



***Alla ricerca dei raggi cosmici
di più alta energia***

***Maria Concetta Maccarone
Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica
IASF- Sez. Palermo***

Ottobre 2004

Introduzione

I “raggi cosmici” sono un fenomeno naturale che ha origine al di fuori dell’atmosfera terrestre ma, fino agli albori del Novecento, non se ne prevedeva l’esistenza, ...

... gli esperimenti che ne hanno permesso la scoperta avevano piuttosto l’intento di studiare il fenomeno di ionizzazione dell’aria che, a quel tempo, si riteneva dovuto solo alla propagazione della radiazione naturale terrestre.

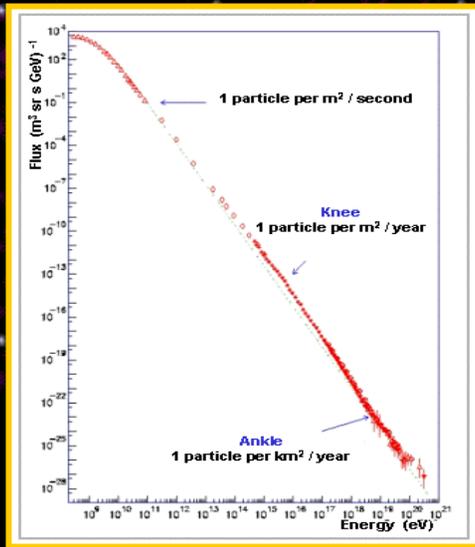
La ricerca nel campo dei Raggi Cosmici si è sviluppata come uno dei più spettacolari e vitali contributi alla scienza del XX secolo dando origine a nuove discipline scientifiche (fisica delle particelle elementari), nuove tecnologie (rivelatori, acceleratori), nuovi concetti in astrofisica (meccanismi di produzione e di accelerazione).

Nel corso di un secolo, la conoscenza del fenomeno “raggi cosmici” si è notevolmente arricchita ma ancora molte domande non hanno avuto risposta, particolarmente quelle relative ai cosiddetti EECR, i raggi cosmici di energia superiore a 5×10^{19} eV.

Oggi lo studio dei raggi cosmici di più alta energia è parte integrante delle “astroparticelle”, campo multidisciplinare in cui convergono temi, conoscenze e problematiche di astronomia, astrofisica, fisica particellare e nucleare, fisica dell’atmosfera.

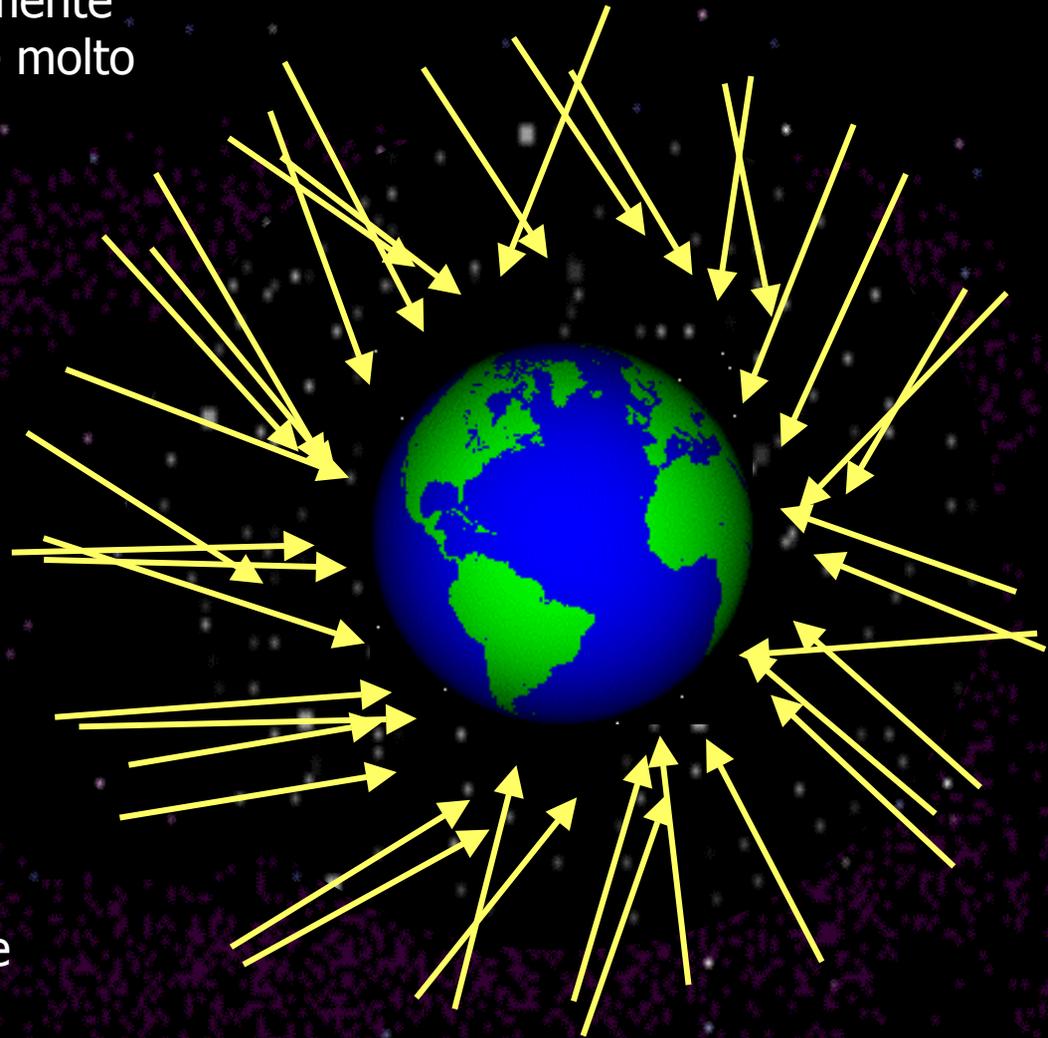
... ma cosa è un raggio cosmico (CR, Cosmic Ray) ?

I **raggi cosmici** sono principalmente particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.



Lo **spettro energetico** (la curva che dà la variazione dell'intensità dei raggi cosmici in funzione della loro energia) inizia da circa 10^9 eV e sembra non avere un limite superiore.

L'**atmosfera terrestre** assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.



L'importanza di chiamarsi "elettron-Volt"

Nel mondo "Macroscopico" l'energia è espressa in Joule ($m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$)

Nel "microscopico", nel particellare, in astrofisica, essa è espressa in **elettronVolt (eV)**

$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

0.03 eV → energia di una molecola di ossigeno nell'aria

1 eV → ci bruciamo con la fiamma di un cerino !

$10^2 \div 10^5$ eV → raggi X

50×10^3 eV → energia degli elettroni in un tubo televisivo

$10^6 \div 10^7$ eV → decadimento radioattivo

$\sim 10^{13}$ eV → energia massima negli acceleratori di particelle

$10^9 \div >10^{21}$ eV → intervallo di energia di interesse dei raggi cosmici



EECR → Energia $> 5 \times 10^{19}$ eV

6×10^{19} eV ≈ 10 Joule → energia cinetica di una pallina di tennis lanciata da un giocatore esperto tutta concentrata in una singola particella subatomica (massa del protone $\sim 10^{-27}$ kg)

Sommario

- La storia dei raggi cosmici
 - il dibattito sulla loro origine e natura
- La nascita della fisica delle particelle elementari
 - gli strumenti di rivelazione
- I raggi cosmici di più alta energia e il fenomeno degli sciami estesi
 - metodi e tecniche di rivelazione nelle misure indirette
 - gli esperimenti da terra
 - gli esperimenti dallo Spazio

La conducibilità elettrica e la ionizzazione dell'atmosfera

Alla fine del 18^{mo} secolo, Charles de Coulomb dimostrò per la prima volta che l'aria dell'atmosfera presenta una debole conducibilità elettrica. L'origine del fenomeno rimase a lungo oscura.

(oggi diremmo che gli atomi dell'atmosfera terrestre vengono continuamente "ionizzati" e che le cariche formate sono responsabili della conducibilità elettrica dell'aria dell'atmosfera stessa).

Dopo le fondamentali scoperte di fine Ottocento ...



1879 – i raggi catodici (William Crookes)

1895 – i raggi X (Wilhelm Conrad Röntgen)

1896 – la radioattività naturale (Henri Becquerel)

1897 – l'elettrone (John Joseph Thomson)

1899-(1900) – i raggi α , β , (γ) (Ernest Rutherford)

... venne ipotizzato che l'aria fosse ionizzata da misteriosi "raggi" originati dalla radiazione naturale emessa dal nostro pianeta.

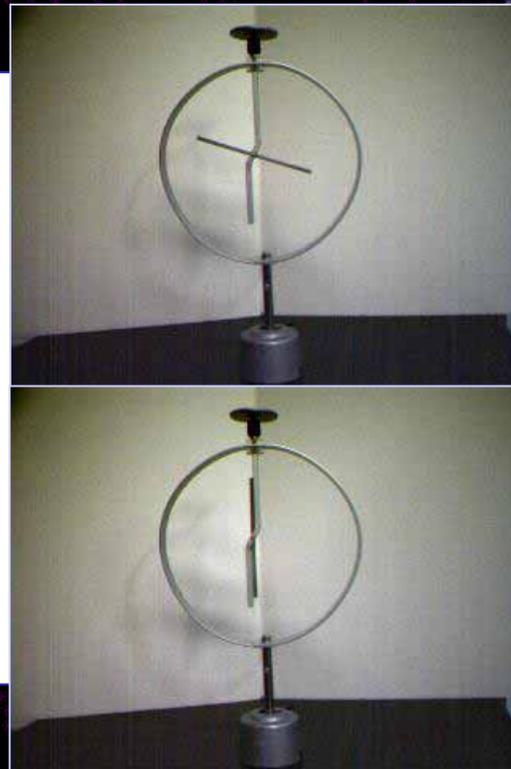
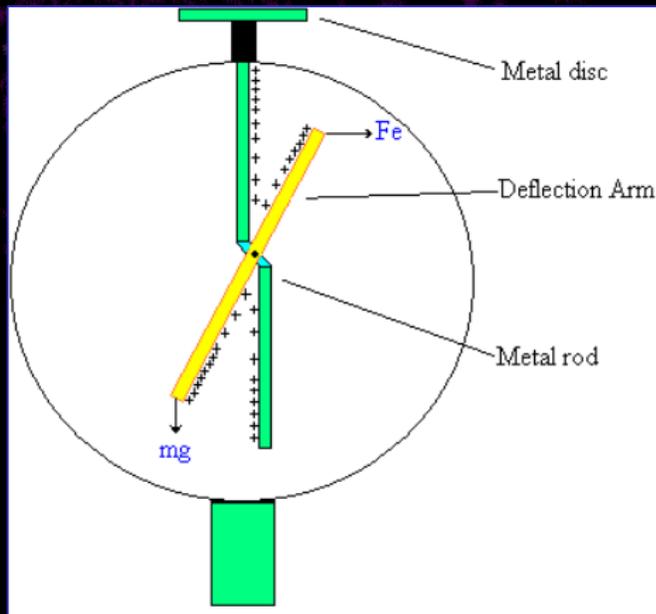
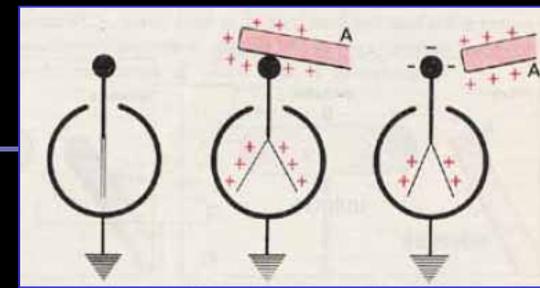


Gli esperimenti per lo studio dei misteriosi "raggi" utilizzavano principalmente gli elettroscopi



L'elettroscopio

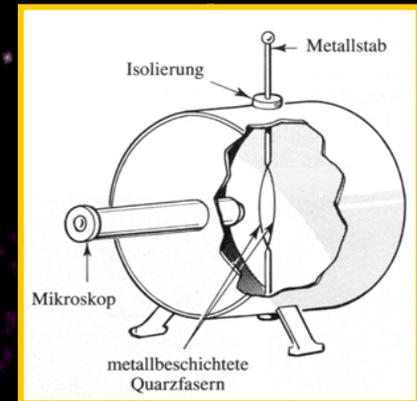
- I "bracci" dell'elettroscopio si respingono tanto più quanto maggiore è la carica presente;
- sottoposta a radiazione energetica, l'aria si ionizza parzialmente
- e l'elettroscopio si scarica tanto più velocemente quanto più intensa è la radiazione.



L'esperimento di Wulf

Nel 1907 Padre Theodore Wulf perfeziona l'elettrometro, un apparato strumentale stabile, resistente agli urti e alle vibrazioni, (composto da un elettroscopio a fibre di quarzo e da un microscopio con scala graduata), per misurare la radiazione naturale terrestre.

Era già noto che il segnale dovuto alla radioattività decresce in modo esponenziale quando ci si allontana dalla sorgente di radiazione.



L'elettrometro di Wulf

Nel 1910 Padre Wulf prova la strumentazione a Parigi sulla Tour Eiffel, a 300 metri di distanza al suolo: a dispetto di quanto atteso, trova che il segnale diminuisce molto meno del previsto !



Perché ?

- ☀ forse l'assorbimento in aria della radiazione naturale terrestre è più piccolo di quanto assunto ?
- ☀ oppure esiste un'ulteriore sorgente di radiazione nell'alta atmosfera ?

L'esperimento in pallone di Victor Hess

Utilizzando una versione migliorata della strumentazione di Wulf (compensazione per le variazioni di temperatura e pressione, sistema ottico modificato per letture più accurate), **Victor Franz Hess** iniziò nel 1911 una serie di esperimenti salendo in quota con palloni aerostatici.



Il volo del **7 agosto 1912** (6 ore da Aussig a Pieskow) raggiunse la quota di 5350 metri.

Man mano che il pallone si innalzava dal suolo, il livello di ionizzazione, come osservato da Wulf, diminuiva molto più lentamente di quanto atteso, fino a stabilizzarsi verso i 700 metri.

A partire dai 1500 metri di quota, il segnale iniziò a crescere finché a 5000 metri raggiunse un livello addirittura doppio del segnale di fondo che la strumentazione misurava al suolo.

Hess ne concluse che:

“I risultati delle presenti osservazioni potrebbero essere spiegati assumendo che una radiazione di potere altamente penetrante entra nella nostra atmosfera dall'esterno, ed ancora produce, nei livelli più bassi, parte della ionizzazione osservata in laboratorio.”



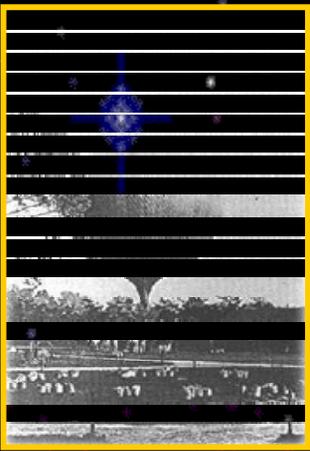
V. Hess a bordo della gondola

Durante la campagna di voli del 1912, Victor Hess trovò inoltre che:
il segnale di ionizzazione (e quindi l'intensità della radiazione)

- aveva valori molto simili sia durante il giorno che durante la notte,
- non diminuiva sensibilmente nel caso di eclissi solare (volo del 12 aprile).

Da ciò egli concluse che :

- il Sole non poteva essere la sorgente primaria della "misteriosa radiazione",
- la radiazione dovesse giungere dallo spazio esterno più lontano del Sole.

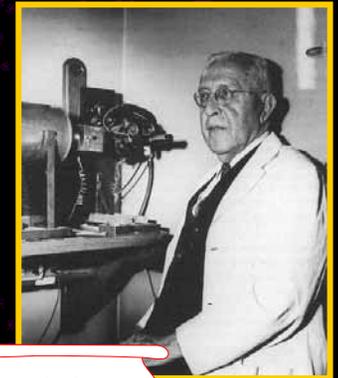


Pallone del 1912



E' la scoperta della
"Höhenstrahlung",
la "radiazione proveniente dall'alto"

Victor Hess venne in seguito riconosciuto quale
"padre ufficiale della fisica dei raggi cosmici"



*Nobel Prize
1936*

Victor Hess

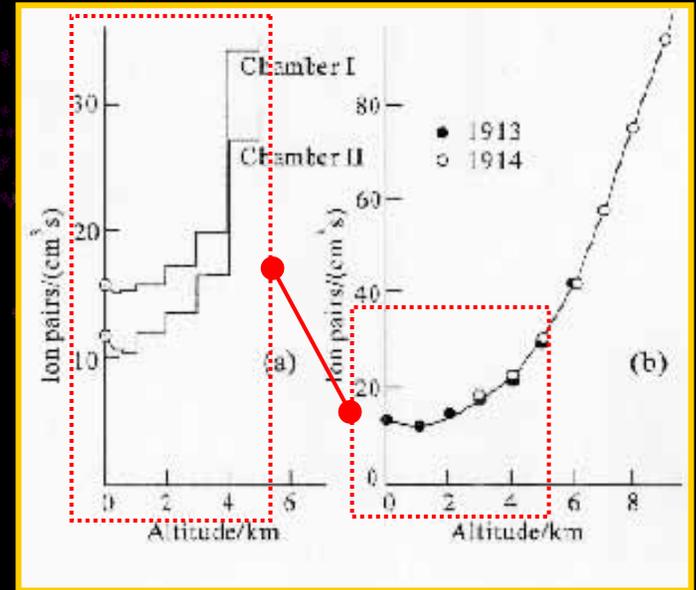
Nota: i "raggi cosmici" (o "radiazione cosmica") furono così denominati nel 1925 da Robert Millikan che credeva fossero raggi gamma di alta energia. Oggi sappiamo che la maggior parte della radiazione cosmica è formata da particelle (sub)nucleari, compresi elettroni e neutrini, piuttosto che da radiazione elettromagnetica, ma il termine "raggi cosmici", nella sua più moderna definizione introdotta da Dmitry Skobel'tzyn nel 1928, è rimasto nell'uso comune.



Dopo la scoperta della Höhenstrahlung furono portati a termine vari esperimenti (in palloni aerostatici, con palloni sonda, in aereo, nei laghi, in montagna, nei ghiacciai) da diversi ricercatori (in Europa e negli Stati Uniti) per capire l'origine e la natura della radiazione e per valutarne il coefficiente di assorbimento.

Durante una campagna di voli in pallone negli anni 1913-1914, **Werner Kolhörster** conferma i risultati di Hess; inoltre, raggiungendo la quota di 9300 metri, egli conferma l'aumento della ionizzazione anche a quella altezza, e trova che il coefficiente di assorbimento è molto più basso di quello relativo ai raggi gamma.

Ma gli studi, rallentati dagli eventi della Prima Guerra Mondiale, non riescono ancora a dare risposta alle domande sull'origine e natura della "radiazione molto più penetrante dei più energetici raggi gamma":



Variatione della ionizzazione con l'altezza (a) Hess (1912); (b) Kolhörster (1913,1914).

?

Origine:

- negli strati più alti dell'atmosfera ?
- nel Sole ?
- altrove nel cosmo ?

?

Natura:

- radiazione elettromagnetica di altissima energia (ultra-gamma) ?
- elettroni super-veloci ?

I “raggi di Millikan” e i “raggi cosmici”

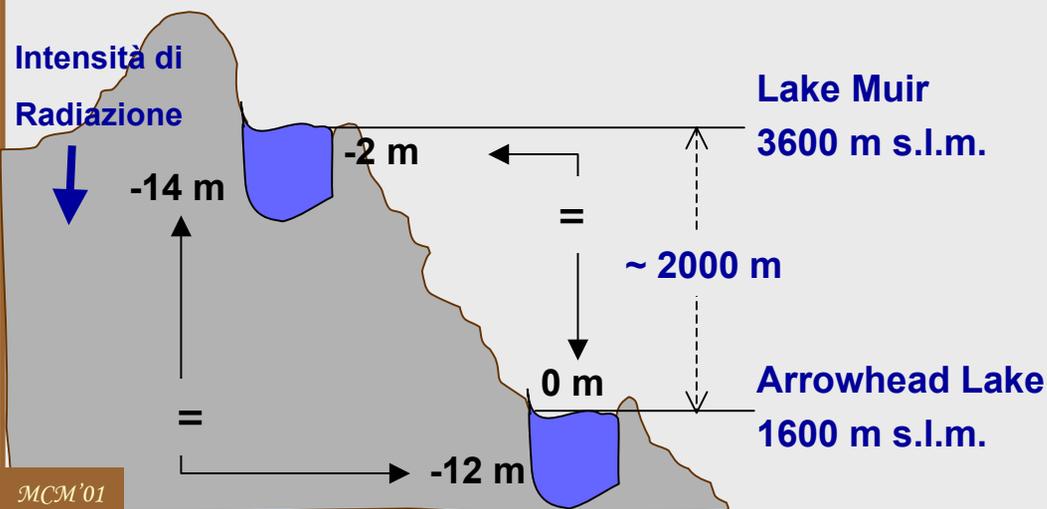


In California Robert Millikan e George Cameron misurano la ionizzazione nelle acque di due laghi di montagna alimentati dallo scioglimento delle nevi “*per definire una volta per tutte la questione dell'esistenza o meno di una piccola radiazione molto penetrante di origine cosmica*”.



Camera a ionizzazione usata da Millikan

$$\text{Assorbimento [3600m} \div \text{1600m]}_{\text{Atmosfera}} \equiv \text{Assorbimento [2m]}_{\text{Acqua}}$$



MCM'01

Dai risultati ottenuti, Millikan e Cameron conclusero che:

- **la radiazione penetrante esiste,**
- **è di origine cosmica.**

Millikan, erroneamente convinto che la radiazione fosse solo di natura elettromagnetica (raggi gamma di alta energia), conìò per essa il termine

“ Raggi Cosmici”

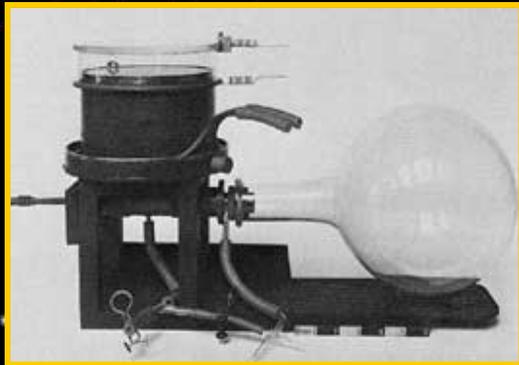
“La storia degli strumenti di fisica coincide con la storia della fisica stessa”

(Rita Brunetti, 1890-1942)

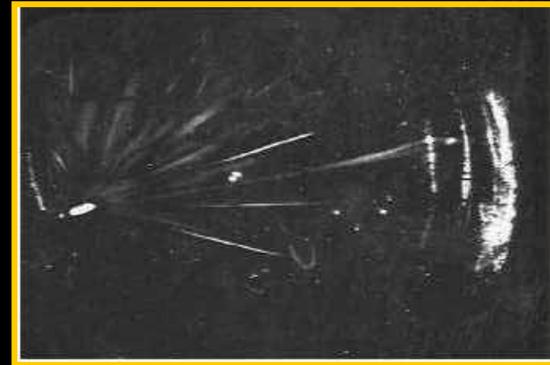
La “camera di Wilson” o “camera a nebbia”

La “camera a nebbia”, inventata da **Charles T.R. Wilson** nel **1911**, fu il primo strumento a permettere l’analisi visiva delle particelle ionizzanti. Il passaggio di una tale particella nella camera, riempita di vapore soprassaturo, provoca una condensazione di ioni lungo la sua scia. In questo modo è possibile osservarne a occhio nudo la traccia ed anche fotografarla.

Ernest Rutherford la definì come *“the most original and wonderful instrument in scientific history.”*



Camera di Wilson, 1912



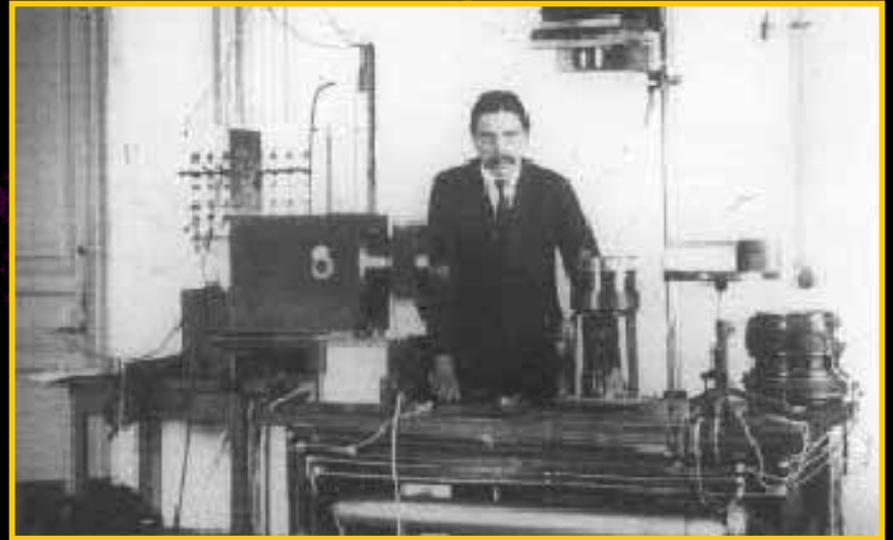
La “camera a nebbia”, utilizzata in laboratorio nelle sue versioni sempre più aggiornate,

- rese possibile la maggior parte delle scoperte delle nuove particelle nei decenni '20 e '30, e
- contribuì alla determinazione della natura particellare dei raggi cosmici.



Usando una **camera a nebbia** accoppiata ad un forte campo magnetico per lo studio dei raggi beta,

Dmitry Skobeltzyn fotografa le tracce (a volte presenti in numero di tre o quattro) lasciate da **particelle relativistiche cariche (elettroni veloci)** provenienti dall'atmosfera.



Skobeltzyn nel laboratorio dell'Istituto di Fisica Tecnica di Leningrado

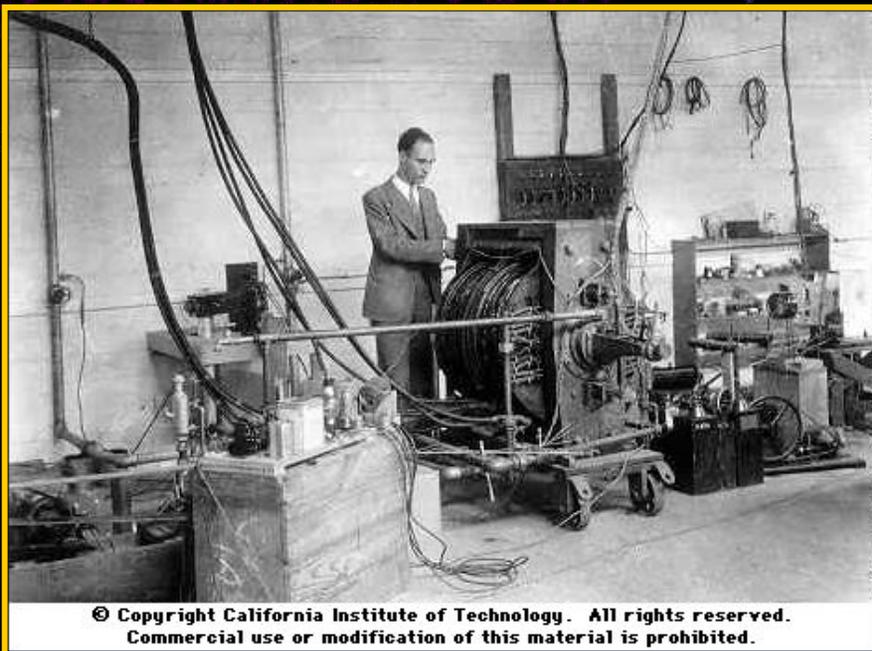
Data la loro elevata energia, gli **elettroni veloci** rilevati non potevano essere stati prodotti da decadimento da elementi radioattivi: essi furono piuttosto considerati come **prodotti secondari dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera**.



Durante studi sui raggi cosmici, usando una **camera a nebbia** (accoppiata ad un forte campo magnetico) e ponendo una lastra di piombo al suo interno,

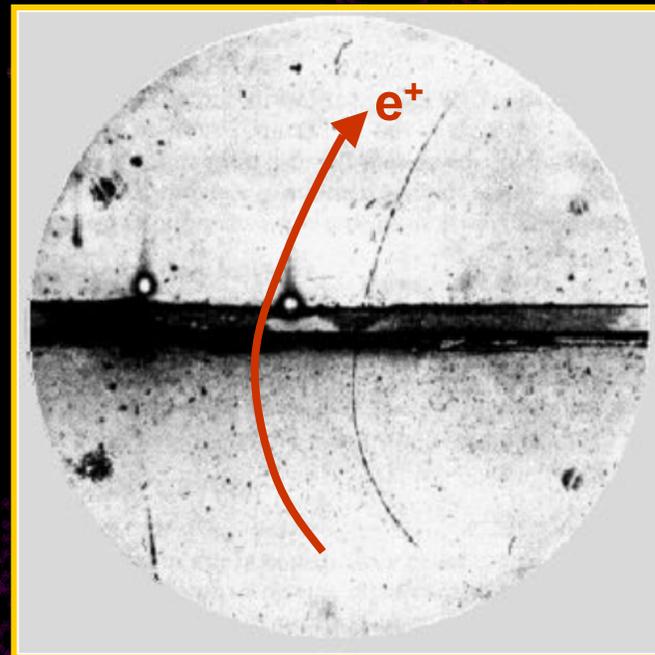
Carl Anderson osserva tracce di particelle con curvatura opposta a quella lasciata dagli elettroni (la direzione della traccia è determinata dall'energia persa dalla particella nell'attraversare la lastra di piombo).

E' la scoperta del **positrone**, particella che ha la massa dell'elettrone, ma carica opposta.



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Anderson e la camera a nebbia (1932).



Fotografia di traccia da positrone nella camera a nebbia di Anderson (1932).



Patrick Blackett e Giuseppe (Beppo) Occhialini sviluppano una nuova tecnica sperimentale collocando due contatori Geiger-Muller (inventati nel 1908) collegati da un circuito in coincidenza (ideato da Bruno Rossi nel 1930) ←
rispettivamente sopra e sotto una camera a nebbia.

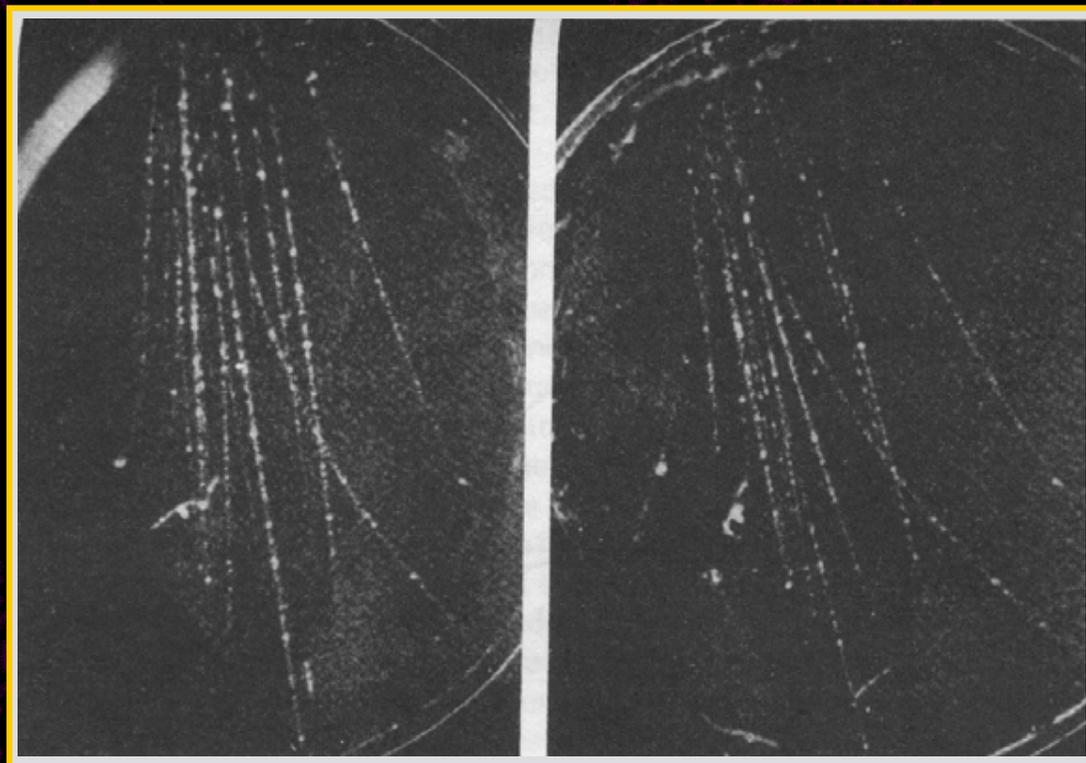
Nota: Il circuito in coincidenza ideato da Bruno Rossi fu il primo circuito elettronico "AND", elemento logico di base dei computer.

Il sistema della "camera a nebbia controllata dai contatori" permette così di prendere una foto ogni due minuti, trovando tracce di particelle altamente energetiche nell'80% di esse.

Blackett e Occhialini fotografano gruppi di particelle associate, dalle forme più disparate e dal diverso contenuto, e danno al fenomeno il nome di "showers" (sciame).



Patrick Blackett e Beppo Occhialini

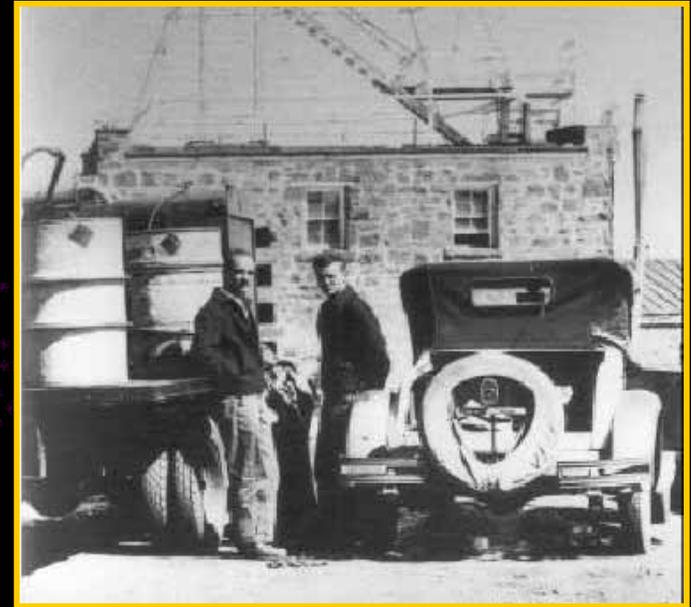


Fotografia stereoscopica di uno sciame (P. Blackett & G. Occhialini, 1933)



Carl D. Anderson e Seth H. Neddermeyer continuano gli esperimenti sui raggi cosmici in montagna, con la **camera a nebbia** (con campo magnetico e lastra di piombo) montata sopra un vecchio autocarro. I dati raccolti durante le misure a Pike's Peak, Colorado, rivelano l'esistenza di una nuova particella a vita breve e di massa intermedia tra elettrone e protone.

E' la scoperta del **mesotrone**, chiamato poi **mesone μ** o **muone**.



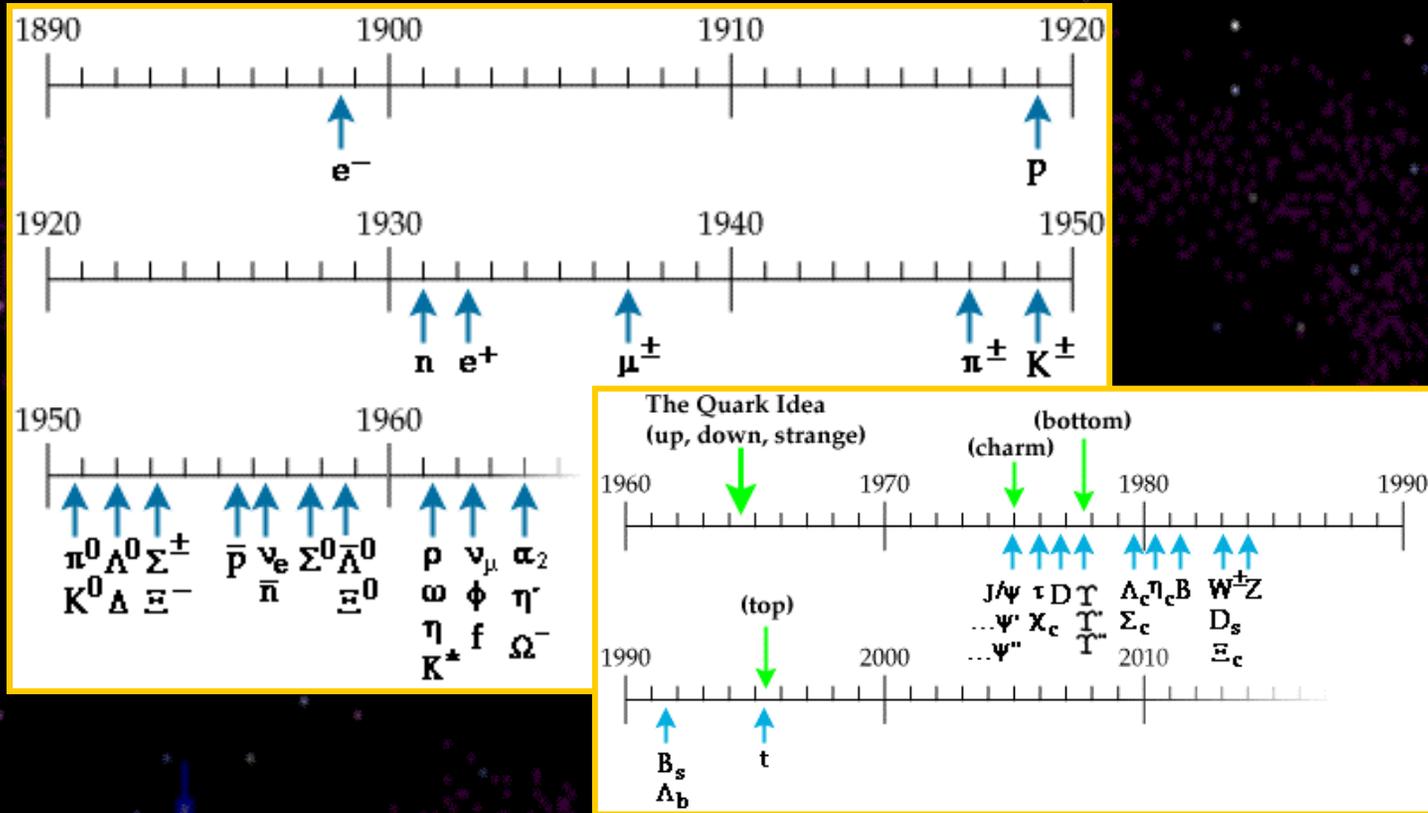
Anderson e Neddermeyer con il loro autocarro.



In modo indipendente, e quasi contemporaneamente, anche **J.C. Street** e **E.C. Stevenson** rilevano l'esistenza del **muone** in raggi cosmici, utilizzando una **camera a nebbia controllata da contatori**.

Alla fine degli Anni Trenta ...

... prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari ...

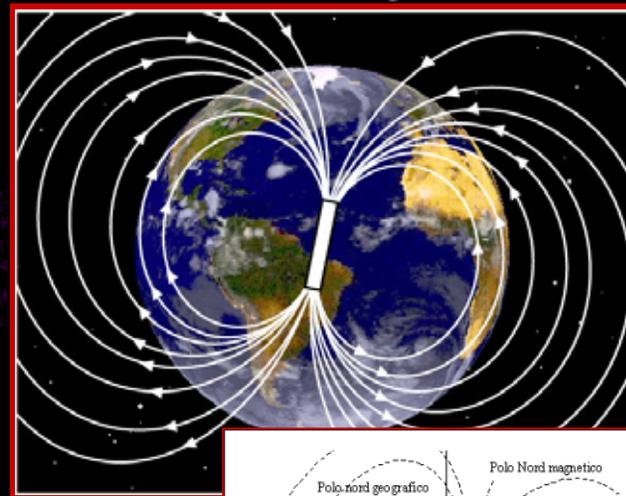


... e i fisici particellari continueranno ad usare i raggi cosmici per le loro ricerche almeno fino all'avvento, negli anni '50, degli acceleratori di particelle.

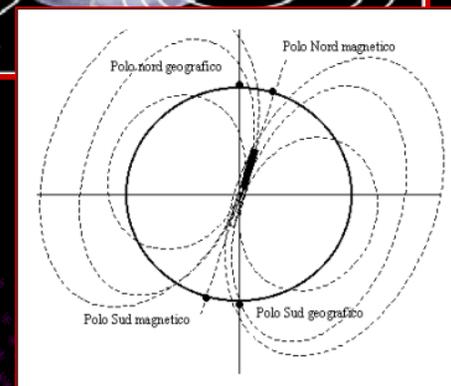
Natura dei raggi cosmici: l'influenza del campo magnetico terrestre



Jacob Clay - l'intensità dei raggi cosmici dipende dalla latitudine geografica: essa è più debole all'equatore che ai poli. E' la prima osservazione dell'effetto di latitudine geomagnetica, e la prima evidenza che la radiazione cosmica è costituita, almeno in parte, da particelle cariche che subiscono l'influenza del campo magnetico terrestre.



Walter Bothe e Werner Kolhörster - la radiazione cosmica primaria è composta da particelle cariche, presumibilmente elettroni di altissima energia.



Bruno Rossi - se i raggi cosmici sono di natura particellare, la loro distribuzione angolare dovrebbe presentare una asimmetria rispetto al piano del meridiano geomagnetico ("effetto est-ovest"), con una prevalenza dei corpuscoli provenienti da Est (se di carica negativa) o da Ovest (se di carica positiva).

“Dai mari del sud all’artico alla ricerca dei raggi cosmici”



Arthur H. Compton organizza un’estesa campagna di misure di ionizzazione a diverse latitudini e altitudini, una vera e propria esplorazione geografica. I risultati di Compton e collaboratori evidenziano la **natura corpuscolare** dei raggi cosmici tramite l’ **effetto di latitudine** dovuto al campo magnetico terrestre e la **variazione dell’intensità** dei raggi cosmici **con l’altezza**.



Le postazioni (81 località diverse) per lo studio geografico dei raggi cosmici (Compton, 1933)

Natura dei raggi cosmici ...



Vicino Città del Messico, due gruppi di ricercatori (uno guidato da **Thomas H. Johnson**, l'altro guidato da **Luis Alvarez** e **Arthur Compton**) misurano indipendentemente l'effetto est-ovest previsto da Bruno Rossi e mostrano che:

la radiazione cosmica primaria è composta principalmente da particelle positivamente cariche

Altri esperimenti condotti in pallone da vari gruppi di ricercatori, utilizzando contatori Geiger in formazione di telescopi separati da piombo, determinano che la maggior parte delle particelle primarie della radiazione cosmica è costituita da **protoni**.

Oggi sappiamo che i raggi cosmici sono in predominanza protoni, con abbondanza dal 50% a oltre il 90% in funzione della loro energia. Sono inoltre presenti nuclei, elettroni, positroni, fotoni, neutrini, particelle esotiche,

Il fenomeno degli sciami estesi



In Asmara, Eritrea, **Bruno Rossi** completa la sua campagna di misure e accerta quantitativamente anch'egli l'**asimmetria est-ovest** dimostrando che la **radiazione primaria** è composta, in gran parte, da **corpuscoli positivamente carichi**.

Inoltre, Bruno Rossi scrive nel suo rapporto finale:

“ parrebbe ... che di tanto in tanto giungessero sugli apparecchi degli sciami molto estesi di corpuscoli i quali determinavano coincidenze fra contatori, anche piuttosto lontani l'uno dall'altro. Mi è mancato purtroppo il tempo di studiare più da vicino questo fenomeno ... ”

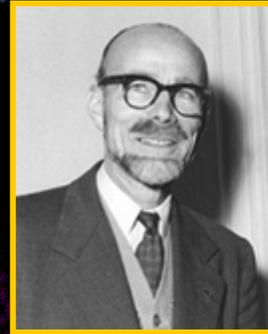
**Questa, forse, fu la prima osservazione degli sciami estesi dell'atmosfera,
EAS, Extensive Air Showers**

L'esperimento di Auger



Nel laboratorio di Parigi, usando contatori Geiger-Müller in coincidenza tra loro, **Pierre Auger** e **Roland Maze** dimostrano che contatori disposti a diversi metri l'uno dall'altro registrano contemporaneamente l'arrivo di particelle da raggi cosmici, indicando così che esse sono particelle secondarie provenienti da una sorgente comune.

Ulteriori esperimenti sulle Alpi, presso le stazioni di Pic du Midi e di Jungfrauoch, rilevano coincidenze tra contatori disposti anche a distanze di 200 metri l'uno dall'altro.



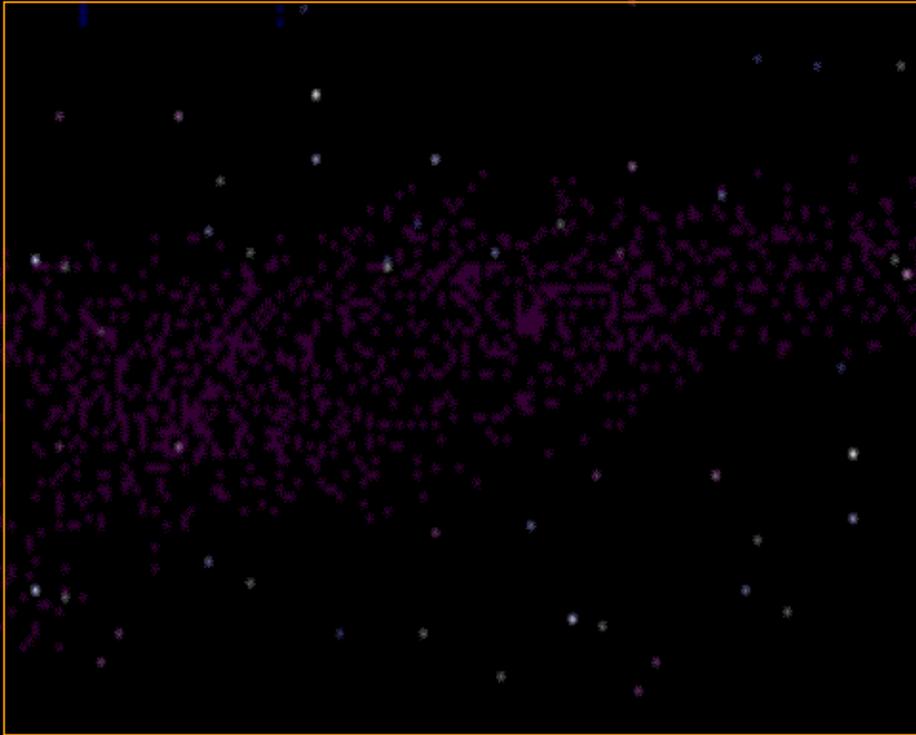
Pierre Auger

**E' la conferma definitiva dell'esistenza degli
sciame atmosferici estesi
Extensive Air Shower, EAS**

**cascata di particelle secondarie e nuclei prodotti dalla collisione di
particelle primarie di alta energia con le molecole dell'aria**

Sulla base delle misure di Jungfrauoch, Auger concluse di aver osservato sciame con energie di **10^{15} eV** (a quel tempo, le energie più alte registrate dalla radioattività naturale e artificiale arrivavano solo a qualche MeV).

Lo sciame esteso (EAS, Extensive Air Shower)



Quando attraversa l'atmosfera terrestre

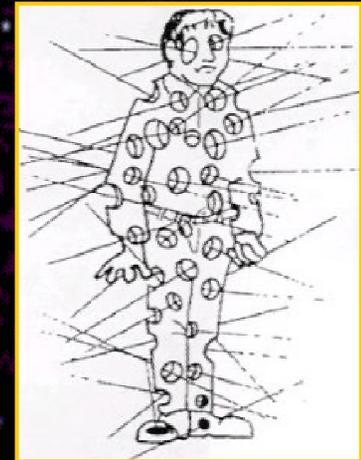
- il **raggio cosmico (particella primaria)** collide con i nuclei dell'aria provocando una
- cascata di **particelle secondarie** di energia più bassa, che a loro volta
- subiscono ulteriori collisioni producendo così uno **sciame** di **miliardi e più** di particelle che raggiungono il suolo terrestre in un'area la cui **estensione** può essere anche di diversi chilometri quadrati.

Gli sciame EAS contengono di tutto:

- nucleoni, nuclei,
- gamma duri,
- mesoni ($\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, \dots$),
- leptoni carichi (e^\pm, μ^\pm, τ^\pm),
- neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ).
- ...

Decine di **particelle secondarie di sciame** attraversano il nostro corpo ogni secondo !
... e l'esposizione aumenta con l'altitudine

(i raggi cosmici sono di grande importanza in biologia; contribuendo, a lungo andare, alle mutazioni genetiche, hanno giocato e continuano a giocare un ruolo rilevante nell'evoluzione della vita sulla Terra)

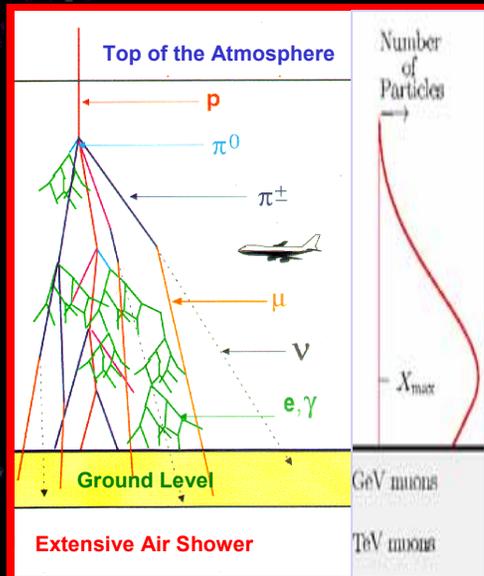


Primari e secondari, misure dirette e indirette

Ad energie inferiori a circa 10^{15} eV ("knee") il flusso dei raggi cosmici CR primari è sufficientemente alto e può essere misurato **direttamente** con apparecchiature a bordo di palloni e satelliti.

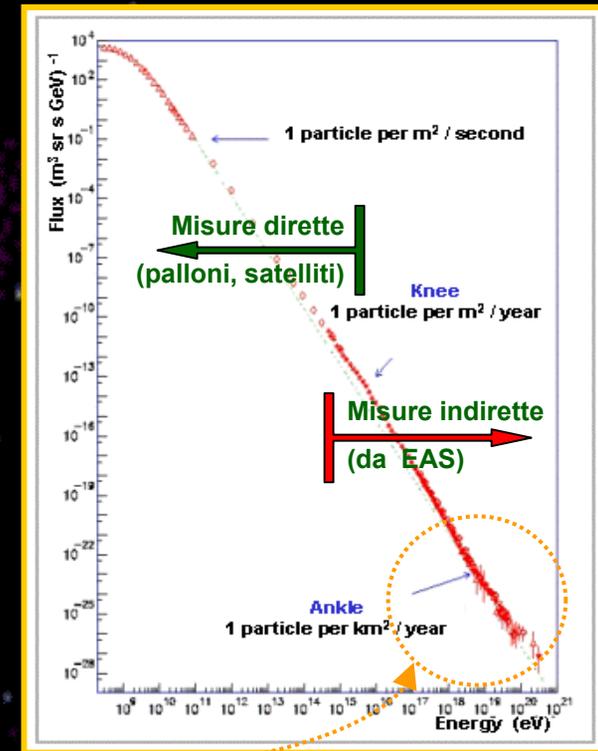
Ad energie superiori, il flusso dei raggi cosmici diminuisce drasticamente e la loro osservazione diretta diventa difficile.

Ma, fortunatamente, già a queste energie inizia il fenomeno degli sciami EAS che contengono un numero sufficiente di particelle secondarie cosicché i primari possono essere osservati **indirettamente** campionando le particelle secondarie in cascata sul suolo terrestre.



L'esperimento di Auger aveva già mostrato quanto potesse essere ampia l'estensione al suolo degli sciami, ...

... inizia così la costruzione dei grandi "array", schiere di rivelatori di particelle che, basati su principi fisici diversi, misurano a terra le dimensioni dello sciame, il numero e i diversi tempi di arrivo delle sue particelle.



Dove si "misurano" i raggi cosmici ?

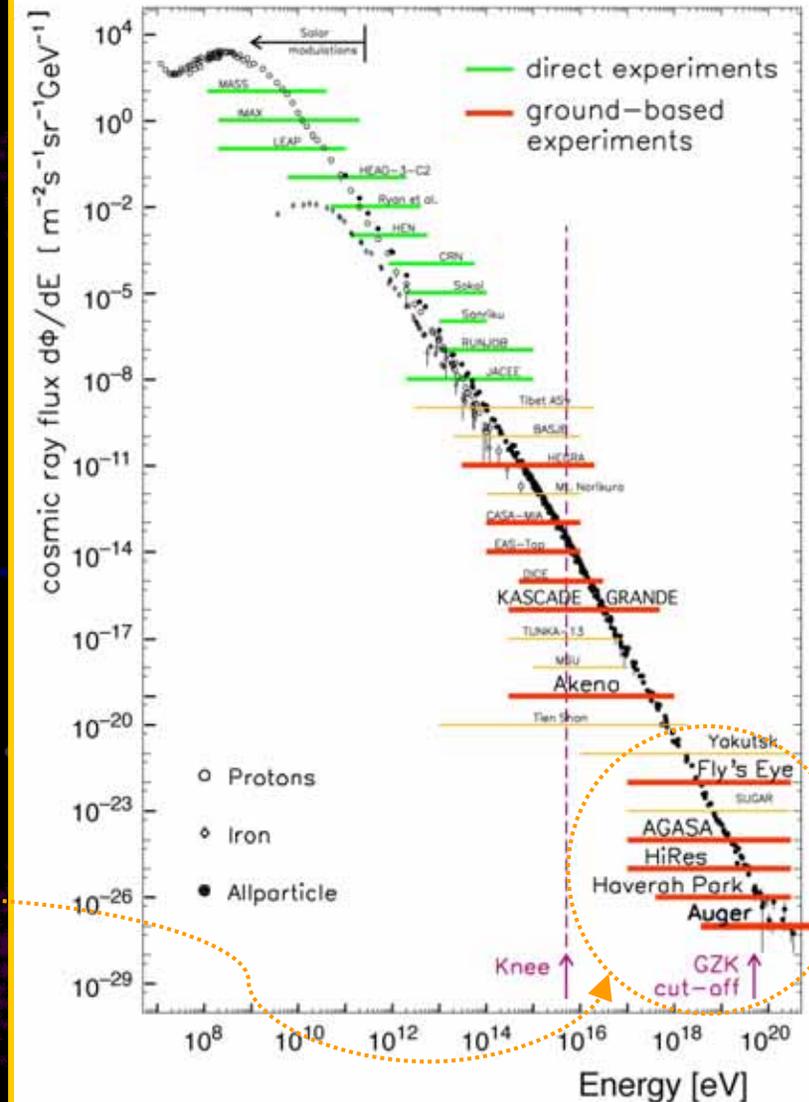
... ovunque, da diversi luoghi, a diverse altitudini ...

Spazio \Rightarrow primari ($< \sim 10^{15}$ eV),
secondari

Suolo terrestre \Rightarrow secondari

Laboratori sotterranei e sottomarini \Rightarrow particelle elusive,
neutrini, muoni

... zona delle alte energie ...
"ground-based" experiments



Il primo “array” di rivelatori di particelle



Presso la **stazione di Pamir**, in Russia, **Georgi Zatsepin** e collaboratori costruiscono il **primo array** di rivelatori Geiger-Müller correlati per l'osservazione degli sciami estesi.



Zatsepin e collaboratori durante la costruzione dell'array

Lo sciame più energetico osservato risultò prodotto da un primario di

$$E_0 \approx 10^{16} \text{ eV}$$

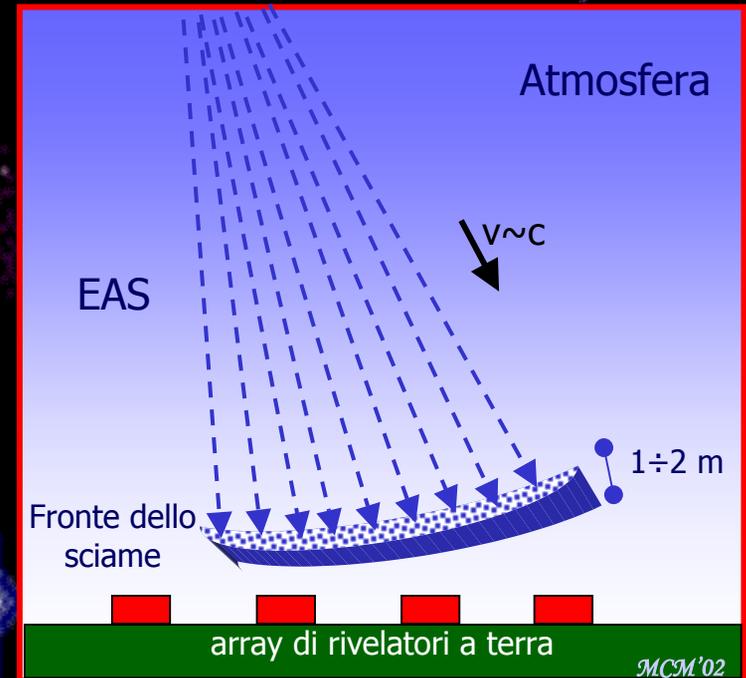
I metodi “density sampling” e “fast timing”



Il “Gruppo Raggi Cosmici” guidato da Bruno Rossi al M.I.T. mette a punto una nuova tecnica per determinare l’energia e la direzione di arrivo del CR primario che ha originato lo sciame EAS:

“Density sampling”: la distribuzione della densità di particelle secondarie osservate in diverse posizioni in un *array* di contatori è usata per localizzare il centro dello sciame EAS, e per risalire all’energia del CR primario.

“Fast timing”: la direzione d’arrivo del CR primario (assunta coincidente con l’asse dello sciame EAS) è determinata dalle differenze tra i tempi d’arrivo del fronte dello sciame di particelle sui vari contatori.

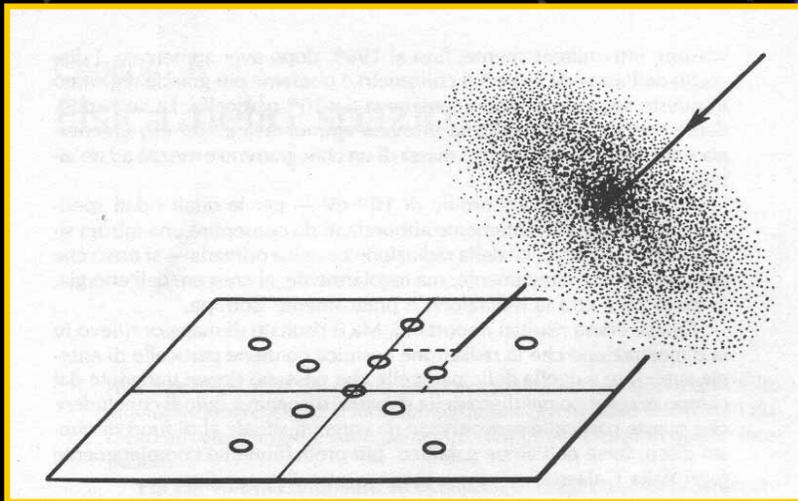
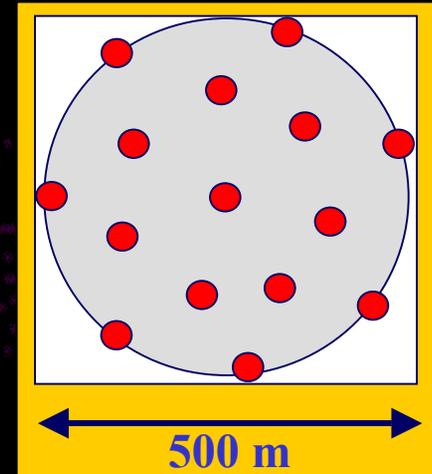


La tecnica del “density sampling” e del “fast timing” è alla base dei tanti esperimenti con *array* di rivelatori di particelle ...

Agassiz – array di scintillatori



Presso la **stazione di Agassiz**, Massachusetts, il **Gruppo Raggi Cosmici** del M.I.T. installa un *array* di 15 scintillatori plastici (di area 1 m² ciascuno) in configurazione circolare doppia ($\varnothing_{\text{max}} = 500\text{m}$). Gli scintillatori sono accoppiati a fotomoltiplicatori, ad oscillografi e ad un sistema di registrazione fotografica.



Ref.: B. Rossi, "Raggi Cosmici", 1971

L'analisi dei risultati evidenzia energie dei CR primari nell'intervallo

$$E_0 \approx 10^{15} \div 10^{18} \text{ eV}$$

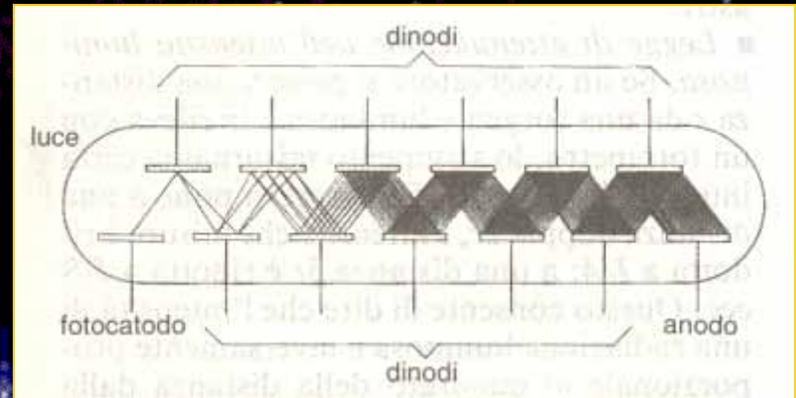
Inoltre viene osservata una particella di energia prossima a **10^{19} eV** .

Il fotomoltiplicatore

Basato sull'effetto fotoelettrico, permette di amplificare notevolmente un debole segnale luminoso, trasformandolo in una corrente elettrica.

Quando una radiazione luminosa incide sull'elemento sensibile (fotocatodo), questo emette elettroni per effetto fotoelettrico (Hertz, 1887), che vengono convogliati da un campo elettrico su una serie di dinodi.

Su ciascun dinodo gli elettroni si moltiplicano per effetto termoelettrico in un processo a cascata. La corrente che si ottiene sull'anodo può essere anche un miliardo di volte più intensa di quella iniziale.

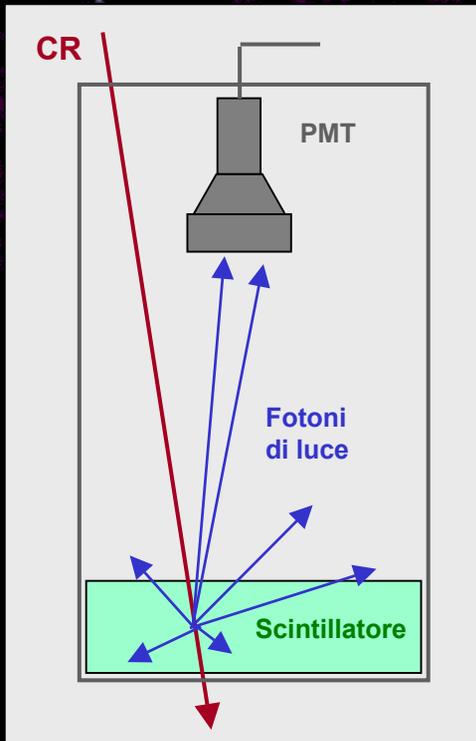


A seconda dell'elemento utilizzato come catodo, si possono costruire fotomoltiplicatori sensibili allo spettro elettromagnetico dai raggi X all'infrarosso.

L'idea di utilizzare l'emissione secondaria di elettroni nelle fotocellule fu dovuta a J. Slepian nel 1912

Rivelatori di particelle: gli scintillatori

Gli **scintillatori** più usati sono composti da materiale plastico.



Quando una **particella carica** attraversa il rivelatore, ne eccita la plastica scintillante che, diseccitandosi, emette **fotoni di luce**.

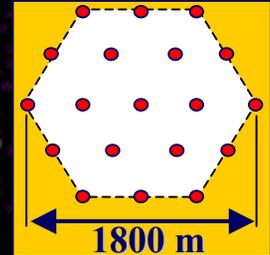
Un **fotomoltiplicatore** (PMT) rivela i fotoni emessi e trasforma il debole segnale luminoso in **segnale elettrico** amplificato e misurabile.

Il segnale elettrico, proporzionale alla quantità di luce ricevuta, ci fornisce quindi informazioni sul numero di particelle cariche che hanno attraversato il rivelatore.

Volcano Ranch, la "Regina del deserto"



Nel deserto di **Volcano Ranch**, New Mexico, **Jonh Linsley** e **Livio Scarsi** installano 19 contatori scintillatori plastici (area 3.3 m² ciascuno) disposti in un *array* a forma di esagono regolare ($\varnothing_{\text{max}} = 1800$ m). Gli scintillatori vengono accoppiati a fotomoltiplicatori e ad oscillografi corredati da un sistema di registrazione fotografica.



© Copyright J. Linsley and L. Scarsi private archive. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.



Volcano Ranch, MIT "Desert Queen", e il capannone della cabina di comando

© Copyright J. Linsley and L. Scarsi private archive. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Livio Scarsi e John Linsley



Fra i tanti sciami registrati, ne viene osservato uno contenente

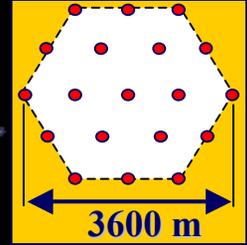
30 miliardi di particelle

originato da un cosmico primario di energia

$$E_0 = 6 \times 10^{19} \text{ eV}$$



Il diametro dell'array di Volcano Ranch viene portato a 3.6 km e **John Linsley** registra uno sciame di **50 miliardi di particelle !**



E' questa **la prima** osservazione indiretta di un CR primario di energia

$$E_0 = 10^{20} \text{ eV}$$

ed ha mantenuto il primato per diversi anni.



Linsley muove la paglia (usata come isolante termico) su uno degli scintillatori per allontanare i serpenti, sempre presenti nell'area desertica di Volcano Ranch.

La radiazione di fondo e il limite GZK



Arno Penzias e Robert Wilson misurano la radiazione cosmica di fondo (CMB, Cosmic Microwave Background) che, riconosciuta come l'eco del Big Bang, permea l'intero Universo.



Kenneth Greisen e, indipendentemente, Georgi Z̄atsepin e Vadim Kuzmin dimostrano che l'energia dei raggi cosmici viene ridotta a causa della loro interazione con la radiazione CMB, e che non è possibile osservare raggi cosmici, assumendo essi siano protoni provenienti da distanze cosmologiche, di energia superiore a $\sim 5 \times 10^{19}$ eV (il "limite GZK" dai nomi degli scopritori).

Come spiegare allora l'evento da 10^{20} eV di Volcano Ranch ? evento particolare ? irripetibile ?

... il mistero si fa sempre più profondo ...

... per certificare l'esistenza di raggi cosmici di energia superiore al limite GZK, occorrono *arrays* di rivelatori sempre più grandi ...

... oppure bisogna pensare a tecniche diverse di osservazione e rivelazione

Haverah Park – array di rivelatori Čerenkov ad acqua



Alan A. Watson e collaboratori installano, nel sito di Haverah Park, UK, un *array* di 200 rivelatori Čerenkov ad acqua, accoppiati a fotomoltiplicatori e raggruppati in 48 stazioni in coincidenza disposte su un'area di 12 km² e distribuite in gruppi a distanze variabile da 150 metri fino a 2 km dal centro del sito.

In vent'anni di attività dell'array, furono osservati anche

4 eventi di energia $E_0 > 10^{20}$ eV



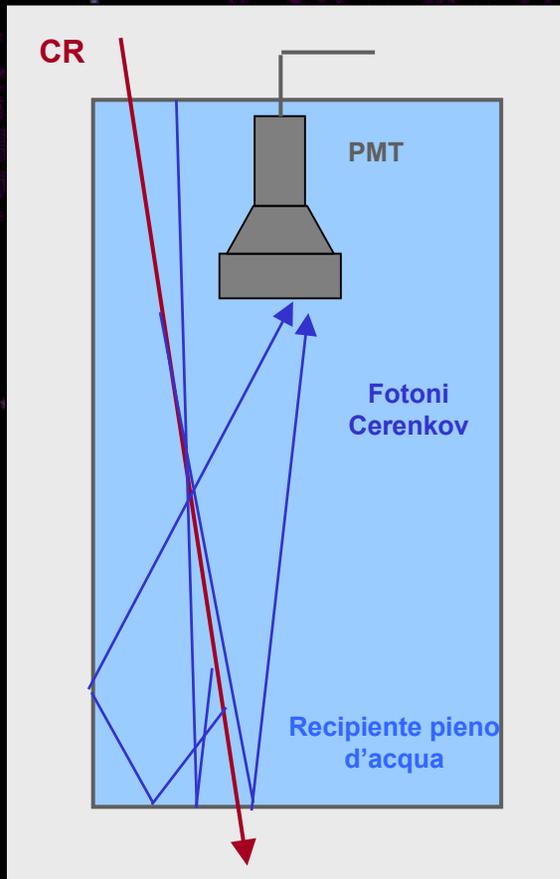
La mappa dell'array di Haverah Park. I piccoli cerchi identificano le stazioni di rivelatori. La cabina (hut) è al centro della postazione.



Dopo vent'anni, alla chiusura dell'array di Haverah Park, l'acqua dei contatori Čerenkov era ancora limpida ... e buona da bere!

L'effetto Čerenkov ed il rivelatore Čerenkov ad acqua

L'effetto prende il nome da **Pavel Alekseyevich Čerenkov** che lo scoprì nel **1934**. Nell'acqua, la luce viaggia a $\sim 220\,000$ km/s, quasi il 70% della sua velocità nel vuoto ($\sim 300\,000$ km/s).



Quando una **particella carica** attraversa l'acqua a velocità maggiore di quella della luce nell'acqua stessa, vengono quindi emessi deboli lampi di luce, i cosiddetti **fotoni Čerenkov**.

Vasche d'acqua di adeguata profondità ed equipaggiate con **fotomoltiplicatori** possono quindi misurare l'energia rilasciata sotto forma di luce Čerenkov dalle particelle di sciame EAS.

Le pareti del recipiente sono internamente ricoperte da materiale riflettente così da convogliare quanta più luce Čerenkov possibile verso il fotomoltiplicatore.

Yakutsk – il più complesso fra gli arrays



Il sito di **Yakutsk** in Siberia ospita un *array* contenente (nel corso degli anni) fino a 86 rivelatori a scintillazione e 43 rivelatori di luce Čerenkov, accoppiati a fotomoltiplicatori e raggruppati in 43 stazioni in coincidenza disposte su un'area ampia fino a 25 km². Le interdistanze fra le stazioni (alcune delle quali installate in profondità) variavano dai 100 ai 500 metri.

L'evento CR più energetico, $E_0 \sim 1.2 \times 10^{20}$ eV, fu osservato il 7 Maggio 1989.

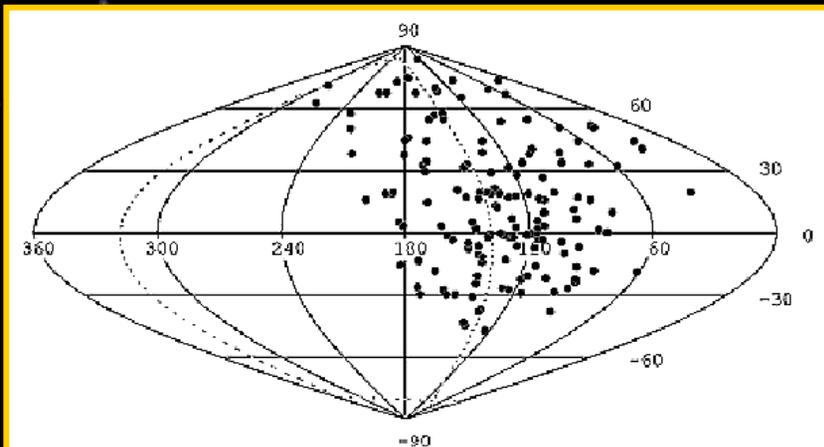


Figure 1: Yakutsk array data (235 showers above 10^{19} eV, $\theta < 60^\circ$).

Nel 1995, il sito di **Yakutsk** è stato riconfigurato (area di 10 km²) per studi dettagliati sulla struttura di sciami EAS prodotti da cosmici di energia $\sim 10^{19}$ eV.

AGASA – il primo dei “giganti”



Presso l'Osservatorio di Akeno, Giappone, viene costruito il grande *array* **AGASA, Akeno Giant Air Shower Array**. AGASA copre un'area di $\sim 100 \text{ km}^2$ e consiste di 111 rivelatori a scintillazione di area $\sim 2.2 \text{ m}^2$ ciascuno, disposti a $\sim 1 \text{ km}$ di distanza l'uno dall'altro. Inoltre sono presenti 27 rivelatori schermati di area variabile per l'osservazione dei muoni.



La disposizione degli scintillatori di AGASA

AGASA ha permesso la rilevazione di una decina di raggi cosmici di energia maggiore di 10^{20} eV .

L'evento CR più energetico,

$$E_0 \sim 2 \times 10^{20} \text{ eV}$$

fu osservato il 3 dicembre 1993.

Il sito di AGASA è stato chiuso nel 2004.

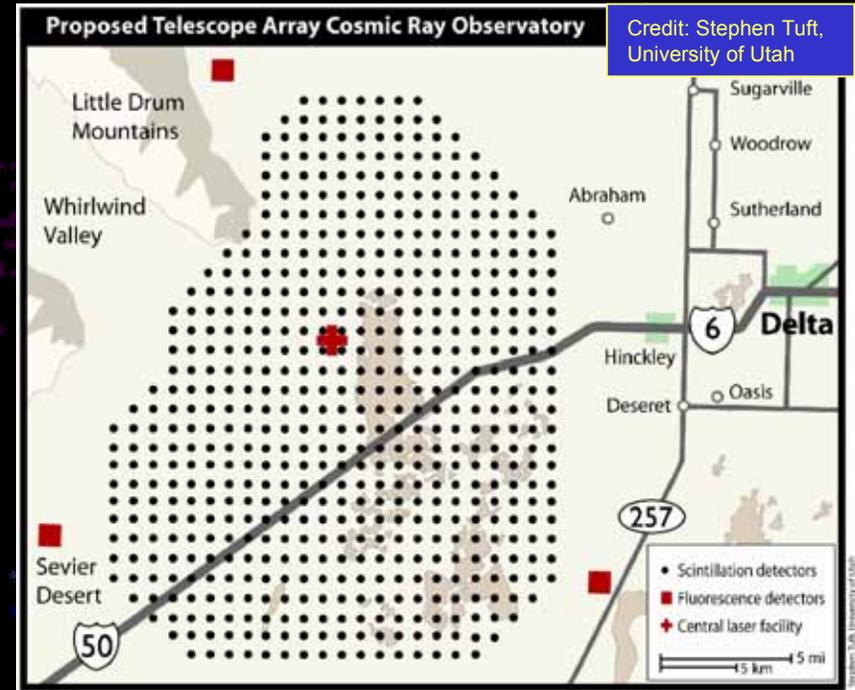
Rif.: <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>

Telescope Array – il nuovo sito in Utah

Il nuovo **Telescope Array (TA)**, oggi in fase di costruzione nel Deserto dello Utah, Millard County, combina insieme i metodi di fluorescenza e di scintillazione per rilevare raggi cosmici con energie superiori a 3×10^{18} eV.

La composizione di TA prevede:

- 576 rivelatori di scintillazione (tipo AGASA) disposti a distanza di ~ 1 km l'uno dall'altro su un'area di ~ 1000 km², e
- 3 telescopi di fluorescenza (tipo HiRes), distribuiti all'esterno dell'array.

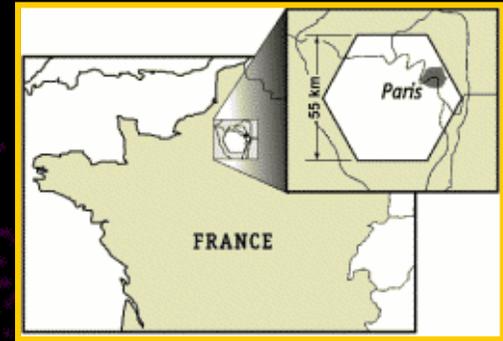


AUGER – l'ultimo degli array giganti ?

Nel 1999, in Argentina, il gruppo internazionale guidato da James W. Cronin e Alan A. Watson inizia la costruzione del "sito sud" del gigantesco AUGER (Osservatorio Pierre Auger) (completamento previsto nel 2005) che coprirà un'area di $\sim 3000 \text{ km}^2$, circa 10 volte l'estensione della città di Parigi !

La composizione di AUGER prevede l'installazione di:

- 1600 rivelatori Čerenkov ad acqua (da 11 000 litri ciascuno) a distanza di 1.5 km l'uno dall'altro, e
- 4 stazioni con 24 telescopi di fluorescenza ciascuna, distribuite all'interno dell'array.



La stima osservativa prevista è di 30 eventi di raggi cosmici all'anno con energie $E_0 > 10^{20} \text{ eV}$, oltre ad un gran numero di raggi cosmici ad energie più basse.

Il progetto AUGER completo prevede l'installazione di un secondo sito di 3000 km^2 nell'emisfero Nord, in Utah.

Il 21 Ottobre 2003, con l'installazione del suo centesimo rivelatore Čerenkov, AUGER si estende oggi su 180 km^2 , superando AGASA e diventando il più grande array del mondo.

... i grandi array di rivelatori a terra

10 km² ● Volcano Ranch, New Mexico (1957-1963)

12 km² ● Haverah Park, UK (1967-1987)

25 km² ● Yakutsk, Siberia (1970's)

100 km² ● AGASA, Giappone (1991-2004)

1000 km² ● TA, Utah (2004, in costruzione)

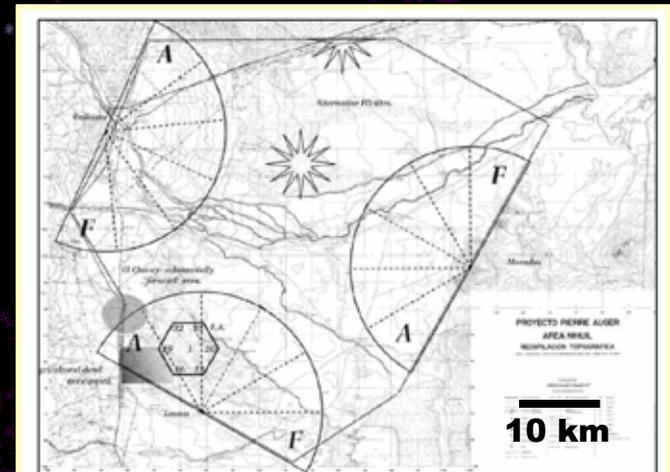
3200 (+ 3200) km²

AUGER

Argentina (& Utah)

30 eventi/anno @ $E_0 > 10^{20}$ eV
(stima osservativa)

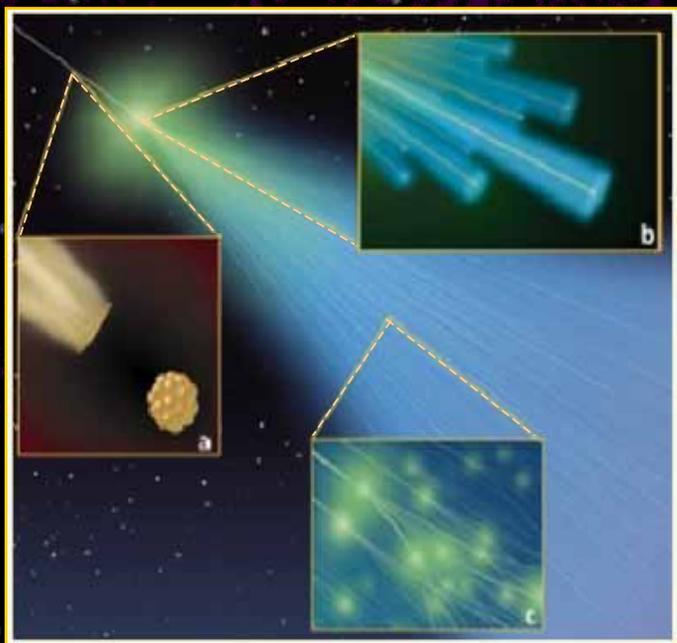
$E_0 > 10^{20}$ eV → 1 evento per km² / secolo



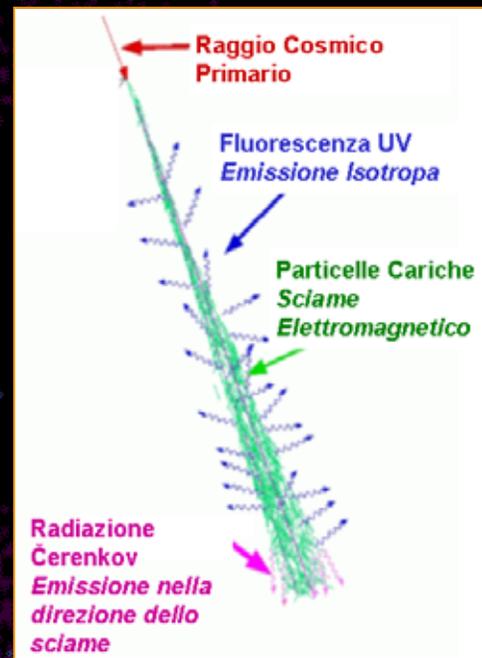
1600 rivelatori particelle
(24 telescopi fluorescenza)

La fluorescenza atmosferica ...

Un'altra metodologia di osservazione degli EAS è legata al fenomeno della fluorescenza atmosferica: **l'atmosfera terrestre è un enorme scintillatore naturale**.



Nel loro passaggio attraverso l'atmosfera, le particelle cariche dello sciame EAS eccitano le molecole d'aria ed in particolare le **molecole di azoto** in essa presenti; queste, ritornando al loro "stato fondamentale", emettono **luce di fluorescenza** nella banda dell'**ultravioletto**.



La **fluorescenza** è emessa **isotropicamente** e può essere rivelata **a grandi distanze dall'asse dello sciame**.



... e sue caratteristiche di base

Uno sciame EAS prodotto da un cosmico primario di energia $E_0 > 10^{19}$ eV forma nell'atmosfera una **strisciata di fluorescenza** lunga 10-100 km o più, in dipendenza della natura del primario e dell'angolo di incidenza rispetto alla verticale.

E tutto ciò in qualche milionesimo di secondo (30-300 ms) !

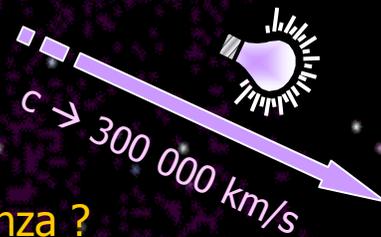
Negli *array* di rivelatori di particelle, viene misurata solo la distribuzione laterale dello sciame EAS al livello dell'osservazione.

Il metodo della fluorescenza permette per la prima volta una misura della densità di ionizzazione in un singolo sciame a varie altezze e quindi la registrazione dello sviluppo longitudinale dello sciame stesso (→ energia).

Ma la **produzione di fluorescenza** è **piccola**: il suo debole bagliore si può paragonare ad una lampadina UV da pochi Watt che viaggia alla velocità della luce.

Cosa occorre quindi per registrare la luce di fluorescenza ?

- elettronica veloce e molto sensibile
- osservazioni notturne senza luna (o quasi)
- cielo sereno (maggior efficienza)
- assenza di inquinamento luminoso



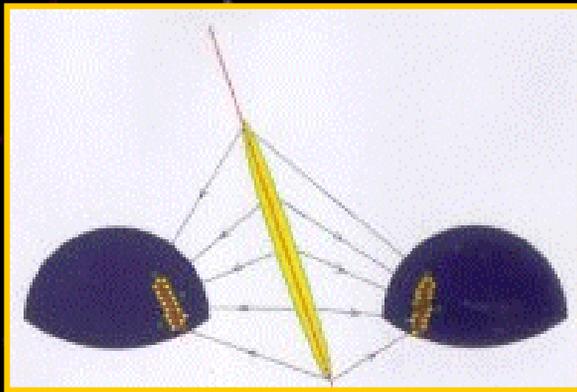
Fly's Eye – visione mono e stereo



Il Gruppo Raggi Cosmici della Università dello Utah guidato da George Cassiday inizia, nella zona desertica di Dugway, presso Salt Lake City, la costruzione di Fly's Eye (occhio di mosca), complesso di rivelatori di fluorescenza per lo studio dei raggi cosmici di energia elevata.

Un primo *array* di rivelatori comprendeva 67 moduli, contenenti ciascuno uno specchio sferico (\varnothing 1.6 m) e una dozzina di fotomoltiplicatori montati sulla superficie focale, a guardare una porzione di cielo di $5^\circ \times 5^\circ$ in configurazione da "occhio di mosca".

Un secondo *array*, contenente 36 moduli dello stesso tipo, venne costruito nel 1986, a distanza di 3.4 km dal primo.



Il 15 Ottobre 1991, Fly's Eye misura l'evento più energetico mai osservato:

un raggio cosmico primario di energia

$$E_0 = 3.2 \times 10^{20} \text{ eV} \quad (\sim 50 \text{ Joules}) !$$

50 Joule → energia cinetica di una pallina da baseball ben lanciata, tutta concentrata in una singola microscopica particella subatomica! (massa del protone $\sim 10^{-27}$ kg)



HiRes – il successore di Fly's Eye



Dal 2000 è operativo **HiRes, High Resolution Fly's Eyes**, costruito presso lo stesso sito di Dugway in Utah che aveva ospitato il predecessore Fly's Eye.

L'apparato è costituito da due siti (HiRes_1 e HiRes_2) posizionati su due montagnole a distanza di 13 km l'uno dall'altro, che guardano il cielo a 360° ma lungo due diverse elevazioni azimutali. HiRes_1 comprende 21 moduli che osservano il cielo tra 3° e 16° di elevazione, mentre i 42 moduli di HiRes_2 osservano tra 3° e 30° di elevazione. Ogni modulo è formato da uno specchio (Ø 3 metri) che colleziona e focalizza la luce sul rivelatore di fluorescenza composto da 256 tubi fotomoltiplicatori PMT, ciascuno che guarda una porzione di cielo di 1° di diametro. L'area di cielo monitorata ogni notte corrisponde a oltre 3 000 km² a terra.

Fra gli altri, ad oggi HiRes ha osservato **2 eventi** di energia $E_0 > 10^{20}$ eV.

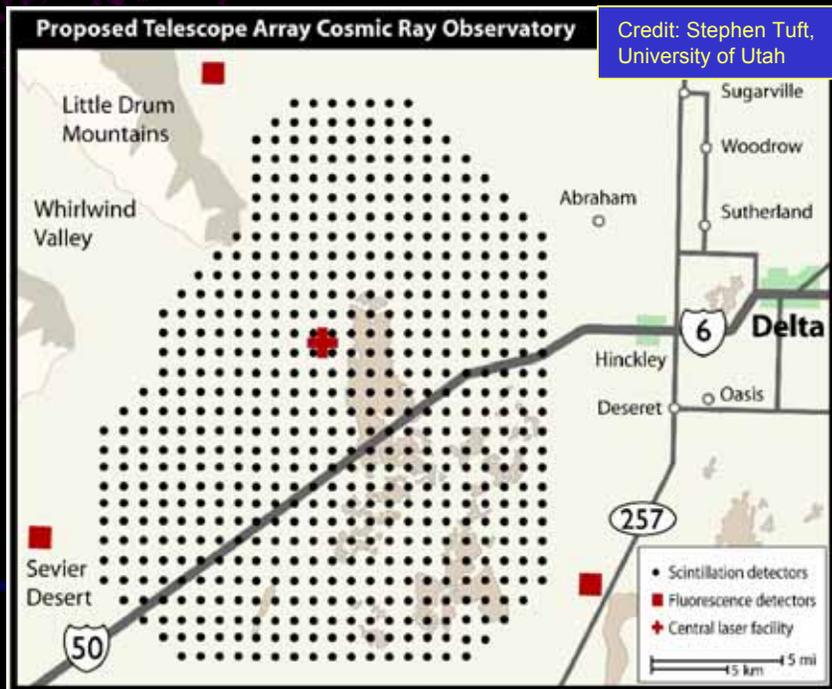


La postazione di HiRes_2 e i suoi moduli

TA e la fluorescenza

Insieme ai rivelatori di scintillazione, anche 3 telescopi di fluorescenza faranno parte dell'osservatorio TA in costruzione in Utah, a 90 km a Sud del sito di HiRes.

I telescopi, a specchio, simili a quelli di HiRes, verranno collocati all'esterno dell'array di scintillatori, su 3 colline (interdistanza media di 35 km) e calibrati tramite un sistema laser posto al centro dell'array.

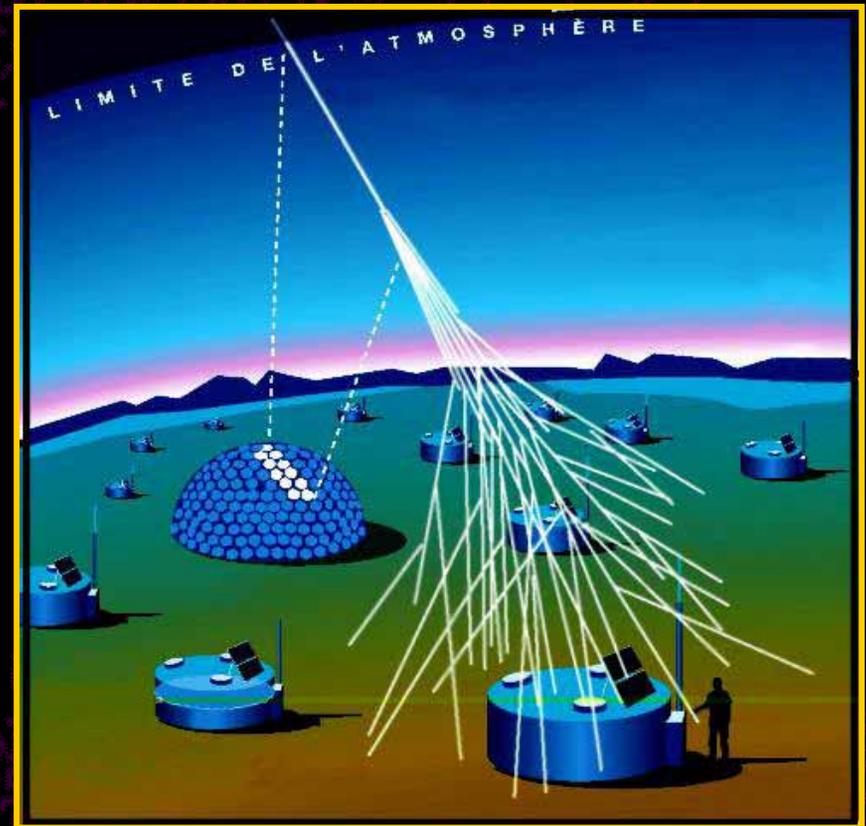


AUGER e la fluorescenza

Insieme ai rivelatori Čerenkov ad acqua, anche i rivelatori di fluorescenza fanno parte dell'osservatorio **AUGER** in costruzione in Argentina.

Il progetto prevede l'installazione di 3 "occhi", ciascuno con visione di 180° , posti lungo il perimetro dell'*array* Čerenkov superficiale, e di un "occhio" centrale con visione 360° , in modo da garantire la rivelazione ibrida della maggior parte degli eventi.

I primi due "occhi" sono già installati presso le stazioni perimetrali di Los Leones e di Coihueco, a distanza di 45 km l'uno dall'altro.



Perchè studiare i raggi cosmici ?

I raggi cosmici primari costituiscono l'unico campione diretto della materia esistente al di fuori del sistema solare

Perchè studiare i raggi cosmici di energia estrema ?

Perché ...

-  ... sono un mistero
(origine, composizione, accelerazione, propagazione, energia)
-  ... potrebbero rivoluzionare l'astrofisica, e non solo
(modelli teorici non definitivi)
-  ... forniscono un potente strumento scientifico
(energie in gioco difficilmente raggiungibili con acceleratori).
Nemmeno il grande acceleratore superconduttore LHC in costruzione al CERN, con il suo limite di ~ 10 TeV (10^{13} eV), potrà competere con i Raggi Cosmici più energetici conosciuti !

Il mistero dei raggi cosmici di più alta energia

EECR (EHECR) : Extremely High Energy Cosmic Ray $\rightarrow E_0 > \sim 5 \times 10^{19}$ eV

Tante domande sugli EECR non hanno avuto ancora risposta:

- da dove vengono ?
- quale è la loro massima energia degli EECR, se ne esiste una ?
- Cosa sono gli EECR ? protoni, nuclei, neutrini, ...?
- Quali processi e quali oggetti astronomici possono generare radiazione alle energie estreme finora osservate?
- Esiste qualche anisotropia che indichi delle regioni sorgente ?
- Quale è il flusso dei neutrini alle energie estreme ?
- La teoria della relatività speciale è valida alle energie estreme ?
- Sono gli EECR legati al Big Bang ? e alla "materia oscura" ?

Sull'origine dei raggi cosmici

L'identificazione delle sorgenti di origine è legata all'energia dei raggi cosmici stessi.

Per energie entro il limite GZK ($\sim 5 \times 10^{19}$ eV), i raggi cosmici sono prodotti in sistemi celesti dotati di intensi campi magnetici che riescono ad accelerare i nuclei ad alte energie o sono prodotti durante l'esplosione di una stella.

Per energie oltre il limite GZK ($E_0 > 5 \times 10^{19}$ eV), ... il mistero !

$10^9 \div 10^{10}$ eV:

origine solare

$10^{10} \div 10^{15}$ eV:

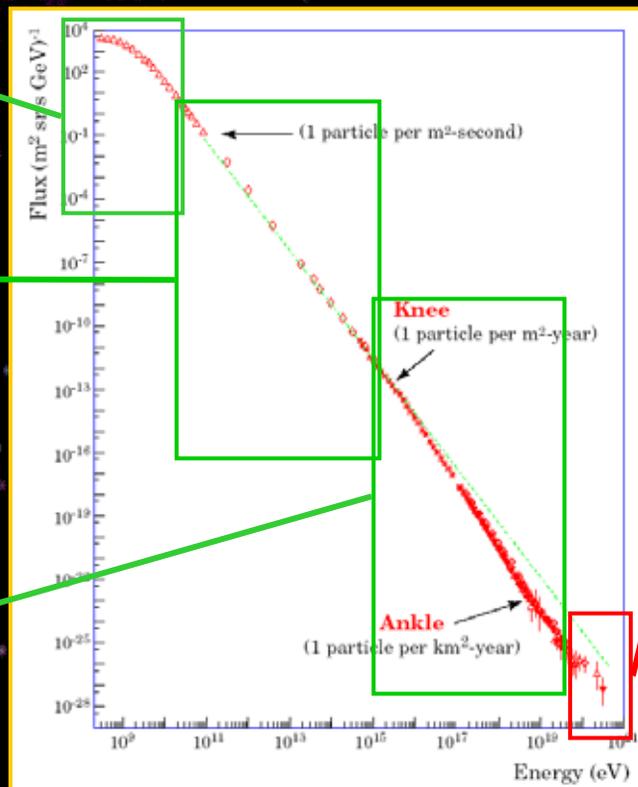
origine galattica

(esplosioni di SuperNovae)

$10^{15} \div 5 \times 10^{19}$ eV:

origine extragalattica

(esplosioni di Super Novae, pulsar con intensi campi magnetici, buchi neri, nuclei galattici attivi)



oltre 5×10^{19} eV:

origine ignota

- Collisioni tra galassie o ammassi di galassie, radio galassie ? → ma c'è una contraddizione: il fenomeno EECR appare isotropo anche se il fondo cosmico CMB impedirebbe loro di percorrere distanze cosmologiche)
- Decadimento di particelle create subito dopo il Big Bang ? → allora molti EECR dovrebbero essere neutrini

Raggi cosmici di energia $E_0 > 10^{20}$ eV osservati ad oggi

Il numero di raggi cosmici che colpiscono la Terra diminuisce al crescere dell'energia:

$E_0 \approx 10^8$ eV \rightarrow 100 eventi / m² / secondo

$E_0 \approx 10^{15}$ eV \rightarrow 1 evento / m² / anno

$E_0 \approx 10^{19}$ eV \rightarrow 1 evento / km² / anno

$E_0 > 10^{20}$ eV \rightarrow 1 evento / km² / secolo

Esperimento	Periodo Attività	Numero di eventi osservati ad $E_0 > 10^{20}$ eV	E_0 max ($\times 10^{20}$ eV)
Volcano Ranch	1957 - 1963	1	1.4
Haverah Park	1967 - 1987	4	1.2
SUGAR (scint)	1968 - 1978	(8 ?)	(?)
Yakutsk	1970 - 1995	1	1.1
Fly's Eye	1981 - 1993	1	3.2
AGASA	1990 - 2004	12	2.1
HiRes	2000 - 2004	2	2

e il risultato di quasi quarant'anni di osservazioni con i vari esperimenti ha evidenziato soltanto una ventina di raggi cosmici di energia $E_0 > 10^{20}$ eV.

Come si può aumentare la statistica osservativa ?

Per osservare raggi cosmici di energia sempre più elevata ed ottenere una buona **statistica osservativa in un tempo "ragionevole"** occorrerebbero, date le conoscenze attuali,

- rivelatori di particelle disposti su una superficie enorme, oppure
- siti più adeguati per i rivelatori di fluorescenza.

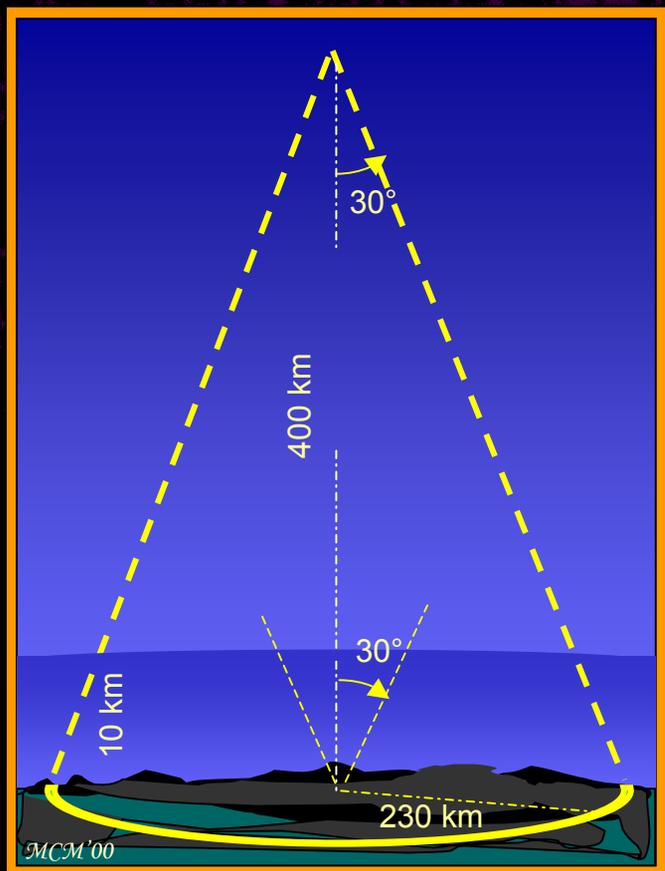
Ma tutto ciò non è ottenibile sulla superficie terrestre.



La fluorescenza dallo Spazio

Per aumentare la statistica di rivelazione di raggi cosmici di energia estrema
($E_0 > 10^{20}$ eV \rightarrow 1 evento per km² / secolo)

la fluorescenza atmosferica può essere osservata dallo Spazio



Vantaggi:

- ✓ grande massa di atmosfera (10^{12} ton)
- ✓ copertura di tutto il cielo (Nord e Sud)
- ✓ osservazione del Čerenkov riflesso dalla superficie terrestre, dal mare, dalle nuvole

Statistica di rivelazione attesa (da 400 km):

> 300 eventi EECR per anno

almeno una decina di volte rispetto a quanto previsto dall'Osservatorio AUGER

Evoluzione di idee e proposte “spaziali” ...

1979 SOCRAS - Satellite Observatory of Cosmic Ray Showers

1994 MASS – Maximum-energy Air Shower Satellite

1995 AirWatch (Europa/IFCAI,Palermo)

1996 OWL (USA/GSFC)

stereo

?

mono

1997-1999 AirWatch-OWL (Europa), OWL-AirWatch (USA)

1999 EUSO – Extreme Universe Space Observatory (a bordo di satellite)

2000 ESA raccomanda EUSO come telescopio sulla Stazione Spaziale ISS

2001-2004 Studio di fattibilità e progetto concettuale (Fase A) di EUSO sulla ISS

EUSO, Extreme Universe Space Observatory



What

EUSO è la prima Missione Spaziale rivolta all'esplorazione dei confini estremi dell'Universo tramite la rivelazione dei raggi cosmici di energia estremamente elevata (EECR) usando l'atmosfera terrestre notturna come un rivelatore gigante

Why

L'obiettivo è di ottenere una descrizione dettagliata dello spettro degli EECR oltre 5×10^{19} eV insieme alla mappa delle loro direzioni di arrivo, ed aprire, possibilmente, il canale dell'Astronomia dei Neutrini Cosmici

Where

EUSO è previsto quale "payload" esterno della Stazione Spaziale Internazionale ISS

When

Il programma prevede una missione di tre anni a partire dal 2010 (il cosiddetto "Studio di Fase A" è stato completato nel Maggio 2004)

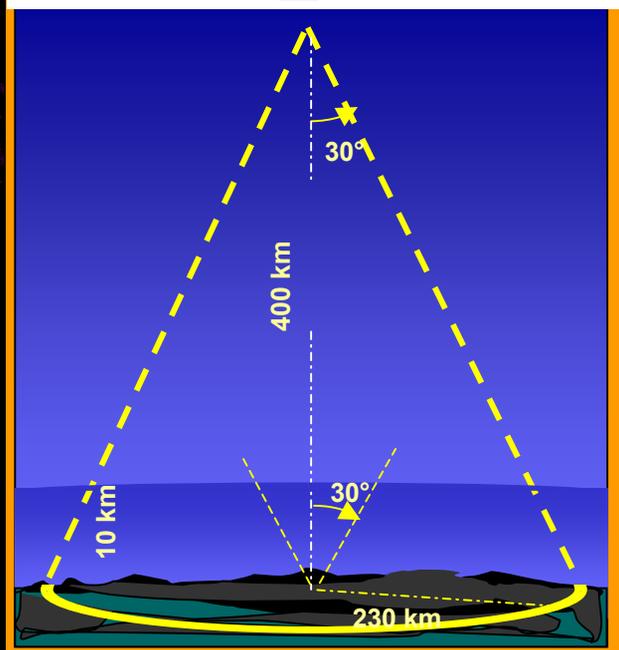
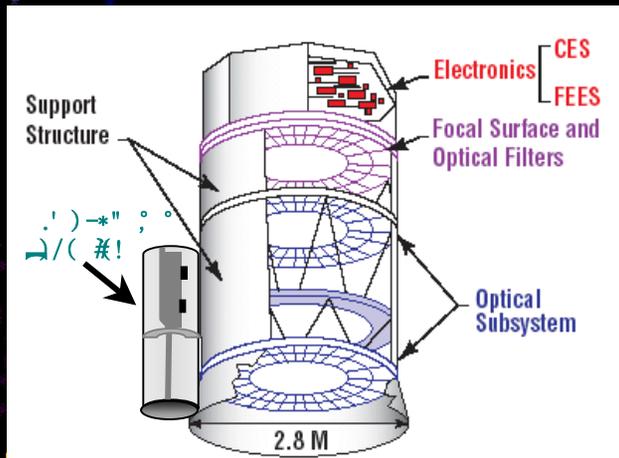
Who

EUSO, con leadership italiana, è una missione dell'Agenzia Spaziale Europea ESA ed è condotta da un Consorzio Internazionale: oltre 150 ricercatori da 50 Istituzioni in Italia, Francia, Germania, Portogallo, Spagna, Svizzera, Brasile, Giappone e USA





EUSO – il telescopio principale e i suoi parametri di base



Electronica veloce, modulare, capace di gestire oltre 250 000 canali

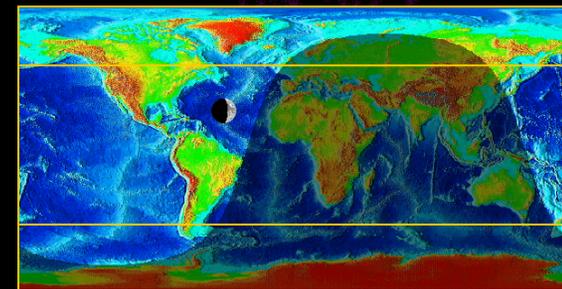
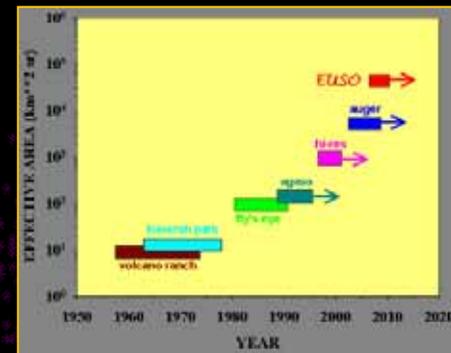
Rivelatori veloci MAPMT (10 ns resolution time)

Campo di vista (FoV) a grande angolo FoV $\pm 30^\circ$

Ottiche lenti di Fresnel $\sim 2.5 \text{ m } \varnothing$

Monitoraggio dell'atmosfera Lidar e camera IR

Wavelength Range 330÷400 nm (337, 357, 391)



Fluorescenza dallo Spazio– vantaggi:

- ✓ Enorme massa di atmosfera (10^{12} ton)
- ✓ Copertura di tutto il cielo (Nord e Sud)
- ✓ Osservazione della luce Čerenkov riflessa
- ✓ Alta statistica osservativa:

$E_0 > 10^{20} \text{ eV} \rightarrow$

- > 100 EECRs per anno (ipotesi GZK)
- > 1000 EECRs per anno (estensione Super-GZK)

Osservatori ground-based:

~ 40 anni di operazione

~ 25 eventi EECR rilevati a

$E_0 > 10^{20} \text{ eV}$

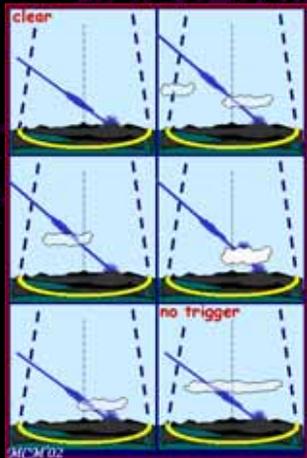
EUSO – l'atmosfera, le nuvole, il background, ...



L'atmosfera terrestre è il rivelatore primario e gioca un duplice ruolo in *EUSO* :

- mezzo di emissione della luce (produzione di fluorescenza UV da Azoto, luce Čerenkov UV associata), e
- mezzo di trasmissione dove la luce (fluorescenza, Čerenkov diffuso e riflesso) si propaga e si attenua dal luogo di emissione fino al sito del telescopio.

Dipendenze principali: energia dello sciame, altezza dell'interazione, caratteristiche dell'aria.



Le nuvole possono:

- nascondere il segnale (fluorescenza e/o Čerenkov),
- nascondere il massimo di fluorescenza,
- influenzare la proporzionalità tra il segnale rilevato e l'energia dello sciame

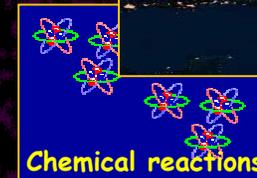
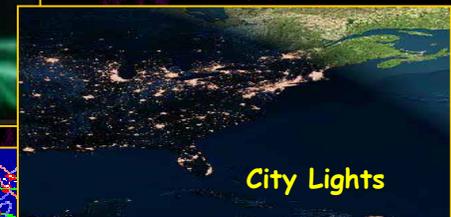
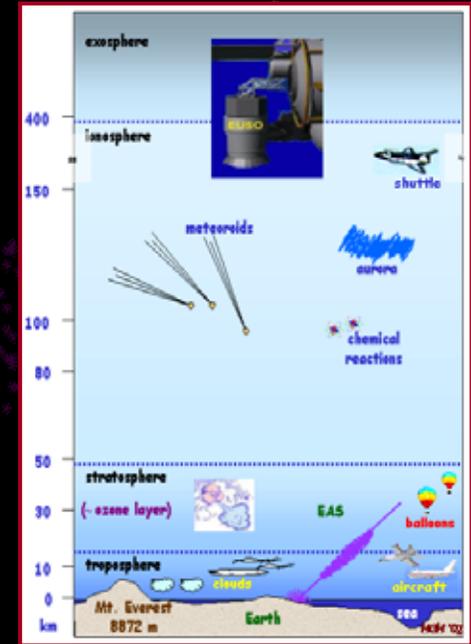
in dipendenza della:

- altezza della sommità delle nuvole,
- profondità ottica delle nuvole,
- inclinazione dello sciame (direzione di arrivo)

Guardando al nadir, *EUSO* sarà sensibile:

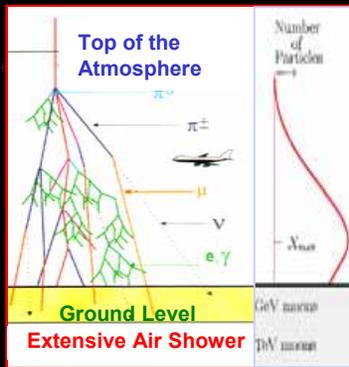
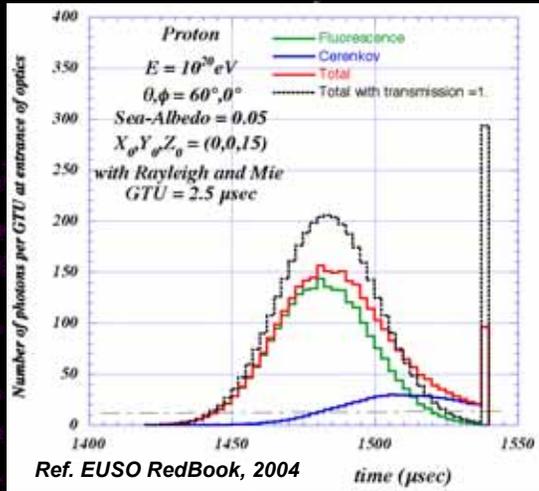
- a qualsiasi sorgente di luce UV presente nell'alta atmosfera,
- alla luce che proviene dallo Spazio ed è riflessa verso l'alto dalla Terra stessa.

Il livello di "background" dipende da vari parametri quali posizione geografica, fasi lunari, condizioni meteorologiche e stagionali, sorgenti "man-made".

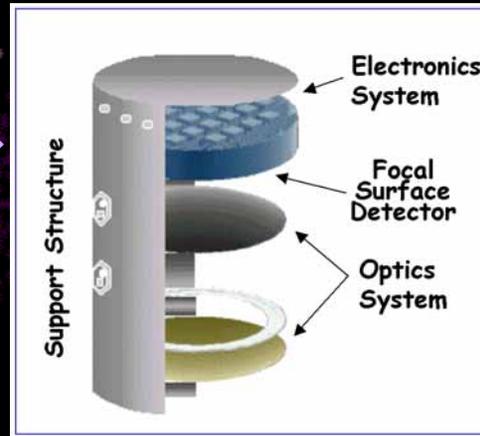


EUSO – telescopio e registrazione del segnale

Il segnale in arrivo su EUSO

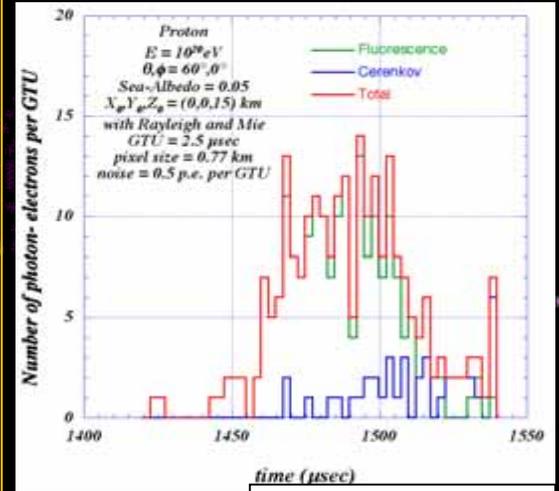


Il telescopio EUSO



Il segnale apparirà come un evento a **singola traccia** (immerso nel background) la cui durata, posizione e intensità sono collegate alla direzione di arrivo, energia e natura del Cosmico Primario.

Il segnale registrato da EUSO



Ref. EUSO RedBook, 2004

L'immagine spazio-temporale è data in termini di proiezioni X-T e Y-T dei foto-elettroni collezionati sulla superficie focale, dove X e Y sono le coordinate all'interno del campo di vista; T misura lo sviluppo dello sciame in profondità, fornendo informazioni sulla lunghezza dello sciame nella terza dimensione. Il segnale di background è "incoerente", mentre quello della traccia è coerente in spazio e tempo.

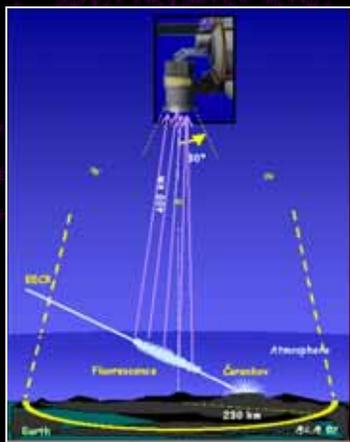
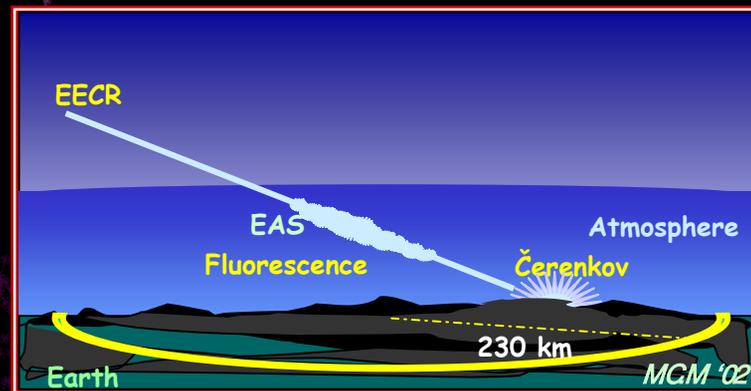
EUSO – modo operativo



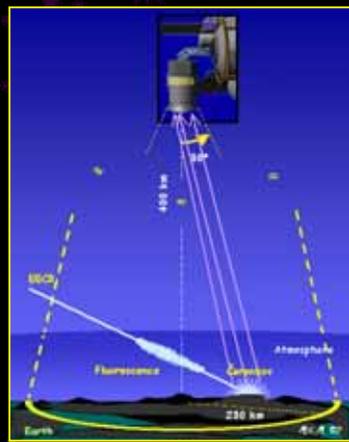
STEP 0 - La particella EECR che entra nell'atmosfera crea uno sciame EAS accompagnato da emissione isotropa di luce di fluorescenza UV.

Uno sciame EAS corrispondente ad un primario di energia $\sim 10^{20}$ eV forma una strisciata di fluorescenza di 10-100 km lungo il suo passaggio nell'atmosfera, in funzione della natura del primario e del suo angolo di incidenza rispetto alla verticale.

Fotoni Čerenkov altamente collimati sono prodotti lungo la direzione di arrivo dello sciame.

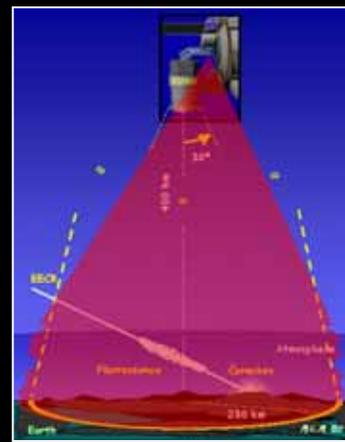


STEP 1 - La luce di fluorescenza UV viene registrata dal telescopio EECR/v



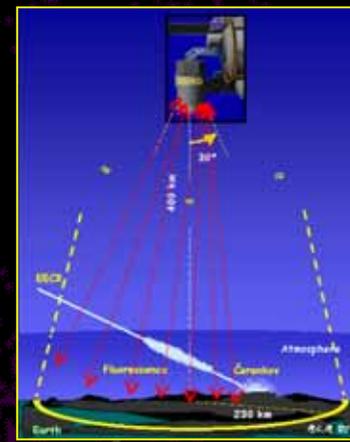
STEP 2 - Fotoni Čerenkov altamente collimati sono prodotti lungo la direzione di arrivo dello sciame.

Al punto di impatto sulla superficie terrestre, o sulla sommità di una nuvola, la luce UV riflessa/diffusa viene visualizzata dal telescopio EECR/v



STEP 3 - Il telescopio EECR/v registra sempre ma quando l'intensità del segnale letto è superiore ad un dato livello, l'elettronica comprende che il segnale potrebbe essere quello "buono" e "triggera".

Viene presa una fotografia del campo di vista (FoV) nell'infrarosso al momento del trigger.



STEP 4 - Il "sounding" dell'atmosfera viene infine eseguito da un sistema LIDAR lungo la direzione dello sciame.

EUSO – obiettivi scientifici e sfida tecnologica



- Produrre evidenza statistica significativa dell'esistenza dei raggi cosmici EECR di energia estremamente elevata ($E_0 > 5 \times 10^{19}$ eV, il limite GZK)
- Ottenere una descrizione dettagliata dello spettro energetico degli EECR insieme alla mappa delle loro direzioni di arrivo per investigare sull'origine, natura e distribuzione dei raggi cosmici EECR
- Aprire il canale dell'Astronomia dei Neutrini di Alta Energia EEv per comprovare i confini dell'Universo ed investigare sulla natura e distribuzione delle sorgenti EEv

Primo esperimento nel suo genere, EUSO pone una sfida tecnologica di estrema rilevanza.

La progettazione e la realizzazione di un apparato sperimentale, affidabile e stabile, per l'osservazione dallo Spazio della luce di fluorescenza e della luce Čerenkov devono comunque sottostare ai severi vincoli imposti da una missione spaziale.

previsione	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
EUSO	A		B	C/D							

Prologo

... tante domande sui raggi cosmici di più alta energia non hanno ancora avuto risposta ...

... riusciremo a svelare il mistero per tempo e festeggiare con tutti gli onori il centenario della scoperta di Victor Hess ?



Riferimenti bibliografici (solo alcuni tra i tanti)

- J. Linsley, "Raggi cosmici di più alta energia", Le Scienze, Settembre 1978
- J. Linsley, "Search for the End of the Cosmic Ray Spectrum", AIP Conf. Proc. 433, 1997
- M. Nagano, "Historical Review on Ultrahigh Energy Cosmic Ray Experiments", 2001
- M.V.S. Rao & B.V. Sreekantan, "Extensive Air Showers", World Scientific, 1998.
- G. Riveccio, "EUREKA – Enciclopedia della scienza e della tecnica", Ed. Rusconi, 1994.
- B. Rossi, "Momenti nella vita di uno scienziato", Ed. Zanichelli,
- A. Russo, "Le reti dei fisici", Ed. Percorsi della Fisica, 2000
- AGASA, <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>
- AUGER Observatory, <http://www.auger.org>
- EUSO, <http://www.euso-mission.org>
- Fly's Eye, <http://hires.physics.utah.edu/reading/flyseye.html>
- HiRes, <http://hires.physics.utah.edu/>
- TA, <http://www.physics.utah.edu/research/TelescopeArray.html>
- Pointers to various Cosmic Rays and Neutrino Experiments worldwide, <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html>
- "The Caltech Institute Archive", <http://archives.caltech.edu/index.html>
- "Nobel e-Museum", <http://www.nobel.se/physics/index.html>