

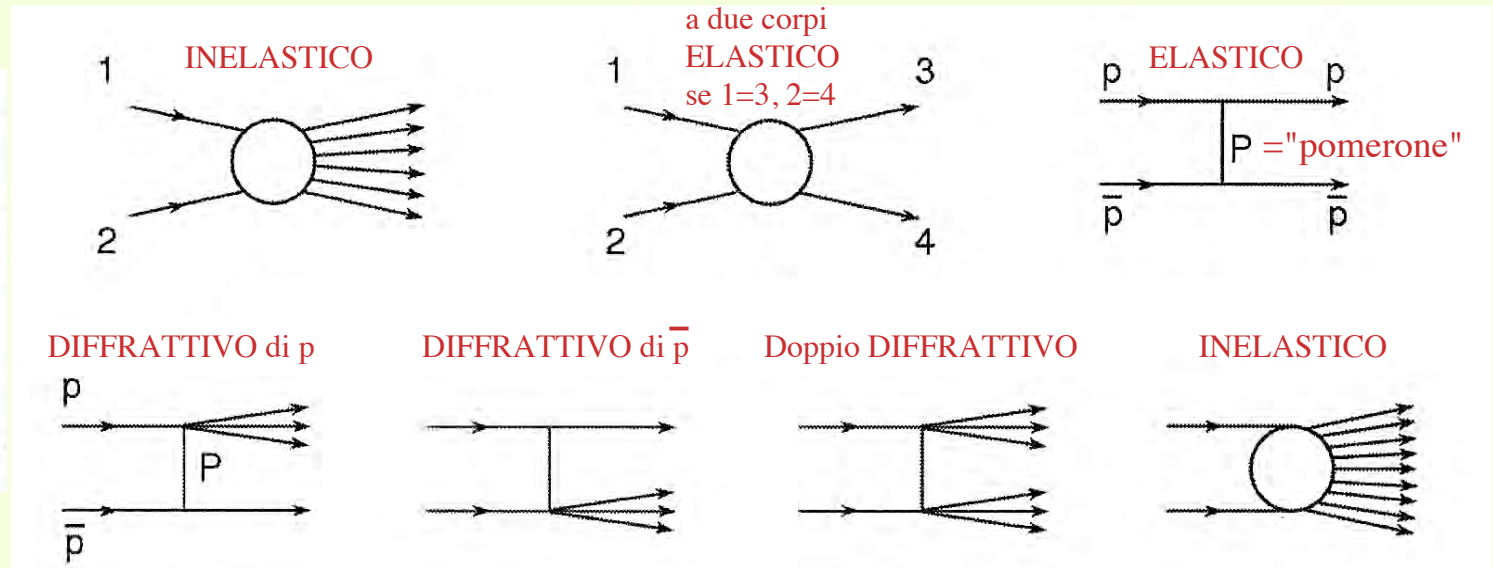
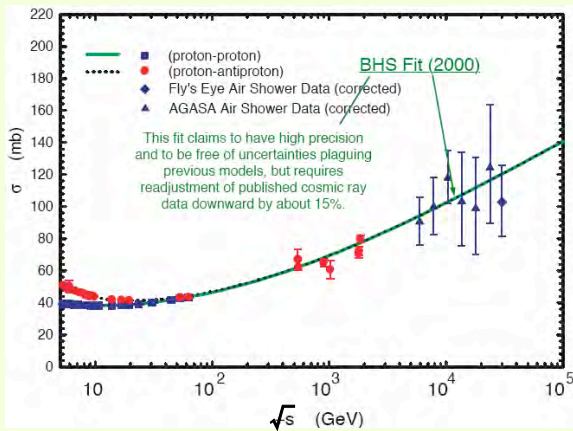
# Fisica Nucleare e Subnucleare II

## Lezioni n. 39 e 40

- Collisioni adrone  $\rightarrow \leftarrow$  adrone ad alta energia ( $\sqrt{s} > 10 \text{ GeV}$ )
  - Sezione d'urto elastica, inelastica e totale
  - Molteplicità media di particelle
  - Momento trasverso delle particelle prodotte
  - Cenni su collisioni fra ioni pesanti
- Raggi cosmici:
  - Spettro e composizione dei raggi cosmici primari
  - Evidenza per una componente di "materia oscura"

# Collisioni adrone-adrone per $E_{CM} > 10 \text{ GeV}$

La sezione d'urto  $pp$  e  $p\bar{p}$  prima decrescono (3-10 GeV) poi aumentano con andamento  $\log(E_{CM})$ .  
Le misure ad energia più alta, ottenute dallo studio dei raggi cosmici, confermano tale andamento (non completamente spiegato).



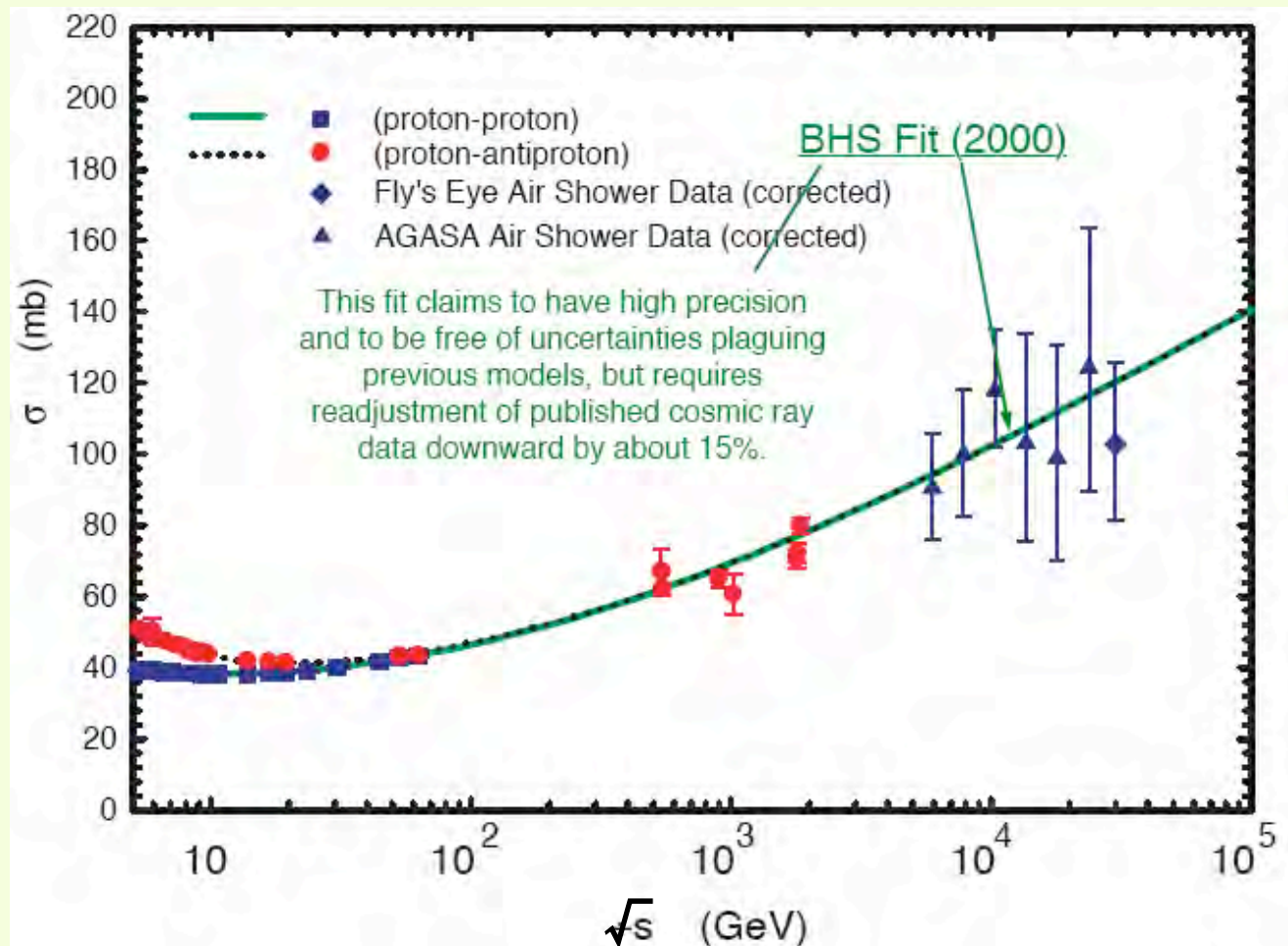
Gli eventi vengono comunemente classificati in base al "momento trasverso ( $p_t$ )":

- **bassi  $p_t$** : sezioni d'urto relativamente grandi che variano lentamente con l'energia, come  $\ln(s/s_0)$ . Lo studio di tali eventi viene definito a volte: "fisica  $\ln(s)$ ". In tali processi l'interazione vede l'adrone coinvolto nella sua interezza.  $\ln(s/s_0)$  dove  $s_0 = 1\text{GeV}^2$ .
- **alti  $p_t$** : sezioni d'urto relativamente piccole che variano rapidamente con l'energia. In tali processi l'interazione avviene fra i costituenti dell'adrone: quarks, gluoni. La QCD pertanto ne spiega la dinamica.

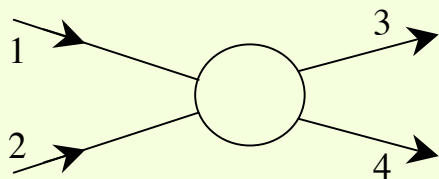
# $\sigma_{\text{tot}}$ pp e p $\bar{p}$

A bassa energia  $\sigma_{\text{tot}}(\text{p}\bar{\text{p}}) > \sigma_{\text{tot}}(\text{pp})$ : ciò accade per tutti i casi:  
 $\sigma_{\text{tot}}(\text{antiparticella-p}) > \sigma_{\text{tot}}(\text{particella-p})$

Confrontando le due sezioni d'urto si vede che al crescere dell'energia diminuisce la differenza fra le due sezioni d'urto: al crescere dell'energia la  $\sigma_{\text{tot}}$  cresce ma rimane finita, le reazioni di annichilazione (che coinvolgono solo le antiparticelle) non crescono nello stesso modo e diventano una frazione trascurabile delle  $\sigma_{\text{tot}}$ .



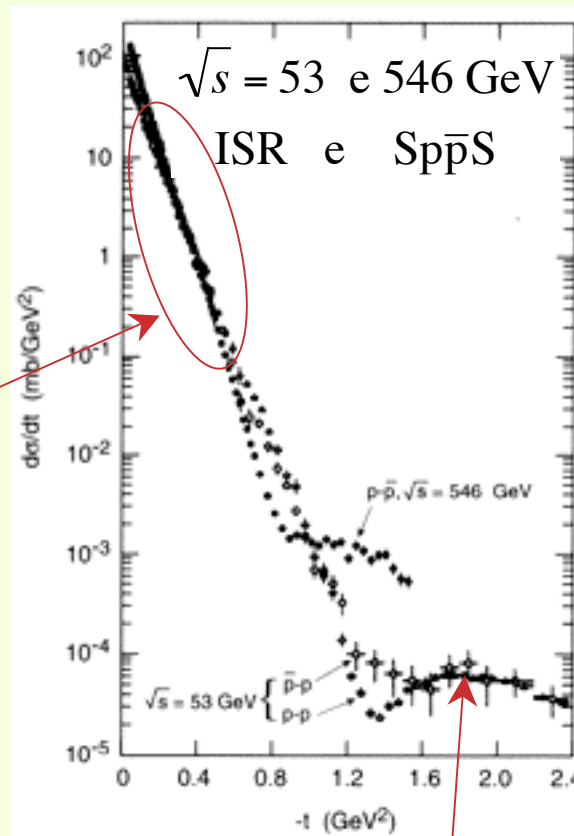
# Sezione d'urto della diffusione elastica pp e p $\bar{p}$



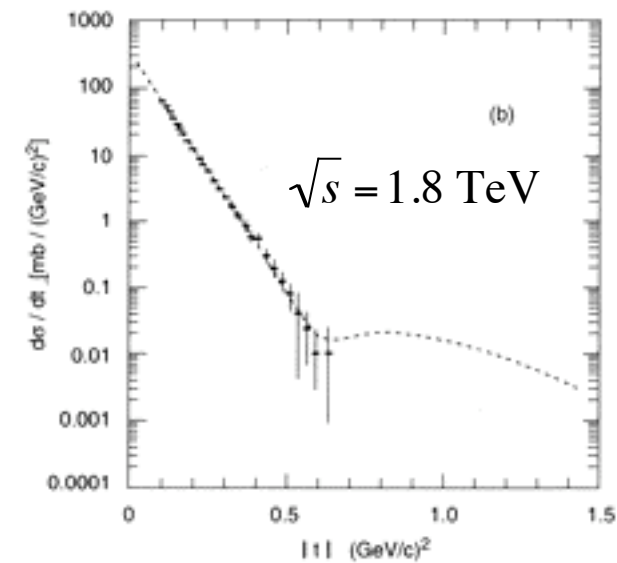
alla diffusione contribuiscono sia l'interazione coulombiana che quella forte ma diversamente per diversi valori di  $|t|$

$$\frac{d\sigma}{dt} = Ae^{Bt}$$

andamento caratterizzato dal parametro  $B$  [ $\text{GeV}^2$ ] che è funzione di  $\sqrt{s}$



$\frac{d\sigma}{dt}$  in funzione di  $t \sim -p^2\theta^2$   
 $t \sim (\text{quadrimpulso trasferito})^2$



$|t| < 0.001$  ( $\text{GeV}/c$ )<sup>2</sup>

$0.001 < |t| < 0.01$  ( $\text{GeV}/c$ )<sup>2</sup>

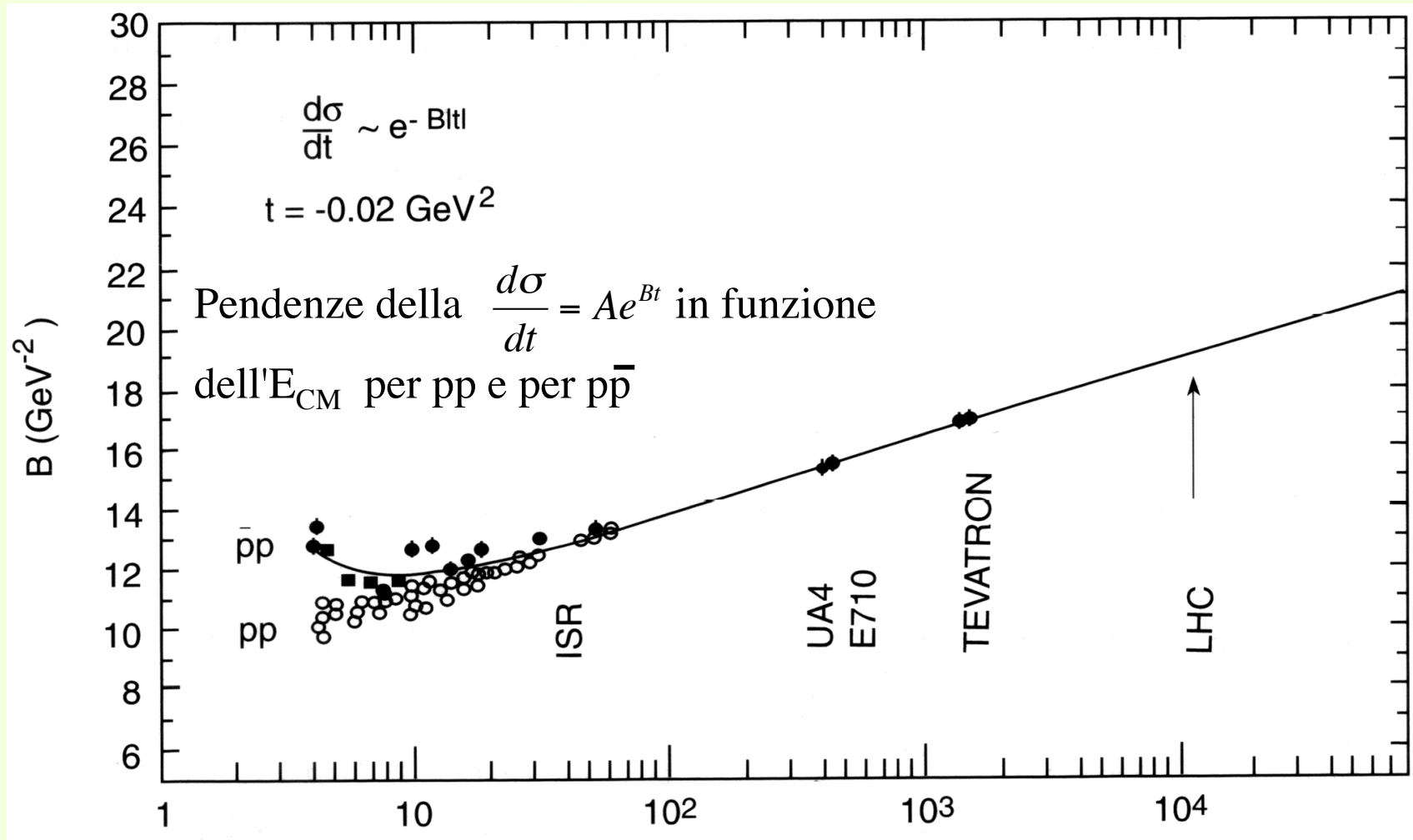
$0.01 < |t| < 0.5$  ( $\text{GeV}/c$ )<sup>2</sup>

$|t| > 0.5$  ( $\text{GeV}/c$ )<sup>2</sup>

interazione coulombiana  
 interazioni coulomb. e forte  
 interazione forte  
 diffusione a grandi angoli

visibile a  $\sqrt{s} = 53$  GeV per pp una sorta di figura di diffrazione

# Il parametro B della Sezione d'urto elastica pp e p $\bar{p}$



All'aumentare dell'energia B aumenta rendendo più "pendente" la " $d\sigma/dt$ " favorendo cioè i valori di t più bassi e quindi rendendo "più stretto" il "picco elastico in avanti". Da questi dati è possibile ricavare le dimensioni del nucleone come di un "disco" le cui dimensioni aumentano con l'energia disponibile nel centro di massa: il raggio del disco è rappresentabile con  $R \sim 0.4 (B)^{0.5}$  fm.

# Collisioni "inelastiche" fra adroni ad alta energia

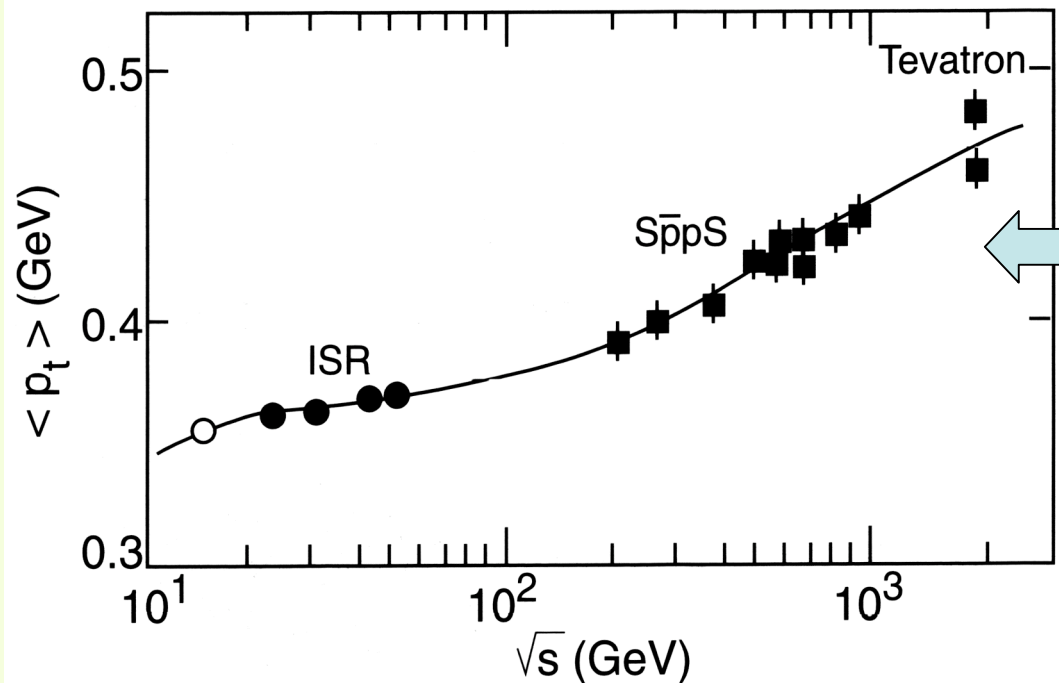
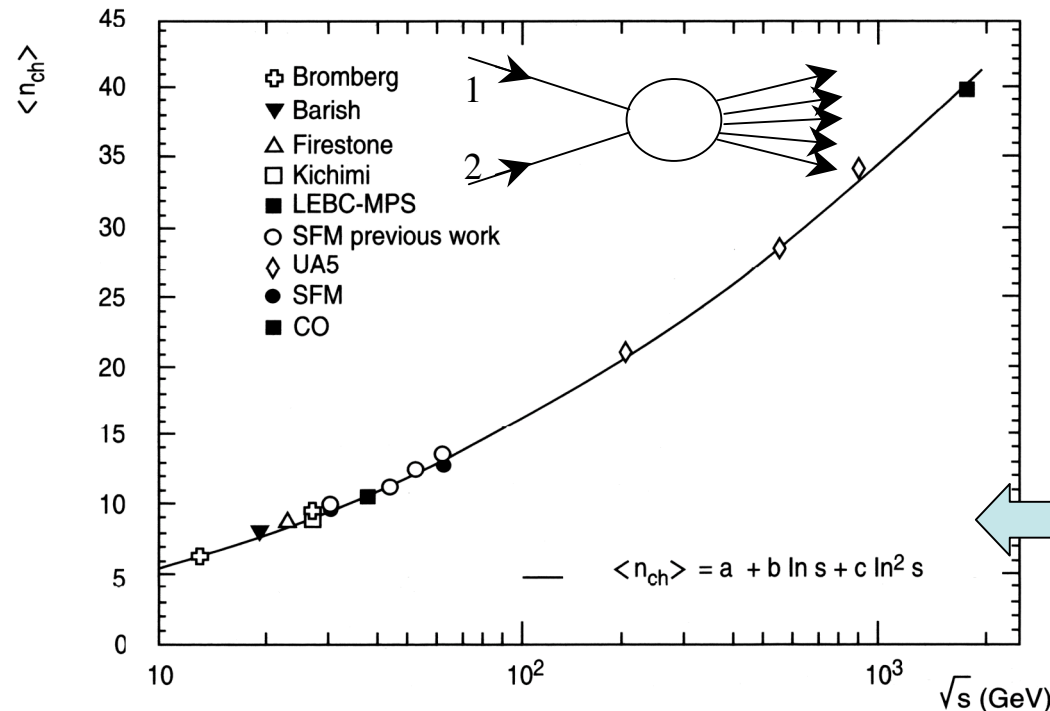
L'interazione inelastica da luogo ad una alta molteplicità di particelle nello stato finale. Sperimentalmente si è trovato:

- la molteplicità media di particelle cariche aumenta con  $\log(E_{CM})$ . Ciò comporta che buona parte dell'energia disponibile nel c.m. invece di incrementare il numero di particelle nello stato finale si ritrova come energia cinetica delle particelle prodotte

- le particelle prodotte hanno un impulso trasverso  $p_T$  il cui valor medio ( $\sim 350 \text{ MeV}/c$ ) è indipendente dal tipo di particelle che interagiscono e quasi indipendente da  $E_{CM}$

$$\langle p_T \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_{T_i}|$$

-  $d\sigma/dp_T \sim \exp(-A p_T)$



# Produzione di particelle cariche in interazioni "inelastiche"

Tipo di particelle	$pp$	$\bar{p}p$	$\bar{p}p$
$\sqrt{s}(\text{GeV})$	53	540	1800
Cariche	12.0	29.0	40
Neutre	6.0	14.5	20
$\pi^+$	4.7	} 23.9	
$\pi^-$	4.3		
$\pi^0$	4.5	12	
$K^\pm$	0.46	} 2.24	
$K^0$	0.33		
$K^0 + \bar{K}^0$	0.79	2.24	
$p$	1.6	} 1.45	
$\bar{p}$	0.15		
$n + \bar{n}$	1.75	1.45	
$\Lambda + \bar{\Lambda} + \Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0$	—	0.53	
$\Sigma^+ + \Sigma^- + \bar{\Sigma}^+ + \bar{\Sigma}^-$	—	0.27	
$\Xi^- + \bar{\Xi}^- + \Xi^0 + \bar{\Xi}^0$	—	0.20	

Confrontando la molteplicità media di particelle cariche in interazioni fra adroni, così come nell'interazione leptone-adrone ed anche  $e^+ e^-$  si vede che in tutti i casi  $\langle n_{\text{ch}} \rangle$  aumenta con  $\log(E_{\text{CM}})$ .

Le particelle più leggere (pioni) sono prodotte in modo più abbondante.

Le particelle neutre prodotte sono la metà delle cariche:  $\pi^0 \sim (\pi^+ + \pi^-)/2$  etc...

## Sezione d'urto totale pp e p $\bar{p}$

Sono stati proposti, e confrontati fra di loro, due metodi per la misura della sezione d'urto totale pp e p $\bar{p}$ :

- stima di  $\sigma_{\text{tot}}$  dalla conoscenza di  $d\sigma_{\text{elastica}}/dt$  per  $t=0$
- misura di tutte le interazioni elastiche ed inelastiche e della luminosità ( $L$ ) del collider  $\sigma_{\text{totale}} = (N_{\text{elastico}} + N_{\text{inelastico}}) / L$

**I due metodi portano a risultati compatibili entro il 5%.**

**Anche la sezione d'urto totale aumenta con  $\sqrt{s}$  (misure effettuate all'ISR (~50 GeV), SpS (~500 GeV) e Tevatron (~2 TeV).**

**La crescita di  $\sigma_{\text{totale}}$  può essere giustificata nell'ambito della QCD con il contributo crescente dei gluoni alla interazione.**



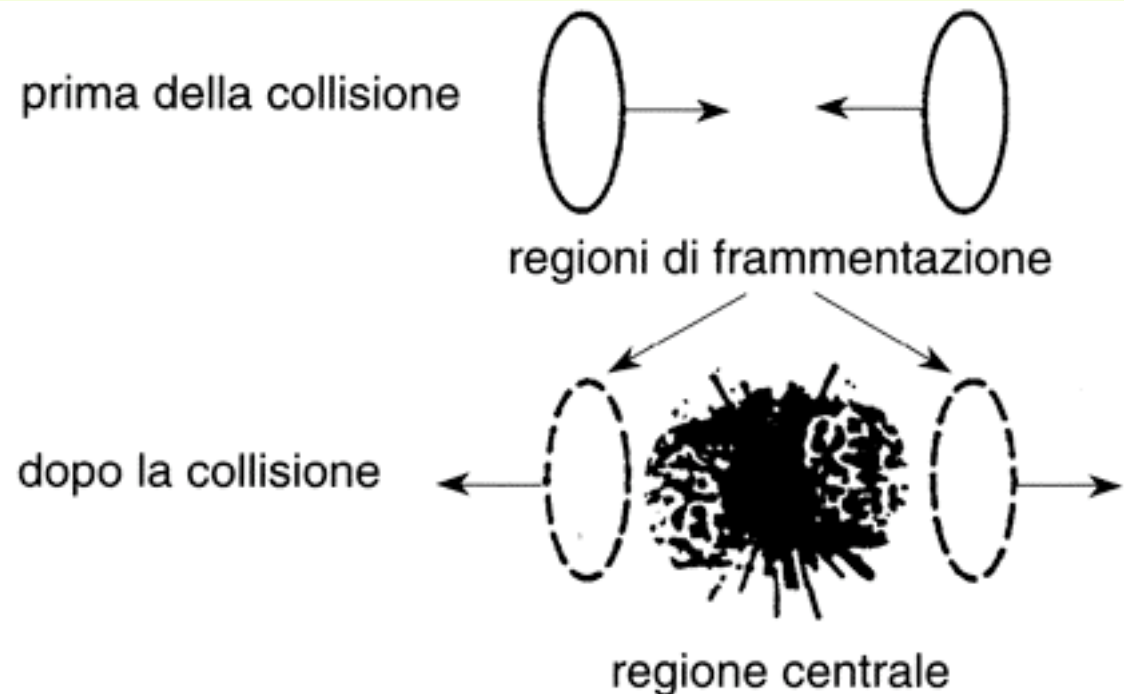
## Collisioni fra ioni pesanti

L'accelerazione di ioni pesanti ( $^8\text{O}$ ,  $^{16}\text{S}$ ,  $^{82}\text{Pb}$ , ...) è stata realizzata ottenendo fasci estratti con energie di 15 GeV/nucleone ( $^8\text{O}$ ,  $^{16}\text{S}$ ,  $^{82}\text{Pb}$  a Brookhaven), 56-130 GeV/nucleone (ioni d'Oro a Brookhaven) e fino a 200 GeV/nucleone ( $^{82}\text{Pb}$  all'SpS). Ad LHC si prevede di far interagire ioni pesanti con energie  $\sim 5.5$  TeV/nucleone (esperimento ALICE).

In tali condizioni si prevede che alcuni nucleoni interagiscono, anche ripetutamente attraversando il nucleo bersaglio, altri rimangono "spettatori". In ciascuna interazione possono essere prodotti adroni che poi possono interagire  $\rightarrow$  cascata intranucleare.

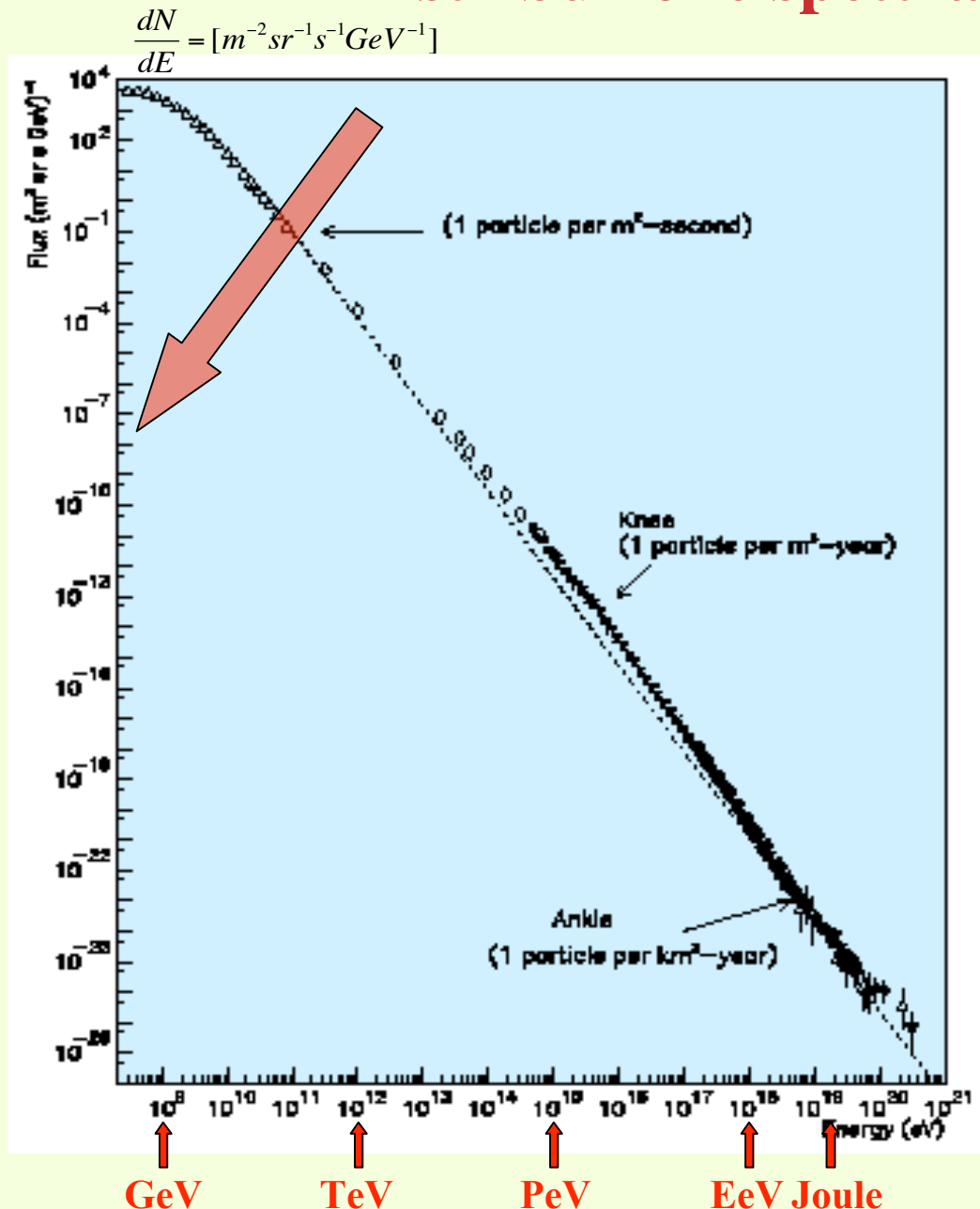
Si vuole studiare, fra l'altro, lo stato di "plasma di quarks e gluoni" (quark-gluon plasma) previsto per valori elevati di

energia e densità. Quarks e gluoni potrebbero, in tali condizioni estreme, esistere come "liberi", non più confinati.



Sketch di una collisione fra due adroni di alta energia. I due adroni incidenti, viaggianti quasi alla velocità della luce, sono contratti da effetti relativistici. Durante la collisione i due adroni si attraversano, dando luogo a due "fireball" che si allontanano (regioni di frammentazione) e ad una caldissima regione centrale.

# Distribuzione spettrale dei Raggi Cosmici



~ 1000 particelle/( $s \cdot m^2$ )

nuclei ionizzati:

90% protoni

9% particelle  $\alpha$

nuclei più pesanti

quale è l'origine dei raggi cosmici ?

- originati nel sistema solare ? una piccola quantità associata a fenomeni violenti nel Sole e caratterizzata da grande variabilità temporale
- originati nella galassia: la maggior parte. Si nota anche una anticorrelazione con intense attività solari
- origine extragalattica: la parte più energetica dello spettro

Misure dirette della rad. cosmica primaria

nello spazio (satelliti)

nell'alta atmosfera (palloni)

Misure indirette

sciami estesi

Cherenkov in aria

rivelatori a Terra

laboratori sotterranei

# Composizione dei raggi cosmici primari

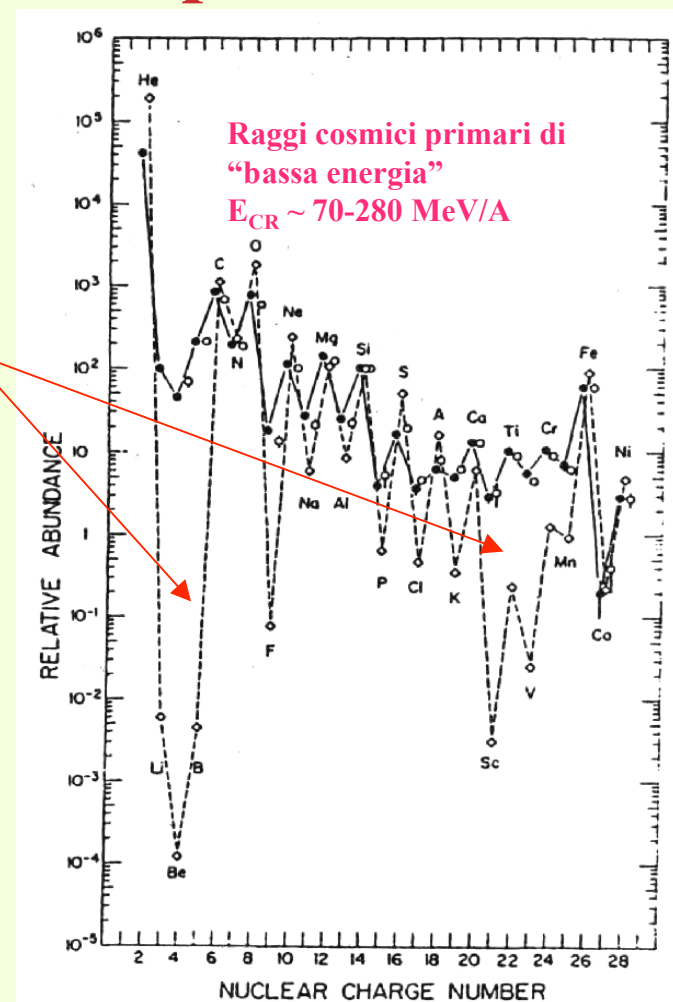
Nei raggi cosmici elementi pesanti ( $Z>1$ ) sono in percentuale relativa maggiore, rispetto ai protoni, di quanto lo siano nel sistema solare:

- nei raggi cosmici (rispetto alla materia presente nei corpi del sistema solare) la percentuale di protoni e' ridotta dalla maggiore difficoltà di ionizzazione (dell'H rispetto a nuclei più pesanti)

- gli elementi: **Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr, Mn**

sono molto più abbondanti rispetto alla materia del sistema solare. Tali elementi sarebbero praticamente assenti nella fase finale del processo di nucleosintesi stellare. Nei raggi cosmici sono presenti in quanto risultati delle reazioni nucleari dell'ossigeno (Li, Be, B) e del ferro contenuti nei raggi cosmici (Sc, V, Cr, Mn) e la materia interstellare (ISM). Ciò comporta un'ipotesi sul tempo di permanenza dei raggi cosmici nella galassia:

- per spiegare la presenza di tali nuclei nei raggi cosmici dobbiamo assumere che attraversino una quantità di materia pari a  $X = 5-10 \text{g/cm}^2$
- la densità di protoni nel disco della galassia e' pari a  $\rho_p \sim 1 \text{ protone/cm}^3 = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ g/cm}^3$
- lo spessore del materiale attraversato corrisponde quindi a  $X / (m_p \cdot \rho_p) = 3 \cdot 10^{24} \text{ cm} \sim 1000 \text{ kpc}$   $1 \text{ pc} = 1 \text{ AU} / 1(\text{secondo di grado}) = 1.5 \cdot 10^{13} / 4.85 \cdot 10^{-6} \text{ pc} = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ cm} = 3.26 \text{ Ly}$
- i raggi cosmici rimangono "intrappolati" nella galassia per  $\geq 10$  milioni di anni



Abbondanza degli elementi che compongono i raggi cosmici dall'He al Ni, espressa relativa al Si, confrontata all'abbondanza relativa per i pianeti del sistema solare.

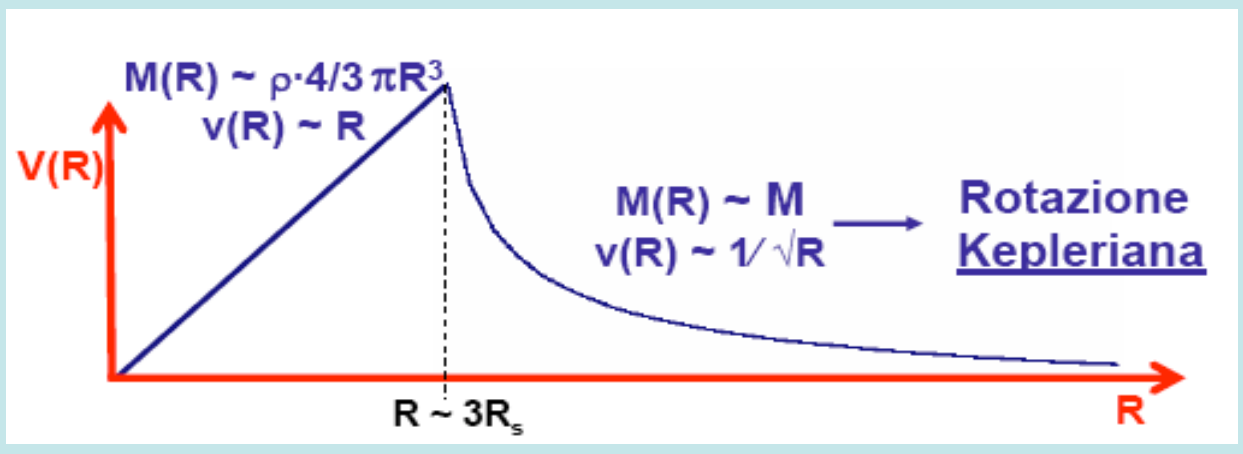
# Evidenza di Materia Oscura: materia oscura nelle Galassie (1)

Dalle leggi fondamentali della meccanica sappiamo che una stella in rotazione in una Galassia deve soddisfare la relazione

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{G \cdot M(R)}{R^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M(R)}{R}}$$

acc. centripeta
acc. gravitazionale

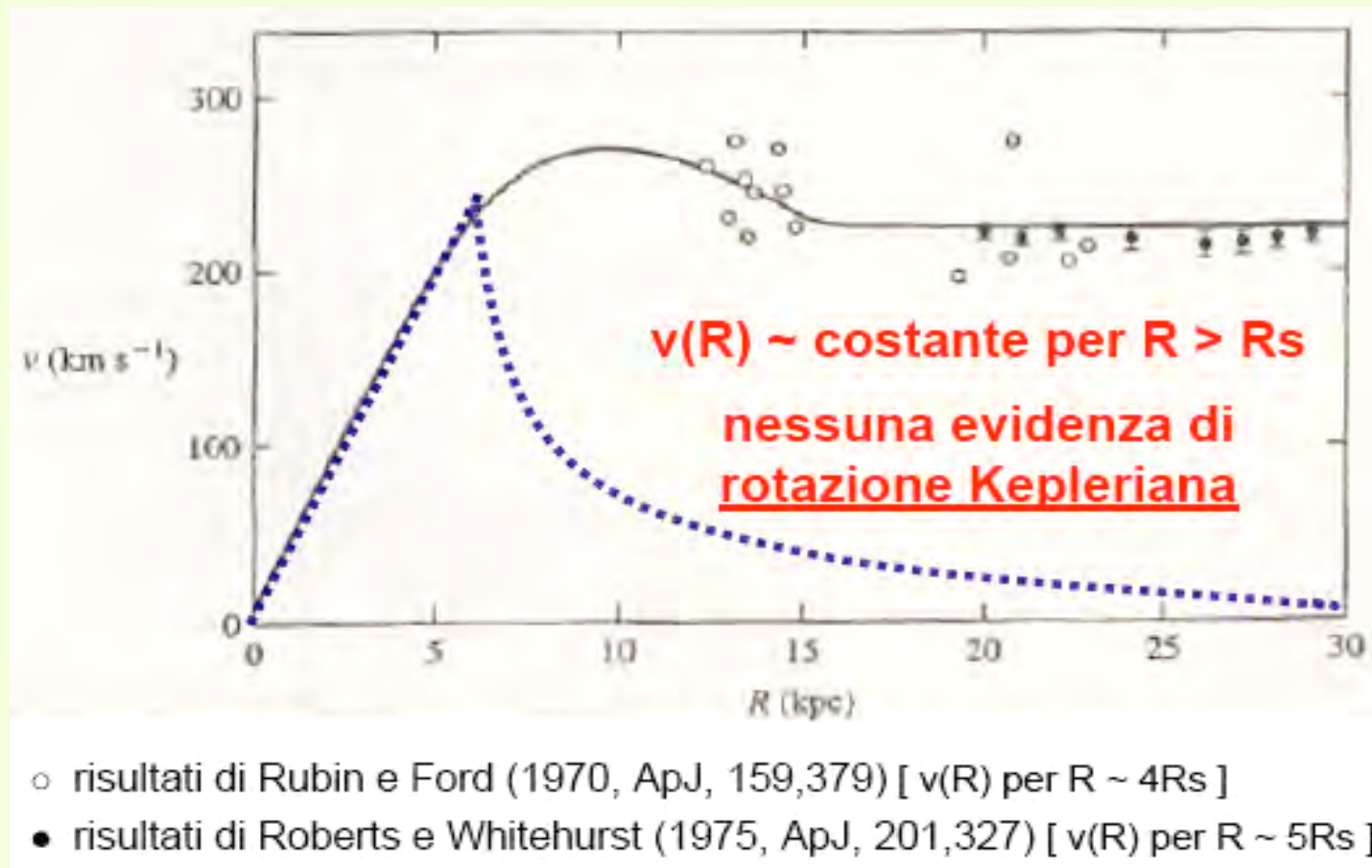
Si misurano le velocità orbitali delle stelle in galassie a spirale (Via Lattea, M31) e si confrontano le misure con l'andamento "Kepleriano" della velocità in funzione dal centro della Galassia in questione.



Per stimare la distanza dal centro della Galassia alla quale  $M(R) \sim M$ , si considera l'andamento dell'intensità luminosa: dove  $I_0$  = intensità luminosa al centro della Galassia ed  $R_s$  = raggio caratteristico per la via Lattea:  $R_s = 4$  Kpc ; M31:  $R_s = 6$  Kpc

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{R_s}}$$

## Evidenza di Materia Oscura: materia oscura nelle Galassie (2)



Le osservazioni evidenziano la presenza di un **alone di materia oscura** (“dark halo”). La materia oscura contenuta nell’alone contribuisce a determinare la “forza centripeta” e costituisce un “legame gravitazionale” che permette alle stelle della galassia, anche le più lontane, di conservare una velocità di rotazione di circa **250 km/s**

## Evidenza di Materia Oscura: Dark Halo

I risultati sperimentali ricavati per la Galassia M31 valgono in generale per le Galassie a spirale

$$v(R) \sim \text{costante per } R > R_s$$

$$M(R) = \frac{v^2 \cdot R}{G}$$

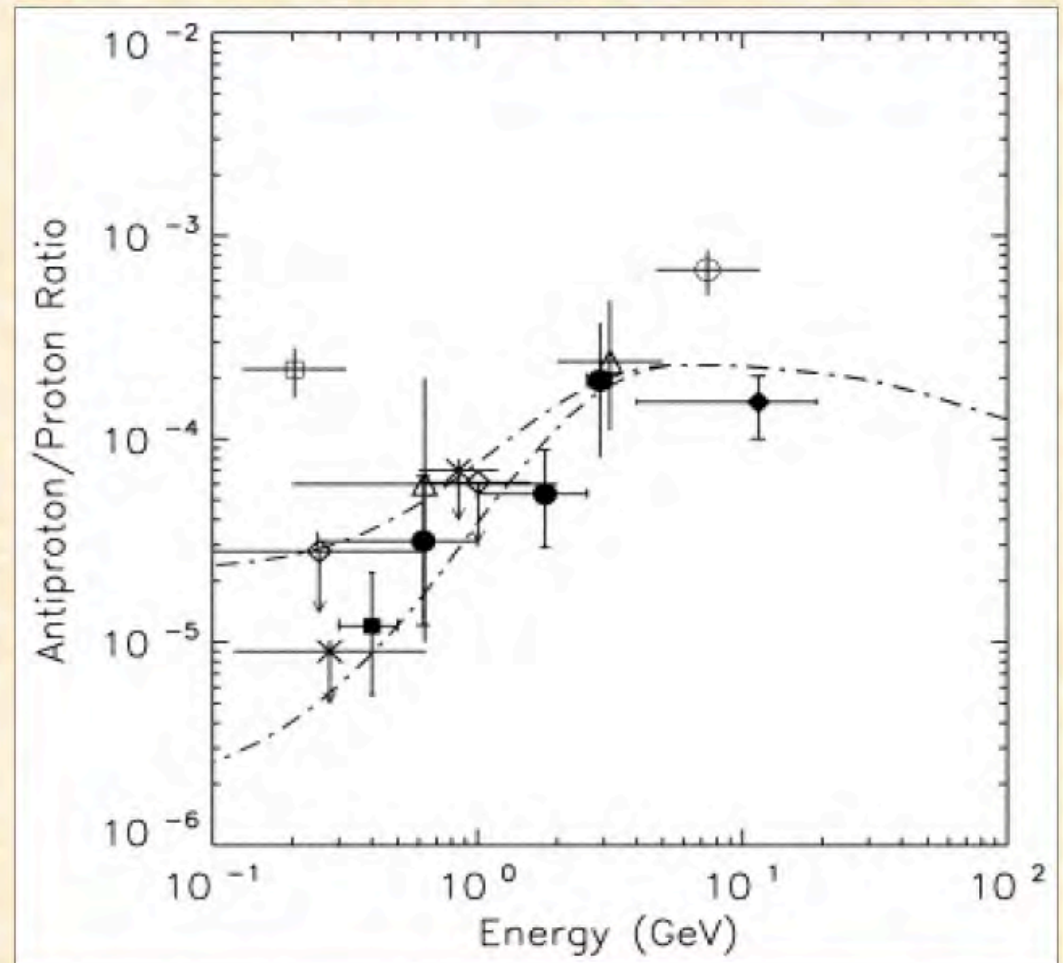
Le dimensioni dell'alone non è nota con precisione e può essere solo approssimativamente stimata. Per la Via Lattea si stima  $R_{\text{halo}} \sim 75\text{-}300 \text{ Kpc}$

Questioni aperte:

- quali particelle costituiscono questo alone ? Non hanno interazione e.m. o forte, hanno solo interazione gravitazionale (o anche interazione debole: neutrini ?). Sono un nuovo tipo di particelle ? (particelle super-simmetriche ?)
- attualmente sappiamo che **quarks e leptoni**, prodotti dopo il Big-Bang, la cui quantità è in accordo con il modello della Nucleosintesi, **rappresentano solo il 5% della densità di energia dell'Universo.**
- Si stima che la **materia oscura** può rappresentare **il 25% della densità di energia dell'Universo**
- **il restante 70% della densità di energia dell'Universo** esisterebbe sotto forma di “**dark energy**”
- non si conosce attualmente la natura di **dark matter** e/o **dark energy**, tanti programmi sperimentali, agli acceleratori e non, cercano di acquisire informazioni sulla loro natura.

## Possibili evidenze di antimateria nei raggi cosmici primari ?

- Antiprotons in the cosmic radiation are expected as "**secondary**" products of interactions of the primary cosmic radiation, principally protons, with the ambient interstellar medium (ISM).
- The first positive measurements [Golden 79, Bogomolov 90, Buffington 82] reported **higher** antiproton fluxes than predicted by contemporary models of cosmic ray transport.
- *Many different theories to justify these data were proposed at that time*



Golden et al. (1984; **open circle**), Bogomolov et al. (1987, 1990; **open triangle**), Buffington et al. (1981; **open square**)