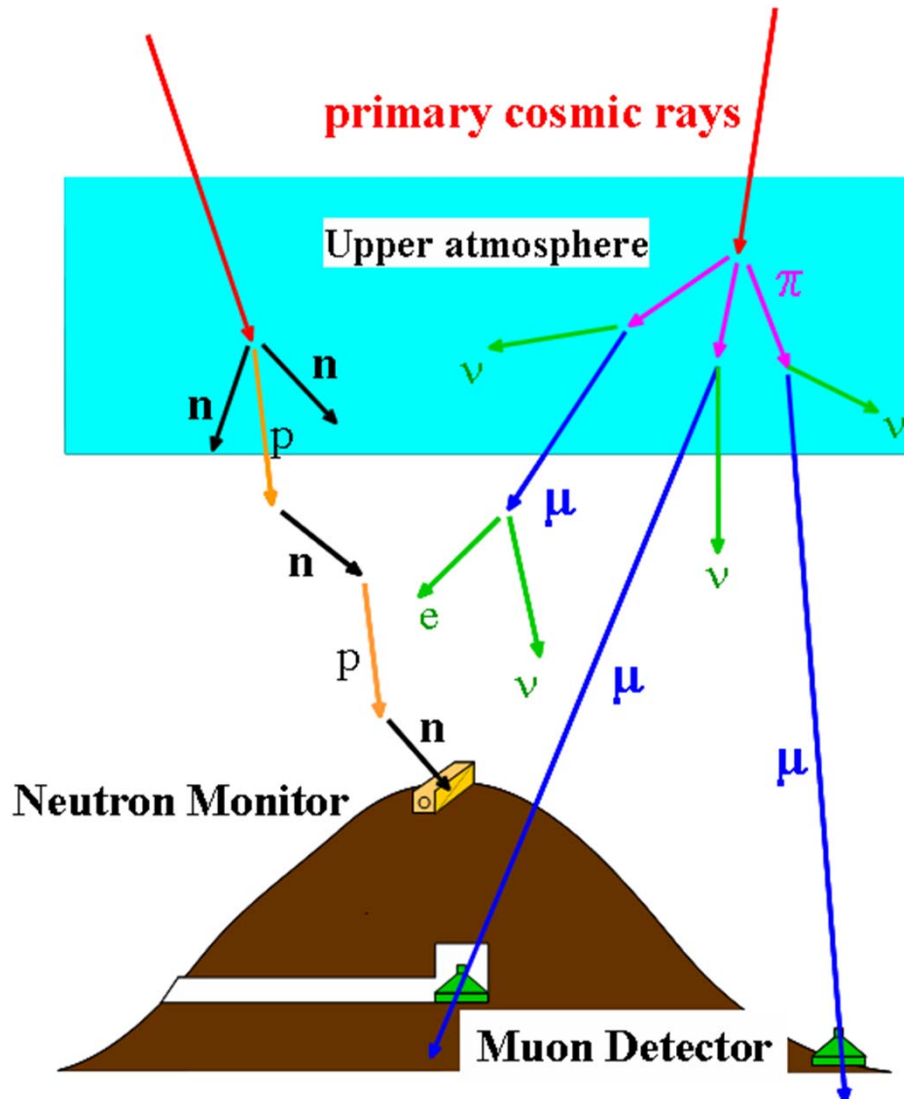


Most common
detectors on
ground are

- Muon telescope
50 GeV
- Neutron monitor
 $\sim 1-10$ GeV

Kamiokande

OBSERVATION OF COSMIC RAYS WITH GROUND-BASED DETECTORS



- Ground-based detectors measure byproducts of the interaction of primary cosmic rays (predominantly protons and helium nuclei) with Earth's atmosphere
- Two common types:
 - Neutron Monitor Typical energy of primary: ~1 GeV for solar cosmic rays, ~10 GeV for Galactic cosmic rays
 - Muon Detector / Hodoscope Typical energy of primary: ~50 GeV for Galactic cosmic rays (surface muon detector)

NEUTRON MONITORS

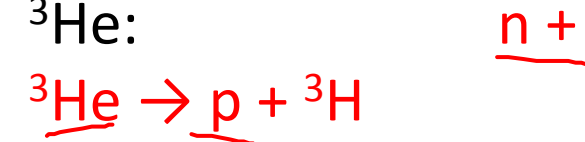


Neutron Monitor in Nain, Labrador
Construction completed November 2000

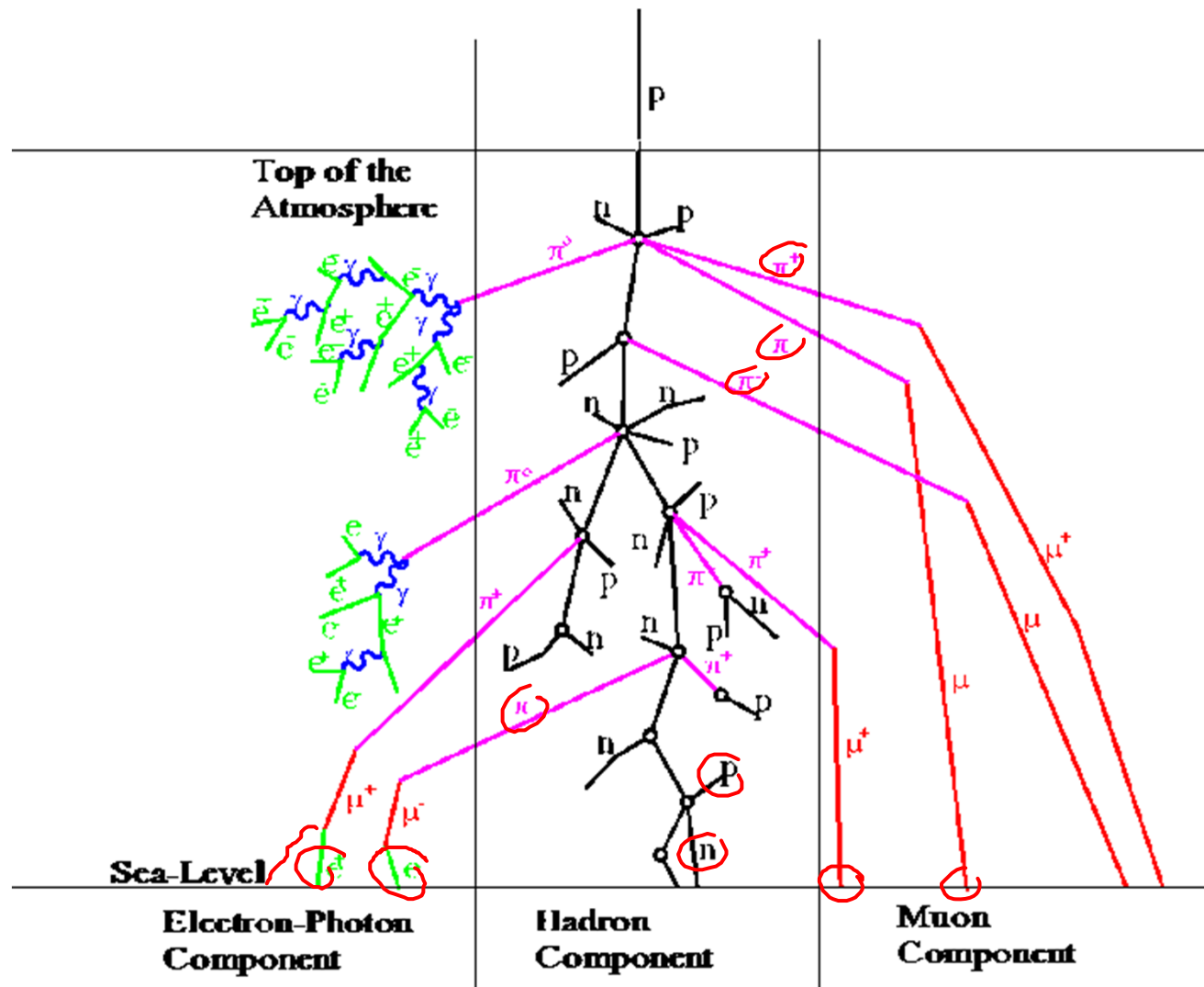
- Older type “BP28” – proportional counter filled with BF_3 :

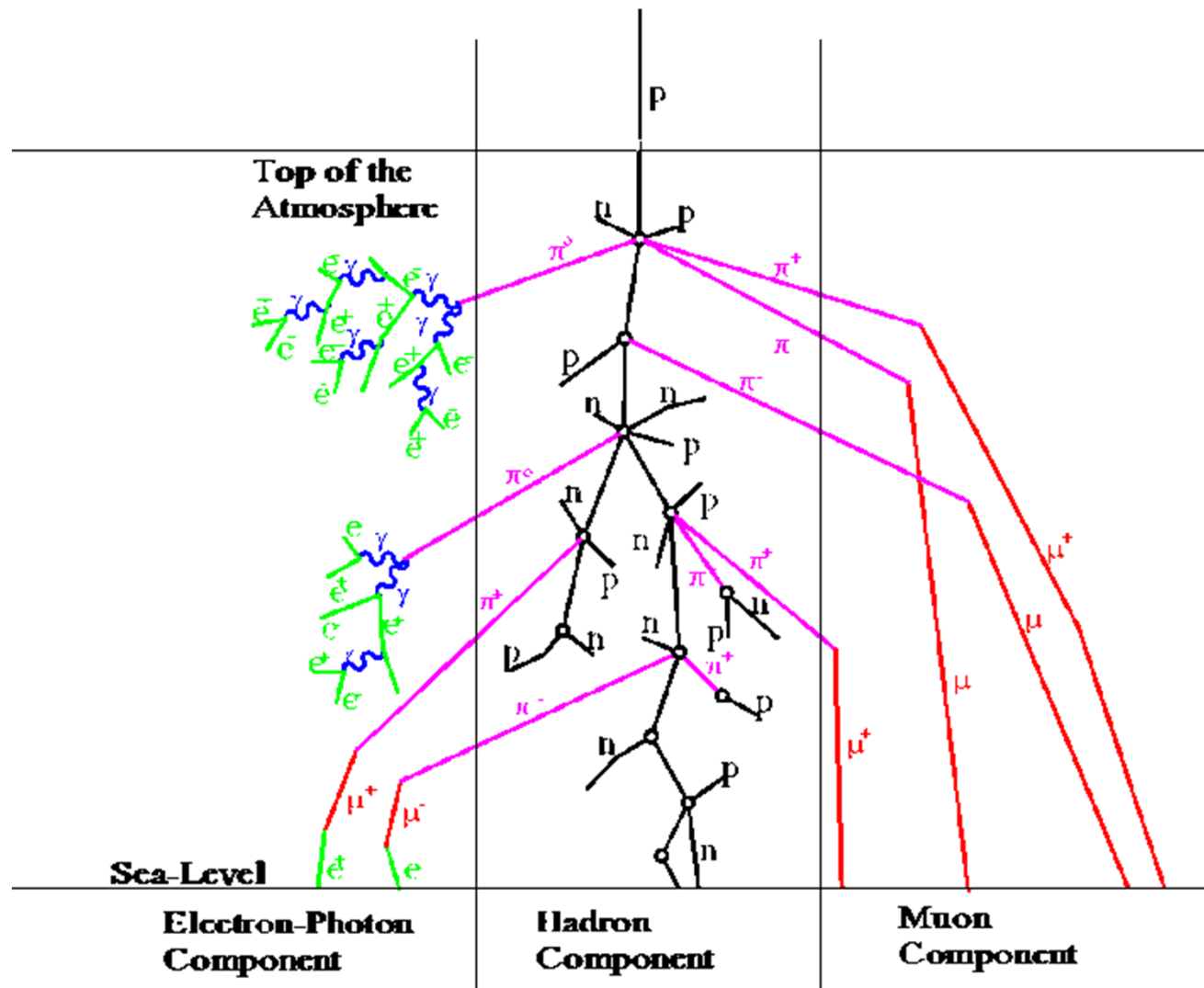


- Modern type – counter filled with ${}^3\text{He}$:

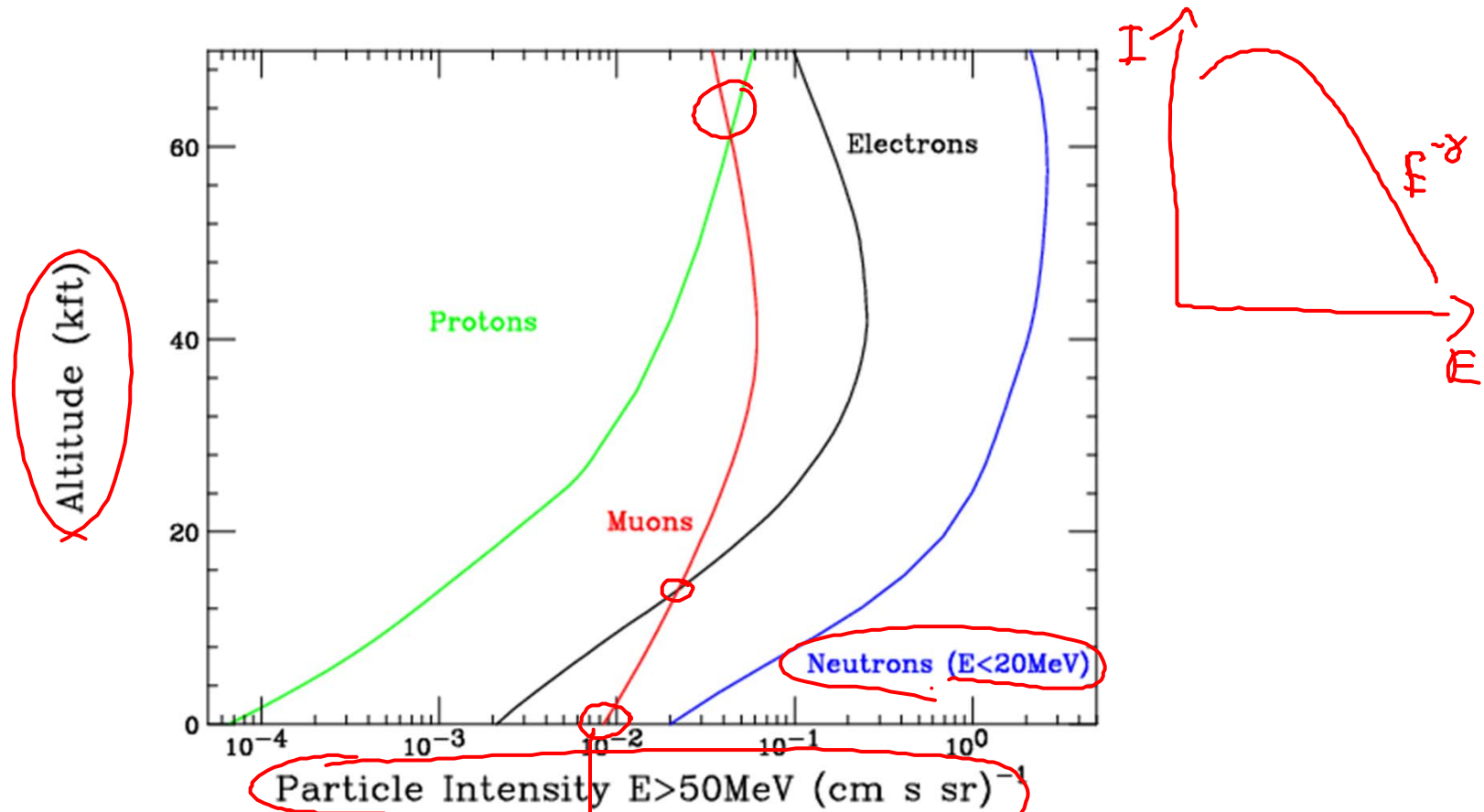


- Both types sometimes called “NM64”

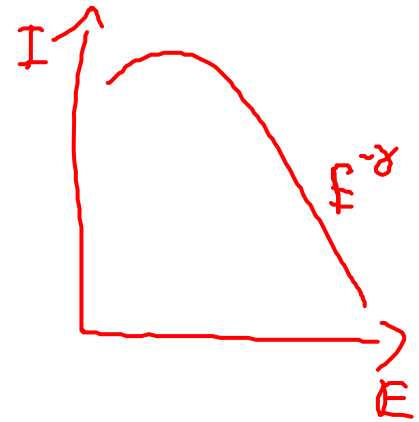


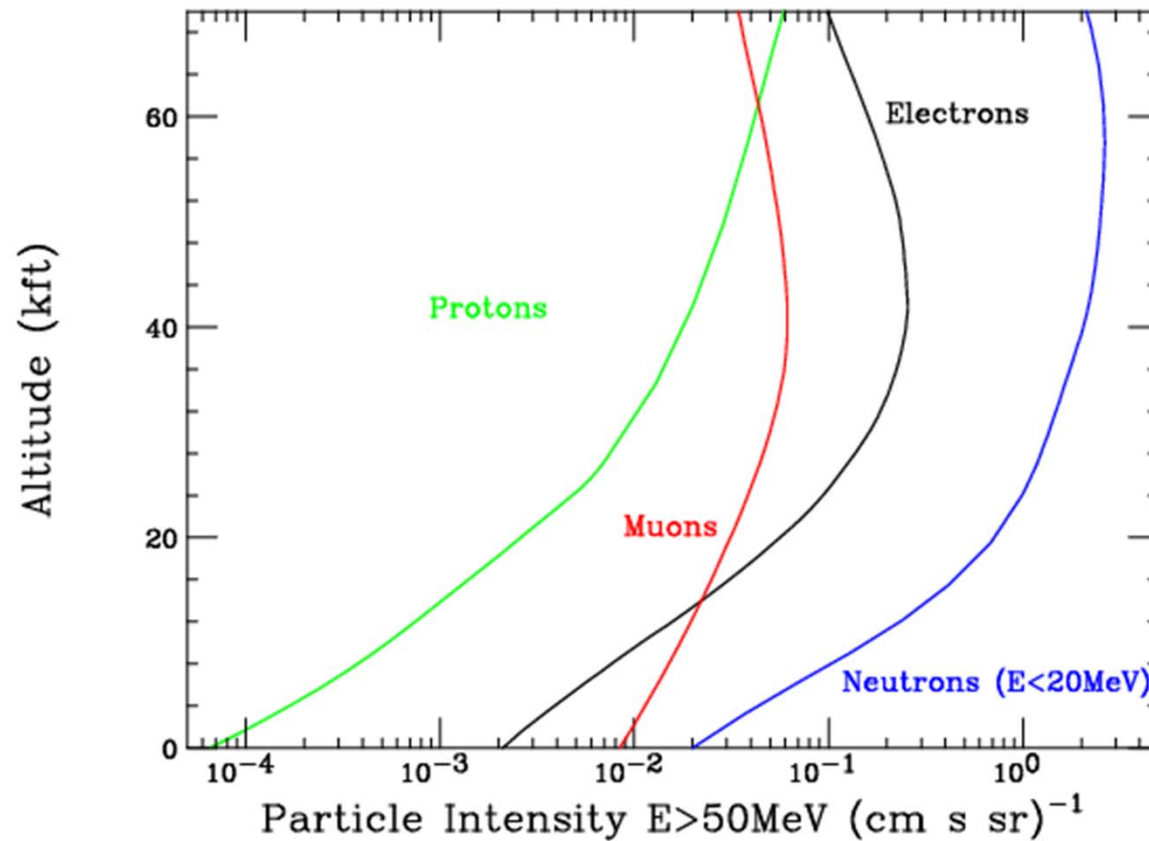


Most of these primaries are energetic enough to produce a nuclear or high energy interaction initiating a cascade of particles through the atmosphere.



Geant simulation

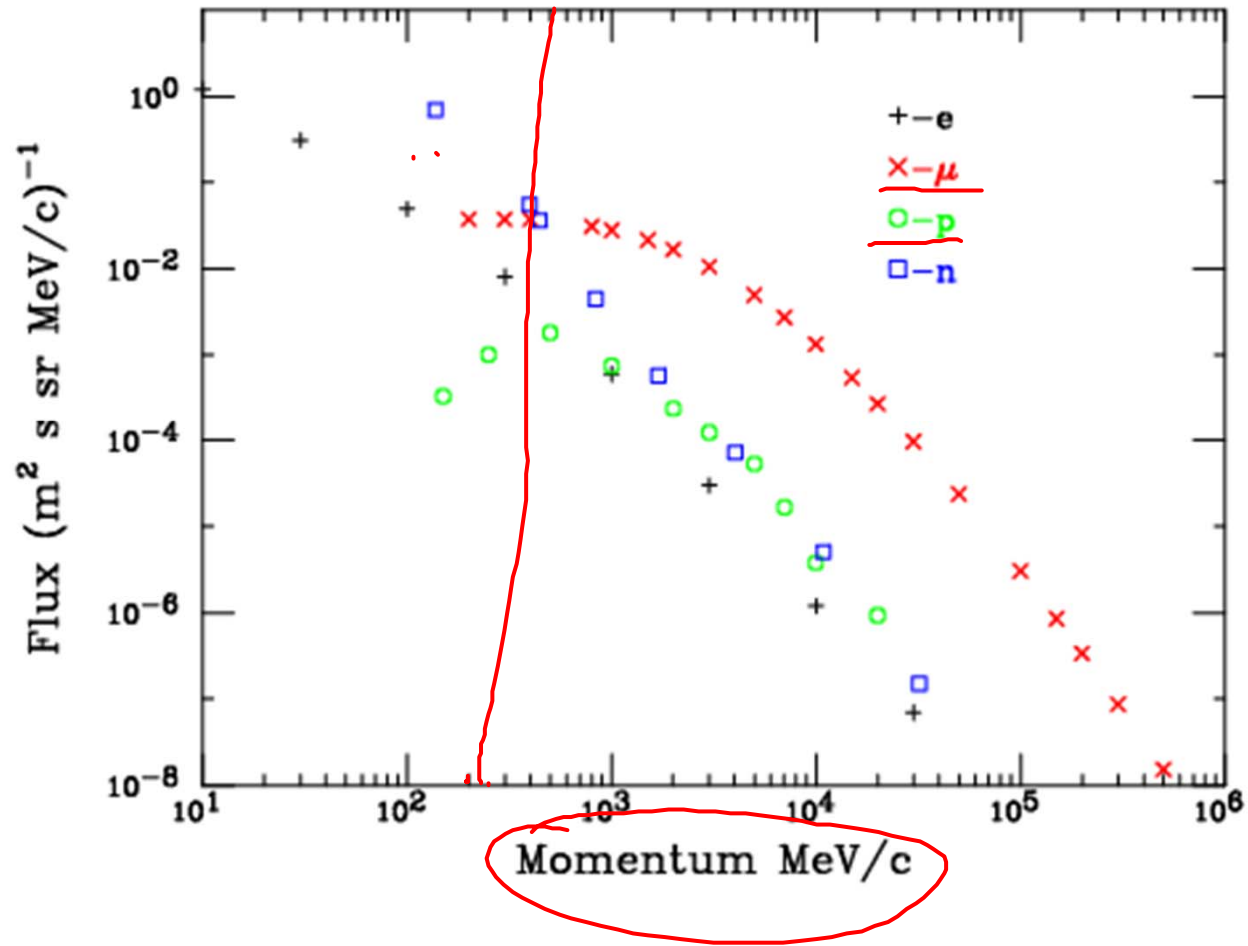


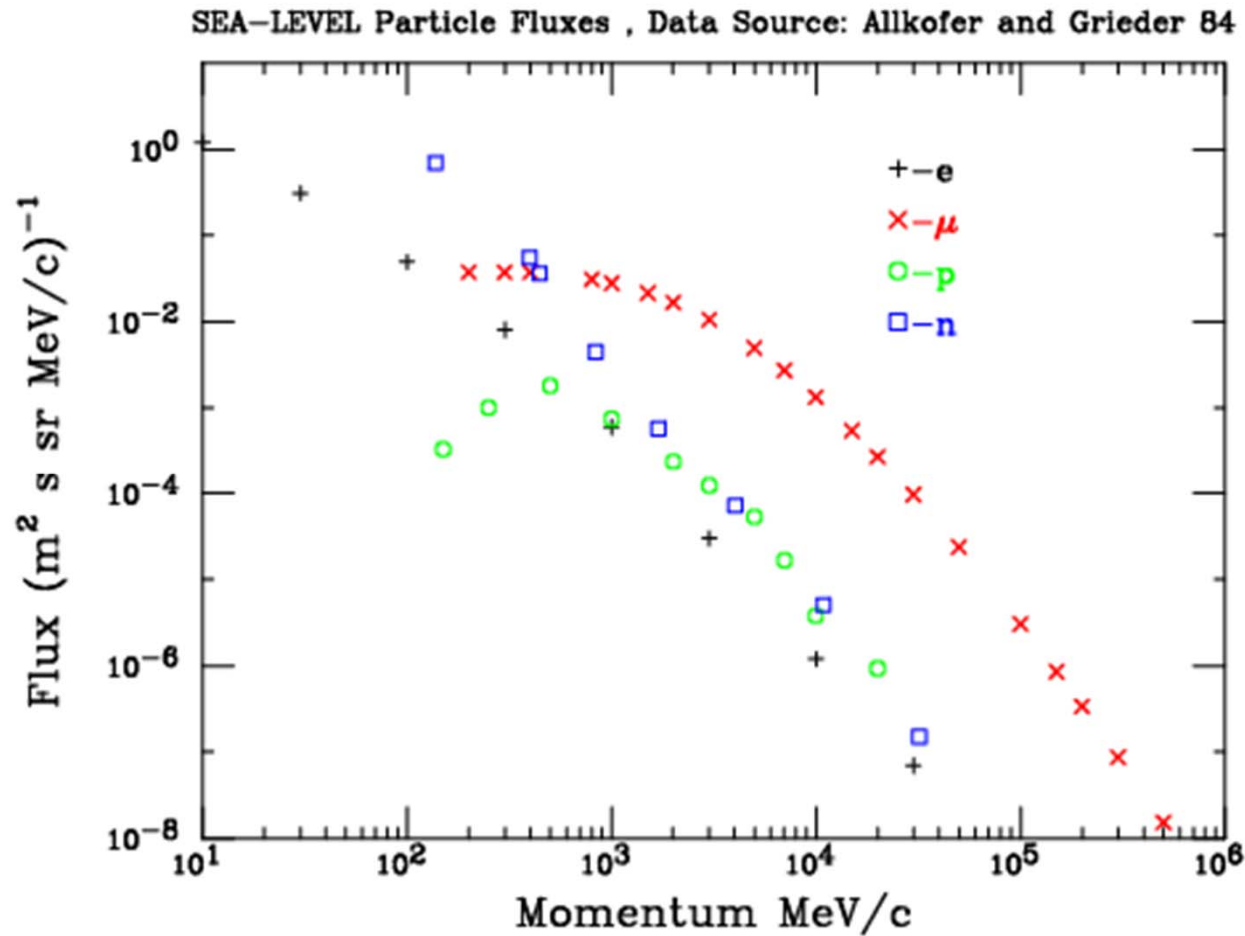


As the ensemble of cascades develop the particle density and the particle type distribution varies with atmospheric depth as shown in the Figure.

The passage of each particle type through atmosphere is determined by different interaction channels. The dominate interaction depends on particle type, energy and material.

SEA-LEVEL Particle Fluxes , Data Source: Allkofer and Grieder 84





Above energies of 100MeV muons are the dominate species at sea-level, however when considering all energies neutrons dominate in numbers.

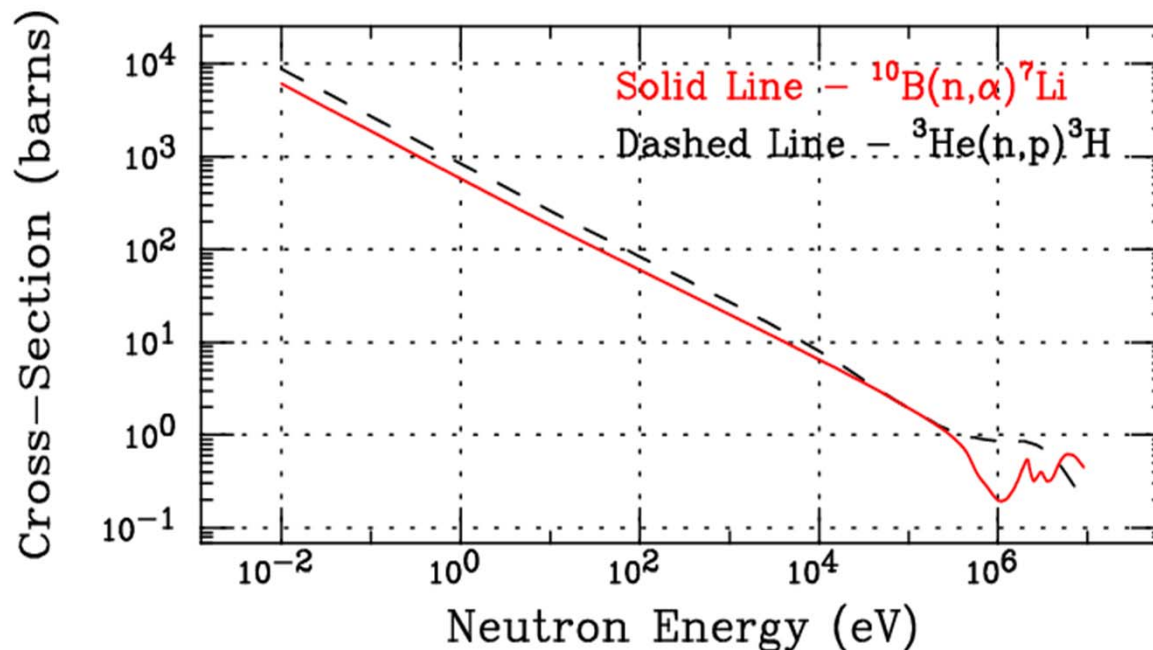
The question remains, how does the Neutron Monitor respond to this particles ??

In a neutron monitor, neutron sensitive proportional tubes, surrounded by moderator material and a lead target, detect thermal neutrons produced locally from interacting incident particles.

Even though neutrons do not leave an ion trail in the proportional tube, the absorption of a neutron by a nucleus is usually followed by the emission of charge particles which can be detected.

A proportional tube filled with either $^{10}\text{BF}_3$ or ^3He gas respond to neutrons by the exothermic reaction $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ or $^3\text{He}(\text{n},\text{p})^3\text{H}$.

The reaction cross section versus neutron energy for ^3He and ^{10}B

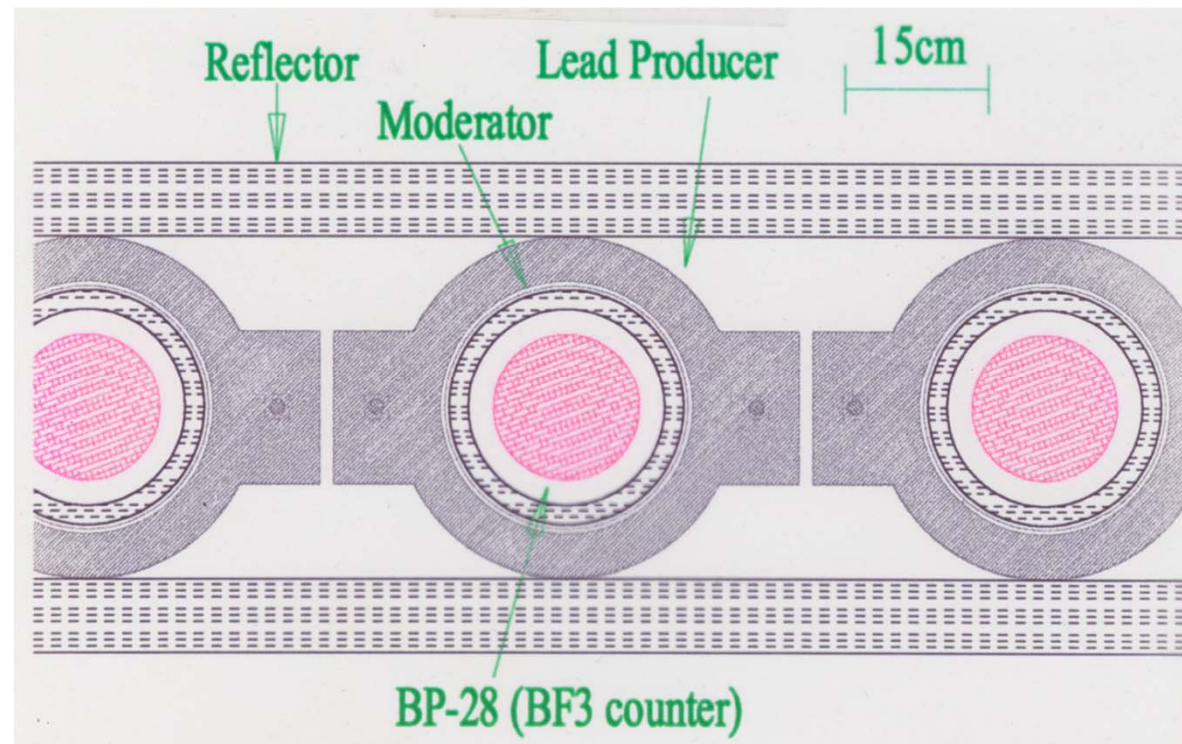


The reaction cross-sections for both nuclei is inversely proportional to the neutron speed, having a thermal endpoint (0.025eV) of roughly **3840 barns** and 5330 barns respectively, as shown in the Figure.

In a neutron monitor, neutron sensitive proportional tubes, surrounded by moderator material and a lead target, detect thermal neutrons produced locally from interacting incident particles.

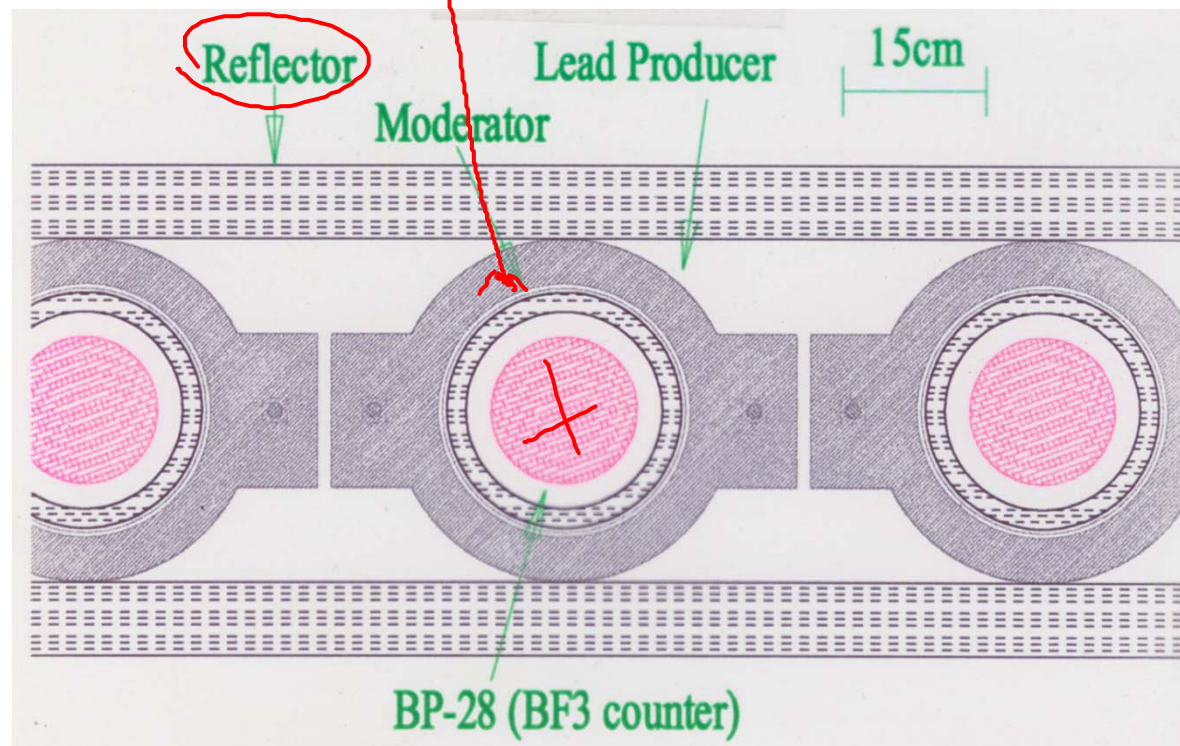
Even though neutrons do not leave an ion trail in the proportional tube, the absorption of a neutron by a nucleus is usually followed by the emission of charge particles which can be detected.

A proportional tube filled with either $^{10}\text{BF}_3$ or ^3He gas respond to neutrons by the exothermic reaction $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ or $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$.

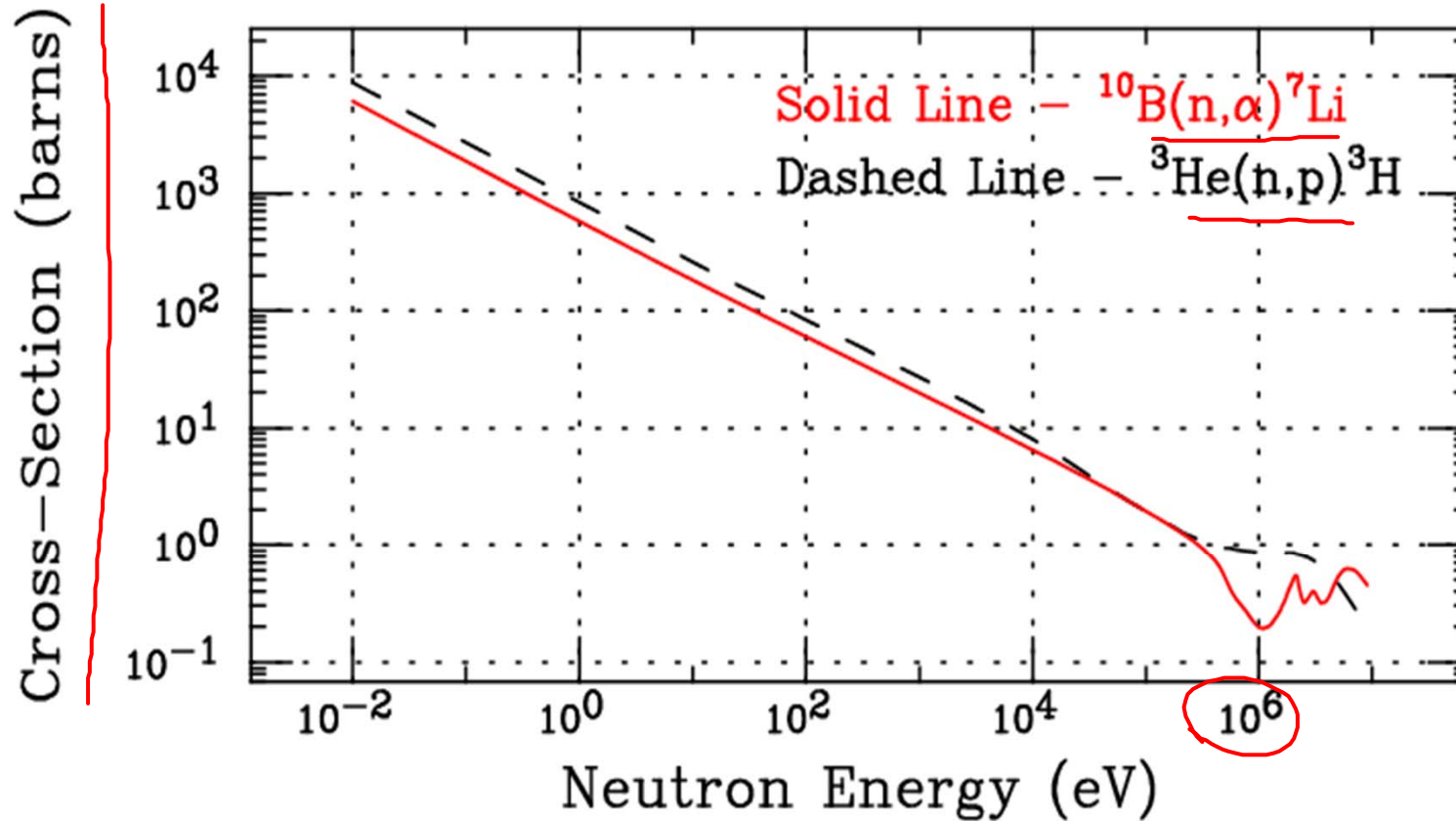


Each neutron monitor consist of

1. proportional counter filled with BF_3 , He_3
2. Moderator : H_2O
3. Lead Producer
4. Reflector



The reaction cross section versus neutron energy for ^3He and ^{10}B



Moderator consist of Polyethylene

(NM64)

(Porafin) IG1

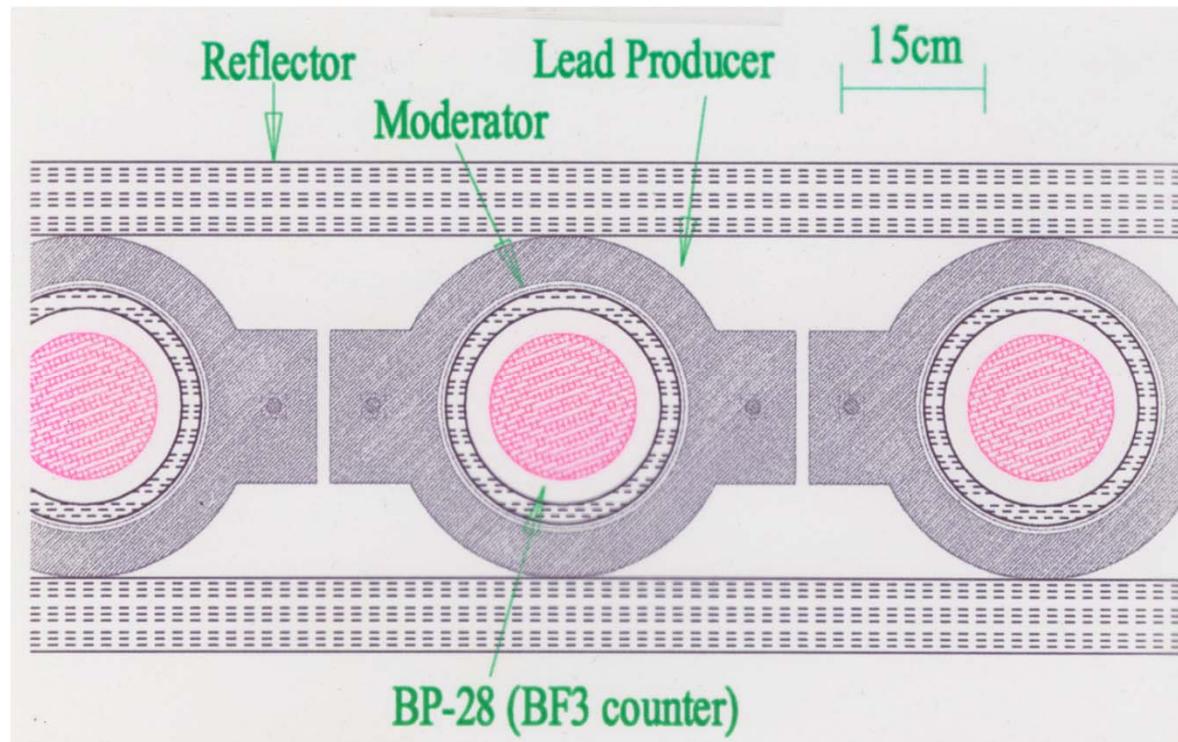
John Simpson
1940

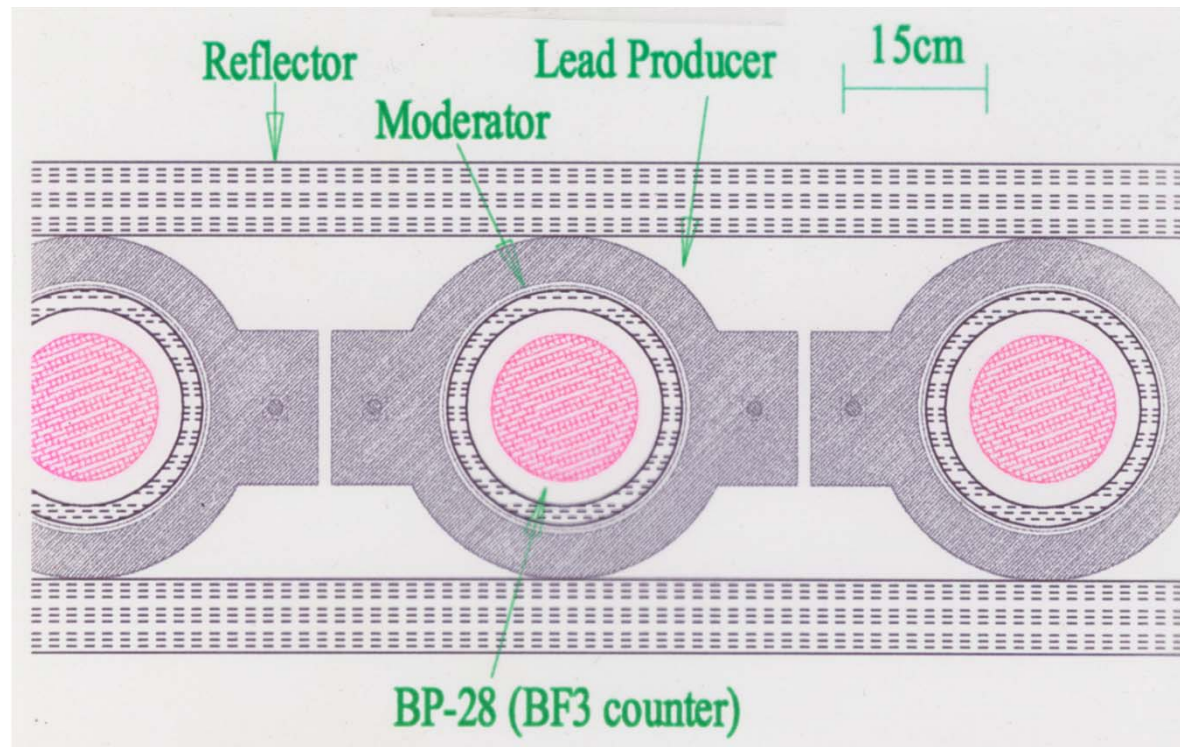
Lead Producer, to produce neutrons

$$\sigma_n \sim A^{0.7}$$

11. Knock on phase

Production of fragments
Mason...





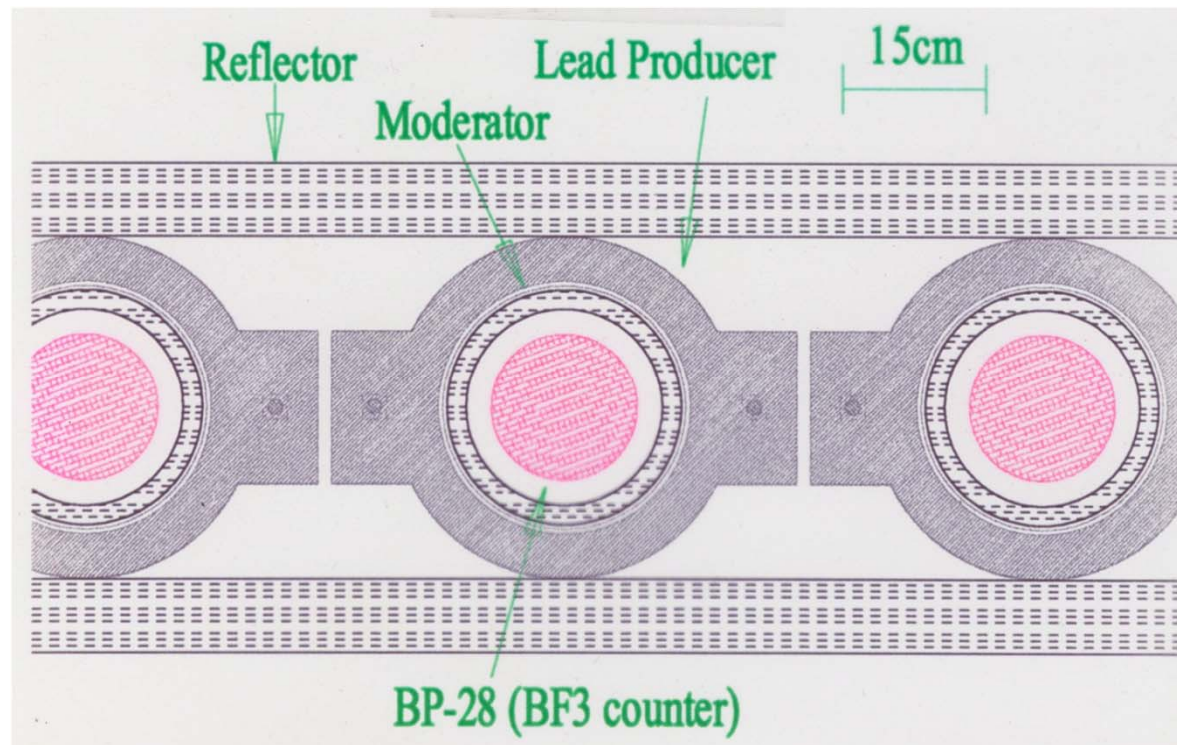
Surrounding each counter is a Moderator which serves to reduce the energy of neutrons, thus increasing the probability of an absorption inside the counter while also providing a reflecting medium for low energy neutrons.

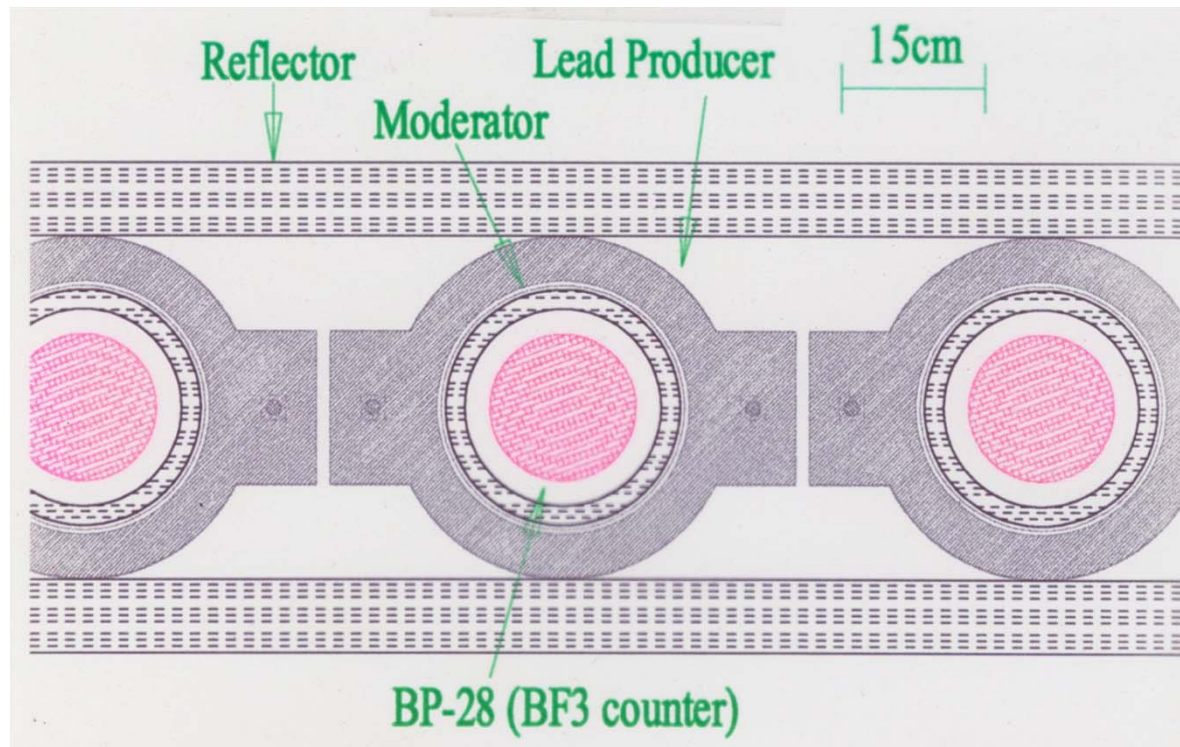
Due to conservation of momentum, the neutron energy loss per elastic collision increases with decreasing atomic mass A , therefore materials with a high concentration of hydrogen are most effective.

The moderator material used in NMs are either Low Density Polyethelene (NM64) or Paraffin (IGY).

2. De-excitation phase $E_n \sim 1 \text{ MeV}$

Reflector: Prevent the instrument
against, thermal neutrons



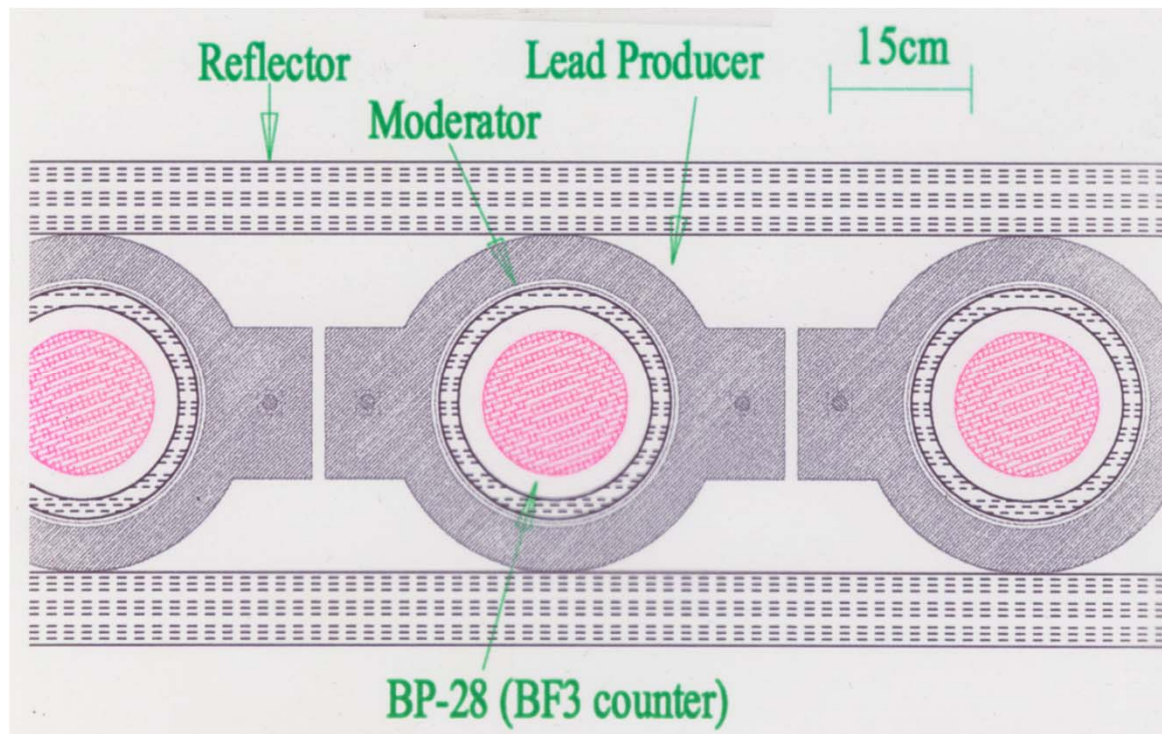


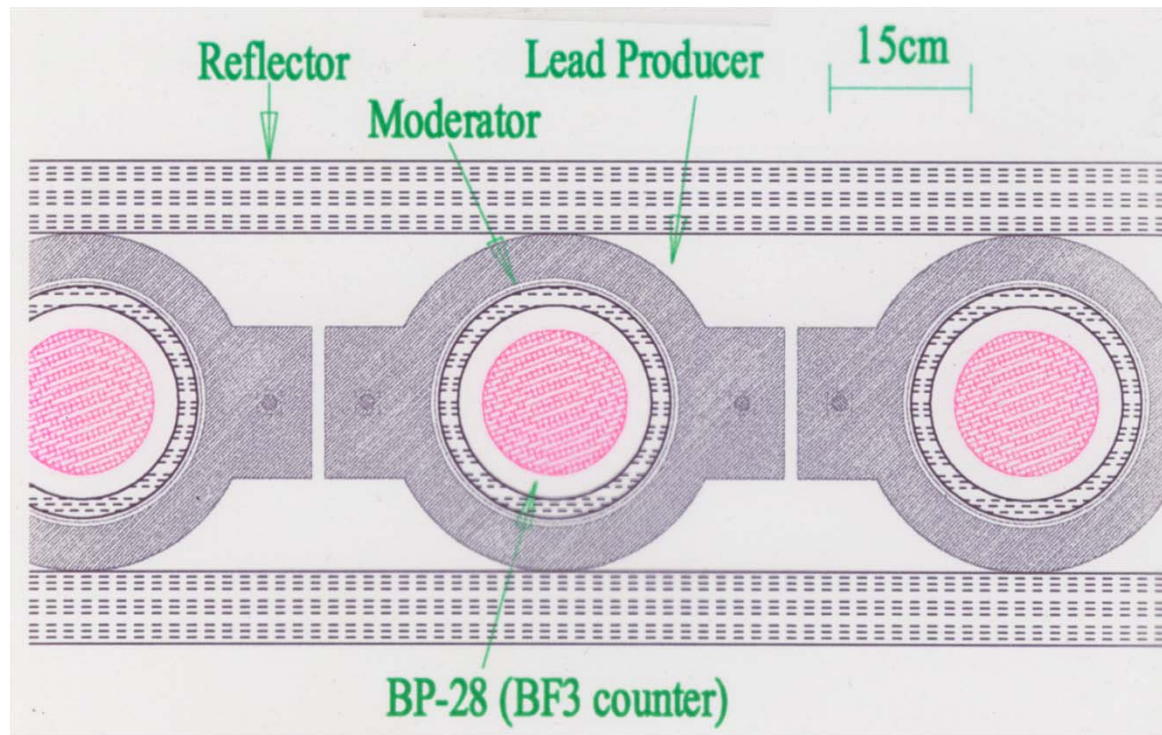
The Lead Producer, which surrounds the moderator, provides a thick large-nucleus target for incident particles. A large nucleus such as lead is preferred as the neutron production rate per unit mass of a material is roughly proportional to $A^{0.7}$.

Inelastic interactions can be separated into 2 stages:

- 1) Knock on phase: High energy nucleons, fragments, mesons, typically escape detection, but sometimes produce additional inelastic interactions
- 2) De-excitation phase: Wounded target nucleus ejects neutrons spectrum peaked near 1.0~MeV (evaporation neutrons). Source of counts in the proportional tubes.

Low neutron capture cross-sections are also a required characteristic of the produce

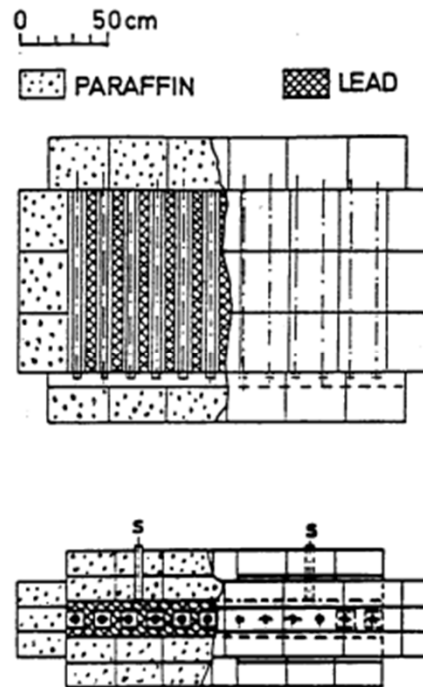




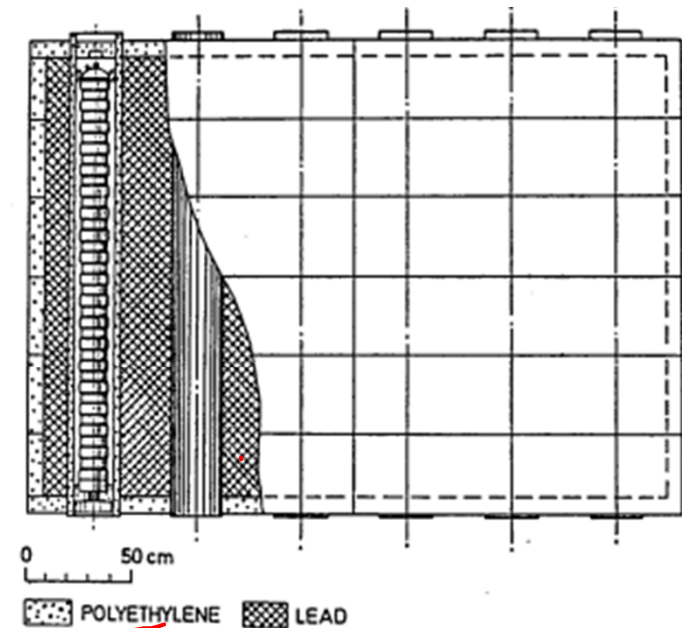
Surrounding the lead is an outer moderator, usually referred to as the Reflector, which serves to contain low energy neutrons produced in interactions within the lead as well as rejecting unwanted low energy neutrons (external evaporation neutrons) produced in the local surroundings from entering into the detector.

Same material as used in the moderator tubes.

Comparison between IGY and NM64 Neutron Monitors



A standard 12-counter IGY neutron monitor (SIMPSON [19])

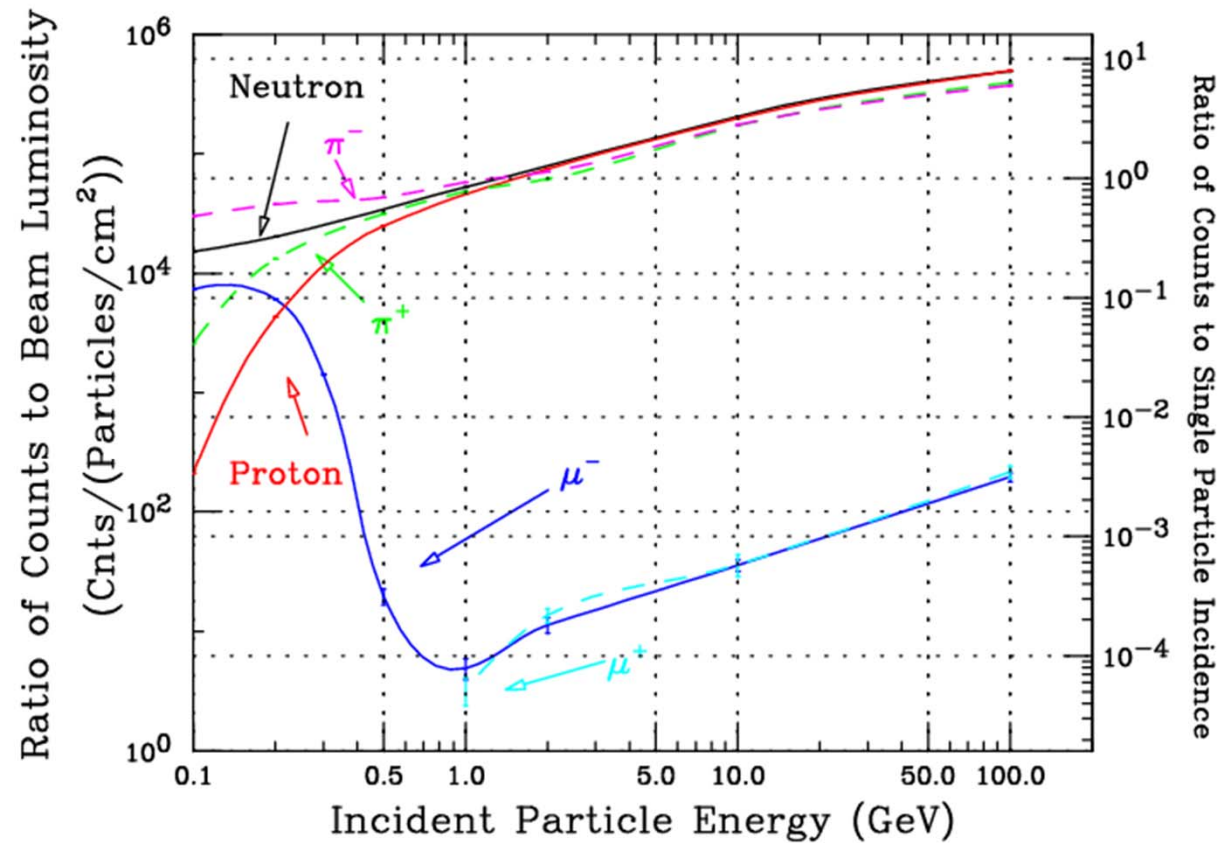


A 6-NM64 monitor (CARMICHAEL [1964]).

	NM-64	Standard IGY
Type of Counter	BP-28 or LND25373	NW G-15-35A
Number of Counters	6	12
Counter Spacing (cm)	50	15.25
Moderator Material	Low Density Polyethylene	Paraffin
Average Moderator Thickness (g/cm ²)	1.84	2.95
Producer Material	Lead	Lead
Average Producer Thickness (g/cm ²)	156	153
Projected Top Area of Producer (cm ²)	6.21×10^4	1.9×10^4
Reflector Material	Low Density Polyethylene	Paraffin
Average Reflector Thickness (g/cm ²)	7.0	25.8

Table I. Neutron Counters used in NM-64 and IGY monitors

	BP-28	LND25373	NW G-15-35A
Effective Diameter (cm)	14.8	4.8	3.8
Effective length (cm)	191	191	87
Gas Type	BF ₃ 96% ¹⁰ B	97% ³ He + 3%CO ₂	BF ₃ 96% ¹⁰ B
Pressure (mm-Hg)	200	3040	450
Thermal Neutron			
Absorption Pathlength(cm)	41.0	1.9	18.2



The resulting detection efficiency of a NM-64 for 6 different particle species including neutrons, protons, positive and negative pions and muons for vertical incident direction.

It quite clear from this figure that the detector's response is optimized to measure the hadronic component as muons above 1 GeV is more 3 orders of magnitude less than the hadrons.

In this energy region, muon generated counts is from neutron production in photo-nuclear interactions and from electromagnetic showers producing multiple ionization tracks in the counter.

Energies below 1 GeV stopping negative charge muons (or pions) are captured by a lead nucleus into a mesic orbit and absorbed by a nucleus which de-excites of the nucleus through the emission of neutrons which is reflected in the rise in detection efficiency with decreasing energy.

