

# Cosmic rays Lecture 1 031016

# Programma di massima del corso

- ☐ Cenni di struttura e composizione della galassia
- ☐ Raggi cosmici:
  - ☐ composizione,
  - ☐ spettri,
  - ☐ Equazioni di propagazione dei RC nella galassia
  - ☐ Propagazione dei raggi cosmici nucleari
  - ☐ Propagazione di  $e^+$ ,  $e^-$ , anti- $p$ , fotoni
- ☐ Idrodinamica e magnetoidrodinamica
- ☐ Modelli di accelerazione I (accelerazione di fermi, induttore unipolare, hillas plot)
- ☐ Modelli di accelerazione II (modelli non lineari di accelerazione) N. Tomassetti
- ☐ Tecniche sperimentali di misura dei raggi cosmici di alta energia, dirette e indirette V. Vagelli

# Bibliografia

- M. Vietri, Astrofisica delle alte energie, Bollati ed.
- Longair, High Energy Astrophysics Vol I & II
- Rybicky&Lightman, Radiative Processes in Astrophysics, Wiley-ch
- M. Spurio, Particles and Astrophysics
- Dispense varie

L' Universo e' "IL LABORATORIO" in cui si possono osservare tutte le leggi della natura all'opera, spesso in condizioni limite che non possono essere riprodotte all'interno dei laboratori terrestri

- Applicazione delle leggi note per descrivere fenomeni in condizioni estreme
- Scoperta di nuove leggi della fisica sulla base delle osservazioni sperimentali

Cosmic ray physics is strictly connected to astrophysics  
Cosmic rays are generated and propagate in the galaxy  
Sources are astrophysical objects (SNR, AGN, Pulsars,...)

Main difference between astrophysics and other branches of physics: **controlled experiments are (almost) never possible.**

This means:

- If many different physical effects are operating at the same time in a complex system, can't isolate them one by one.
- Knowledge of rare events is limited - nearest examples will be distant. e.g. no supernova has exploded within the Milky Way since telescopes were invented.
- Need to make best use of all the information available - many advances have come from opening up new regions of the electromagnetic spectrum.
- Statistical arguments play a greater role than in many areas of lab physics.

Sebbene siano stati progressi enormi negli ultimi 50 anni, la nostra conoscenza dell'ambiente astrofisico **E'** limitata.

In astrofisica  $1 \approx 10$

Non conosciamo (ancora) bene la distribuzione di materia, campi di radiazione, particelle nella nostra galassia...ancora di meno quelle di altre galassie e dello spazio intergalattico

→ qualitativamente possiamo spiegare le osservazioni, quantitativamente le incertezze dovute alla mancanza di dati precisi sono in alcuni casi dell'ordine del 100%

→ In continua evoluzione man mano che nuove osservazioni sono disponibili

# Nuove leggi della fisica derivate dall'osservazione astrofisica

## **OSSERVAZIONI**

- Tycho Brahe misura il moto dei pianeti
- Leggi di Keplero
- Osservazione dello spettro delle stelle (nane bianche)
- Formula di Balmer
- Perdita di energia per radiazione gravitazionale in sistemi binari
- Onde gravitazionali

## **LEGGI**

- Keplero scopre le leggi del moto dei pianeti
- Newton: gravitazione universale
- Scoperta della serie di Balmer per l'atomo di idrogeno
- Teoria di Bohr dell'atomo
- Relatività generale di Einstein
- Astronomia gravitazionale

# "Nuova" fisica fondamentale da osservazioni astrofisiche



Spiral Galaxy NGC 1232 - VLT UT 1 + FORS1

ESO PR Photo 37d/98 (23 September 1998)

©European Southern Observatory



Observations of the rotation curves of spiral galaxies suggest presence of **dark matter** - probably in the form of an unknown elementary particle.

Observations of the brightness of distant supernovae suggest presence of **dark energy** - not understood at all.

Credit: P. Armitage, [pja@jilau1.colorado.edu](mailto:pja@jilau1.colorado.edu)

Astronomical observations hint at presence of new physics, which may be testable in the lab in the future.



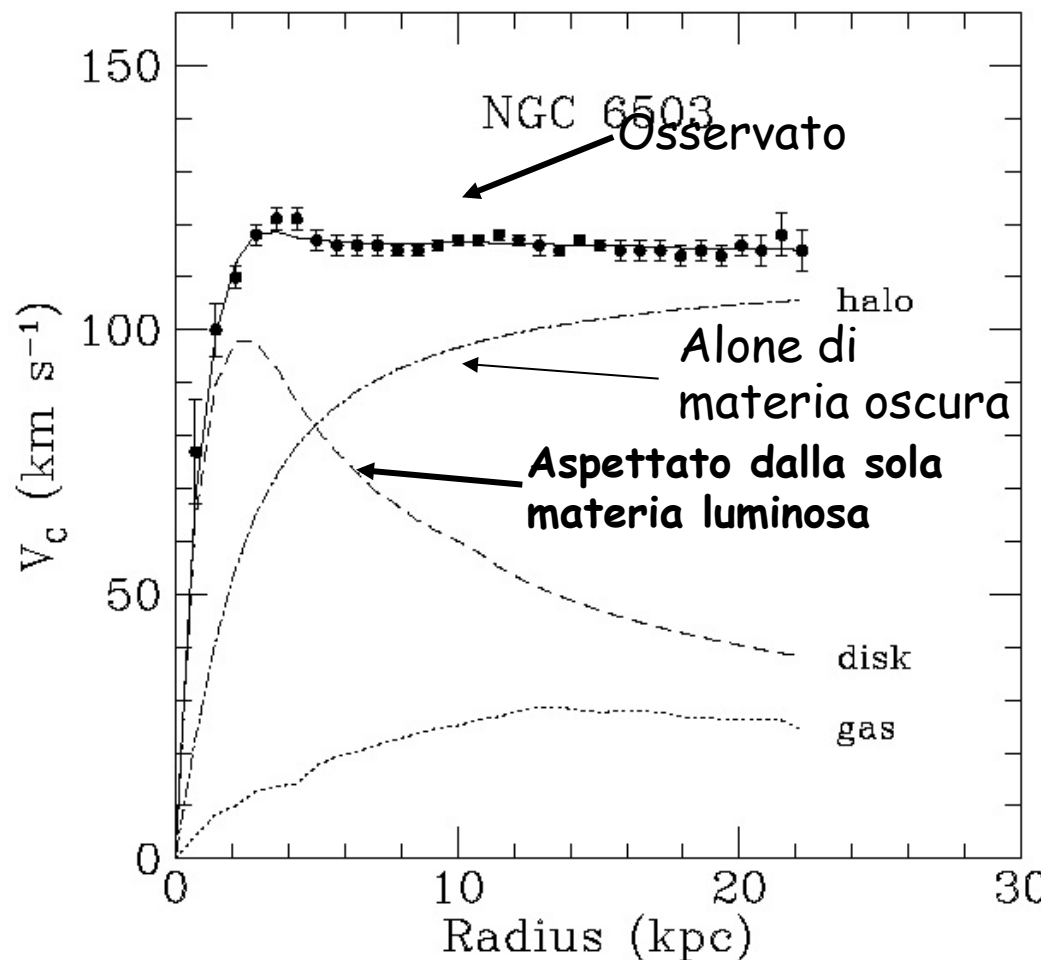
# Materia oscura

La **velocità** di rotazione delle stelle a distanza  $R$  dal centro galattico **dipende dalla massa nel volume di raggio  $R$ :**

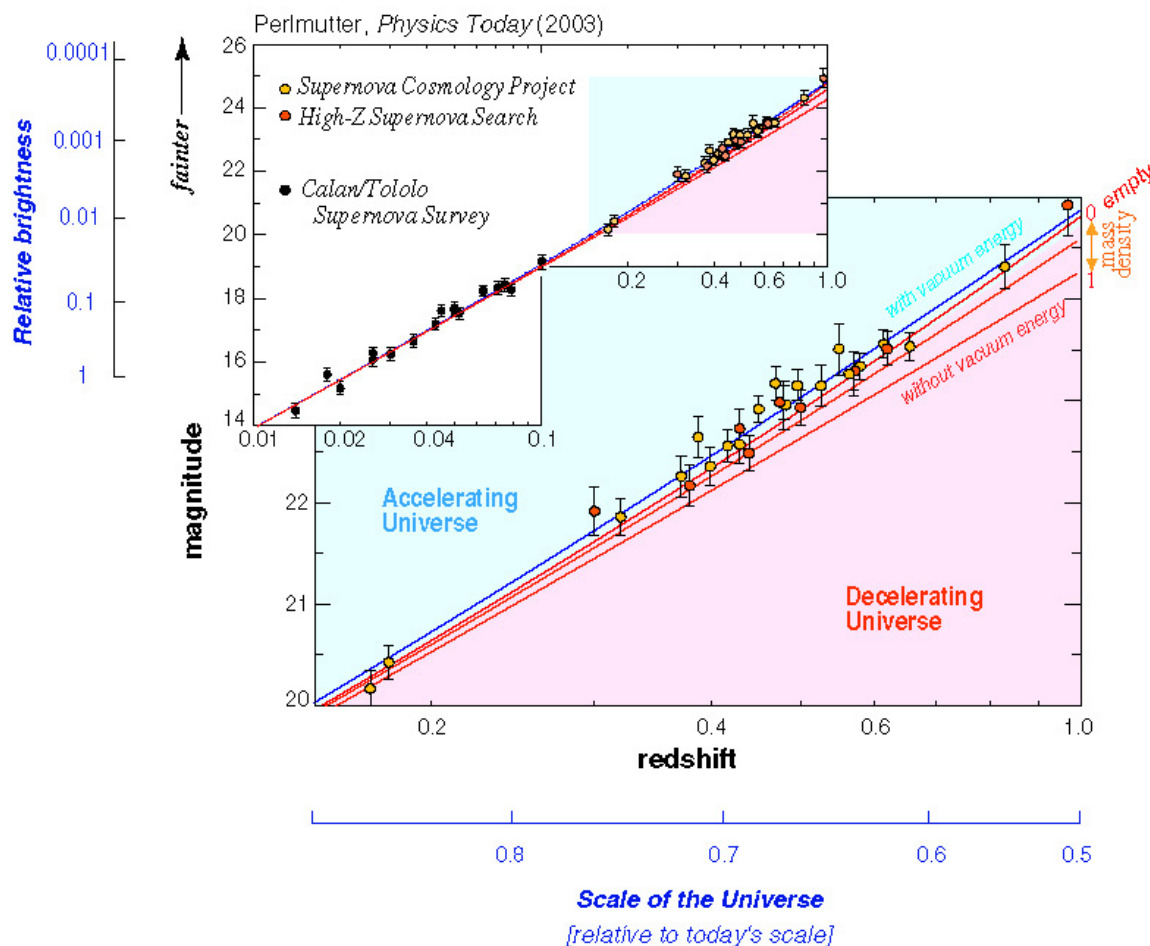
$$V_r = [GM(R)/R]^{1/2}$$

(cfr. Teorema del viriale: per un gruppo di particelle in equilibrio dinamico l'energia cinetica totale delle particelle nel cluster e' 1/2 dell'energia potenziale gravitazionale  $\rightarrow T=V/2$ )

La velocità delle stelle della galassia si misura attraverso lo spostamento Doppler degli spettri di emissione delle righe atomiche



# Energia oscura

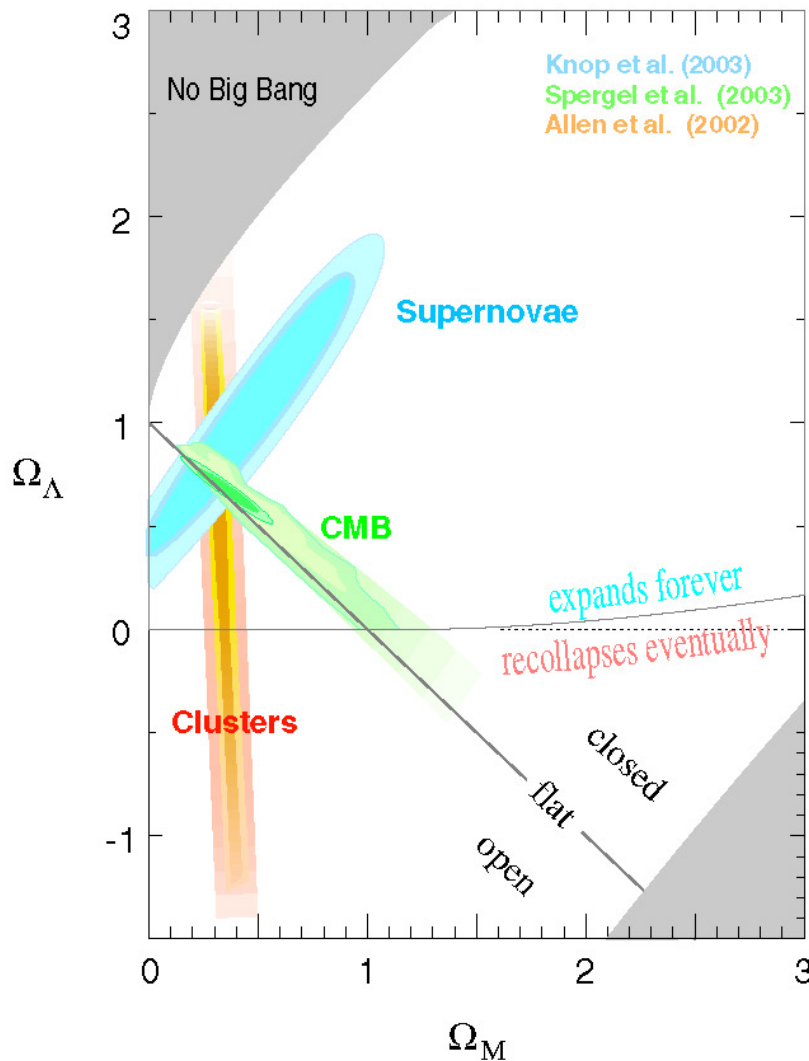


La legge di Hubble ci dice che la velocità di recessione delle galassie è proporzionale alla distanza dall'osservatore

$$V = H_0 \times D$$

Con  $H_0 \sim 71 \text{ km/sec/Mpc}$

Recenti osservazioni della luminosità delle supernovae la hanno mostrato deviazioni da questa legge → l'universo ha accelerato la sua espansione negli ultimi 5 mld di anni → esiste una gravità repulsiva legata all'energia quantistica del vuoto, descritta alla costante cosmologica dell'equazione di Einstein



Combinando insieme tutte le osservazioni di anisotropia del CMB, della luminosita' delle SN Ia, di rotazione delle galassie e dei clusters di galassie, oggi sappiamo dare una misura dei contributi all'energia dell'universo di tutte le componenti

Figura 1.5: Regioni di confidenza nel piano  $(\Omega_m^0, \Omega_\Lambda)$  imposte dai vincoli sull'anisotropia della radiazione di fondo, la dinamica delle strutture su larga scala, e l'analisi delle supernove di tipo Ia [118].

# COSMOLOGIA DI PRECISIONE ⇔ FISICA FONDAMENTALE

1- Eta' dell' universo  $13.7 \pm 0.1$  (1%) $\times 10^9$  anni

2- 4.9% Materia visibile

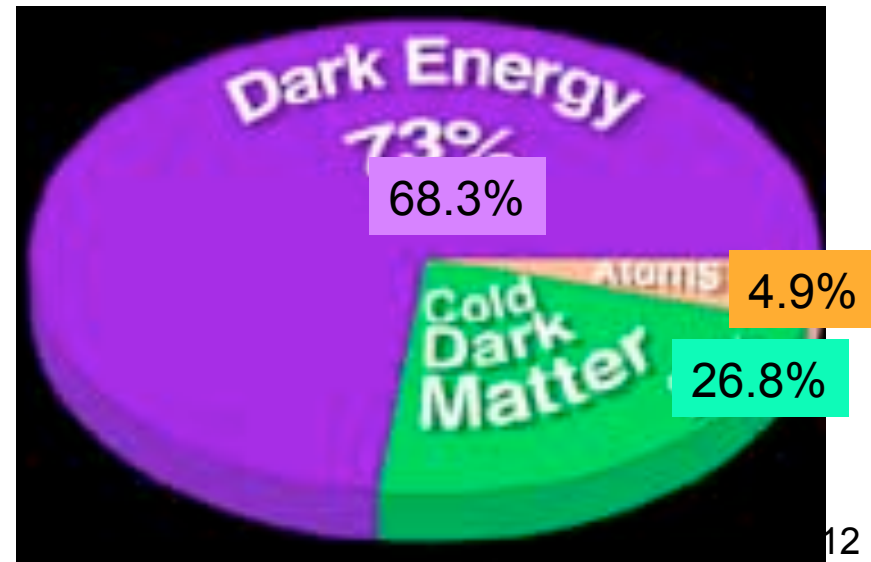
26.8% Materia oscura → sconosciuta

68.3% Energia oscura → sconosciuta<sup>2</sup>

3- Universo e' piatto e si  
espanderà per sempre

4- Costante di Hubble  
 $67.3(12)\text{km/sec/Mpc}$

La materia ordinaria e' solo una  
piccola frazione della massa-  
energia totale dell'Universo!!



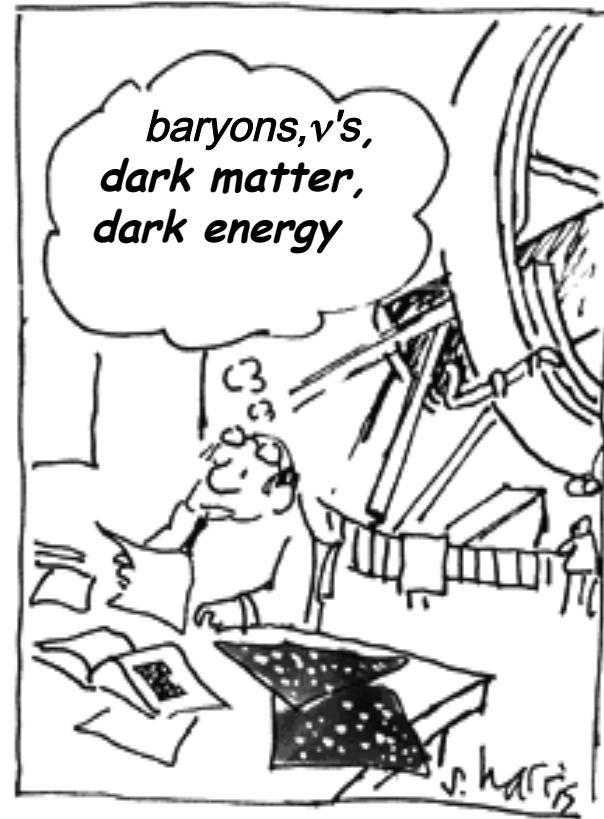
# Abbiamo oggi una visione complessiva dell'Universo

Abbiamo misurato –con precisione!- il contenuto energetico dell'universo,  $\Omega$ : solo una piccola parte e' composta da materia barionica –quella di cui siamo fatti noi e che sara' oggetto del corso.

Per il resto la *darkness* e' completa

Queste misure sono l'evidenza sperimentale piu' diretta che abbiamo per la necessita' di "nuova" fisica, oltre quella che conosciamo ora

## COSMOLOGY MARCHES ON



- we now have a complete census of the Universe...but we don't know what is made of

# Messaggeri del cosmo

- Cosa trasporta l'informazione Terra?

➔ i Raggi Cosmici: particelle cariche e neutre che raggiungono la sommità dell'atmosfera terrestre dallo spazio

## **Ovvero:**

- Flussi di particelle energetiche neutre (fotoni,  $\nu$ ) e cariche elettricamente (raggi cosmici carichi...p, e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup>, anti-p, nuclei)

# Osservabili

- ❑ Particle Type: ch. CR,  $\gamma$ ,  $\nu$  → Composition
- ❑ Energy distribution → Flux and Spectrum
- ❑ Arrival Direction → Anisotropy
- ❑ Variability → Light curve



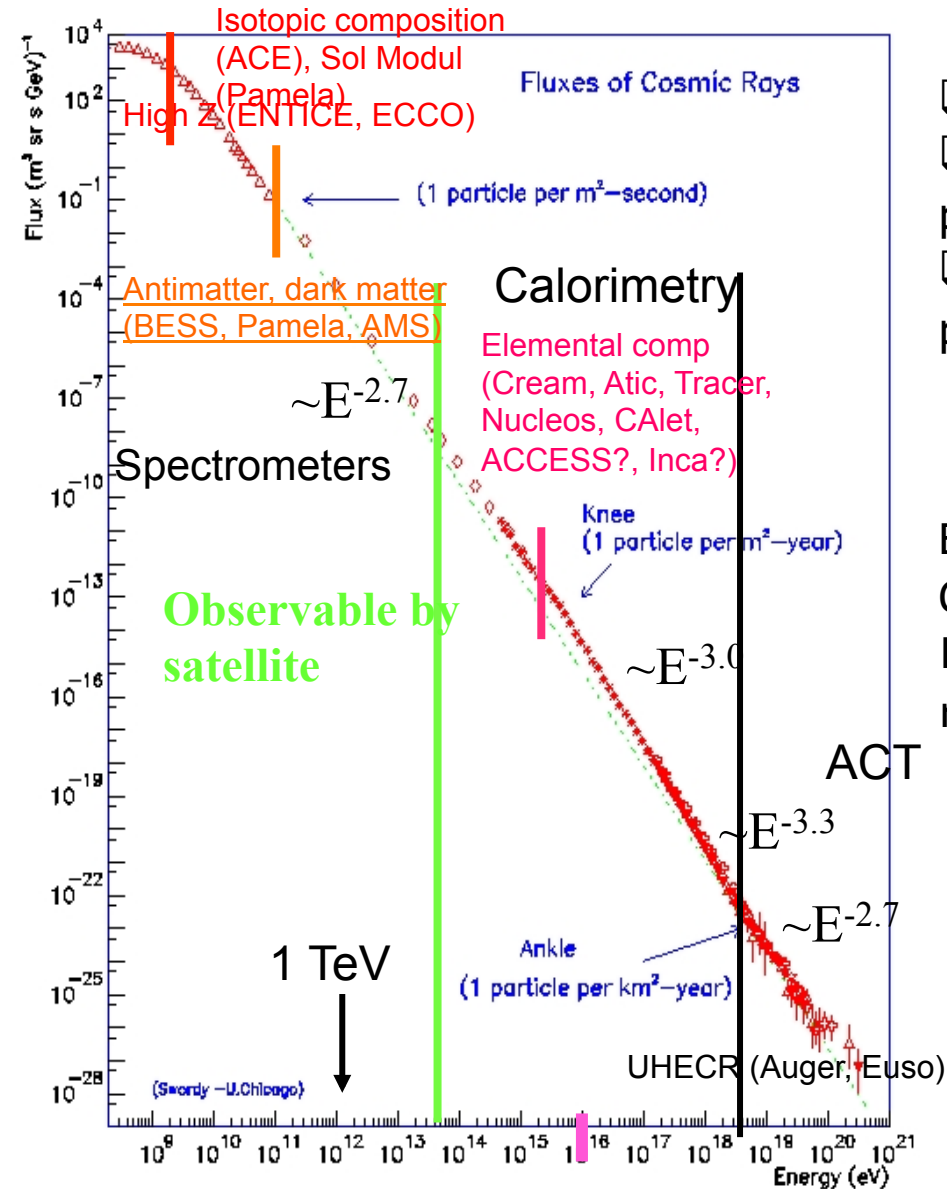
# Osservabili

- Osservare i raggi cosmici significa identificare e contare particelle elementari con le tecniche proprie della fisica delle particelle.
- Esperimenti nello spazio, su pallone e a terra, a seconda dell'intervallo di energia con una grandissima varietà di tecniche di misura (spettrometri, calorimetri, sciame estesi in atmosfera)

# Cosa impariamo dai raggi cosmici

- Quali elementi ci sono nell'Universo
- Da dove vengono
- Come sono prodotti
- Come si propagano fino alla Terra

# Nature's beam calibration



- ☐ Nature gives a very energetic beam
- ☐ She doesn't give us the beam parameters...
- ☐ Get the whole picture  $\rightarrow$  measure precisely the entire CR flux

Beam calibration:

Beam energy  $\leftrightarrow$  CR spectrum at Earth  
 Composition  $\leftrightarrow$  CR chemical elements  
 Luminosity  $\leftrightarrow$  CR abundances & reaction rates

Beam Calibration = CR Propagation  
 Models needed for accurate  
 background evaluation of faint  
 signal searches in CR

Man made accelerators

# Beam Calibration = CR Propagation Models

- The goal of the propagation models is to achieve a reliable physical description of the CR production and propagation through the Galaxy
- From the measured fluxes in the heliosphere derive source composition, injection spectra & galactic parameters
- Reliable propagation model is needed for accurate background evaluation for faint signal searches in CR
- Particularly useful measurements to validate propagation models and to constraint their free parameters are flux measurements in a wide energy range of
  - Primary (ratios, eg C/O, fix source abundances)
  - Secondary (secondary to primary ratios, eg B/C, fix the grammage crossed, constraint diff coeff and halo thickness)
  - Radioactive (provide, eg  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ , escape time information)

# Abbondanze degli elementi nella Galassia

- Le abbondanze “primordiali” degli elementi sono fissate dalla **nucleosintesi primordiale**:
  - 24% (in massa) di  $4\text{He}$
  - 76% (in massa) di  $\text{H}$
- La **nucleosintesi** nelle stelle provvede alla sintesi degli elementi più pesanti
- Le esplosioni stellari (per  $M \gg M_s$ ) hanno una vita media  $\ll$  all'età dell'Universo e provvedono a rifornire il mezzo interstellare
- Le percentuali dei vari elementi nella Galassia possono essere dedotte in varie maniere

# Chemical composition

Cosmic rays contain all the elements of the periodic table

Cosmic rays contain all the elements of the periodic table																The chemical properties of the																							
1																																	118						
H																																	He						
3	4																	5	6	7	8	9	10																
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne																
11	12																	13	14	15	16	17	18																
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar																
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112										
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	--	--	--										
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		118																						
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	--	--	--		--		--		--																						
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																										
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																										
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																										
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																										

White - Big Bang

Yellow - Small Stars

Blue - Supernovae

Pink - Cosmic Rays

Green - Large Stars

The *cosmochemistry* or *chemical cosmology* is the study of the chemical composition of matter in the Universe and the processes that led to the observed compositions. Meteorites and photospheric measurements of solar light are one of the most important tools for studying the chemical nature of the Solar System.

22

# Abundances in Solar System

They are representative of the abundances in the ISM

the chemical composition of the solar system is representative of the part of the Galaxy (the disk) with equal evolution history and the term *cosmic abundances* is sometimes used as a synonym for solar system abundances

o/ph:

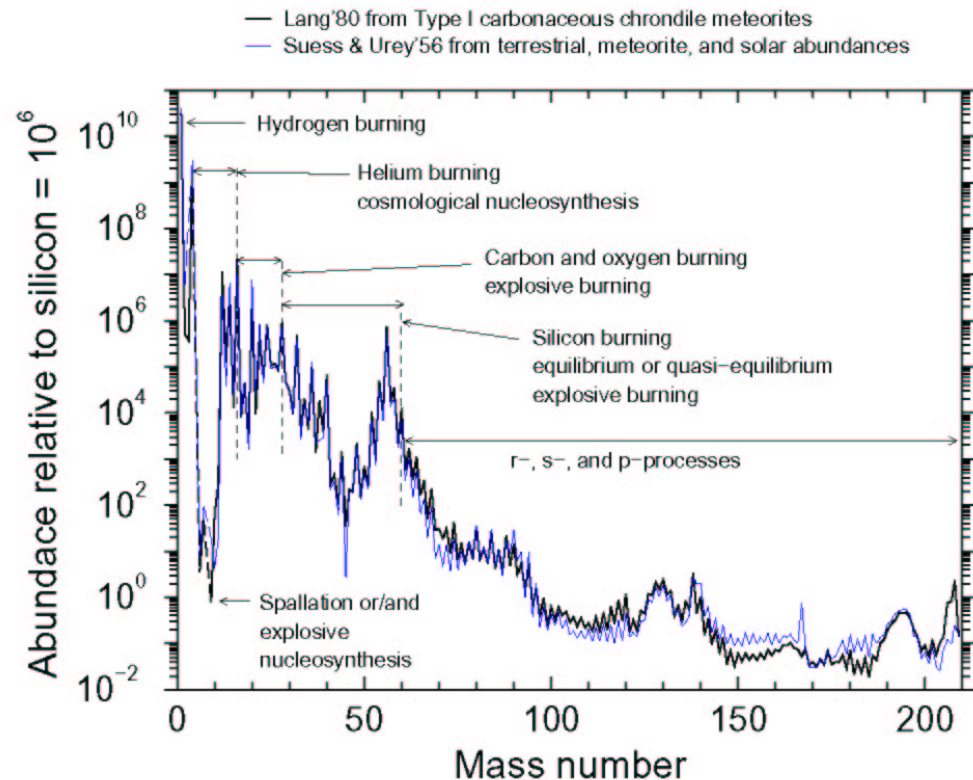


Fig. 1.— Abundances of solar system nuclides plotted as a function of mass number. The thin blue curves shows old data compiled in Table III by Suess and Urey (1956) which are based on measurements of terrestrial, meteoric, and solar abundances. These data were used by Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957) in postulating the basic nucleosynthetic processes in stars in their seminal work which become widely known as “B<sup>2</sup>FH,” the “bible” of nuclear astrophysics. The thick black curve shows newer data from the compilation published in Table 38 by Lang (1980) which are based upon measurement of Type I carbonaceous chondrite meteorites, and are thought to be a better representation than Suess and Urey’s curve. The nuclear processes which are thought to be the main stellar mechanisms of nuclide production are shown as well in the figure.

# Confronto tra le abbondanze dei vari nuclidi nei RC e nell'ISM

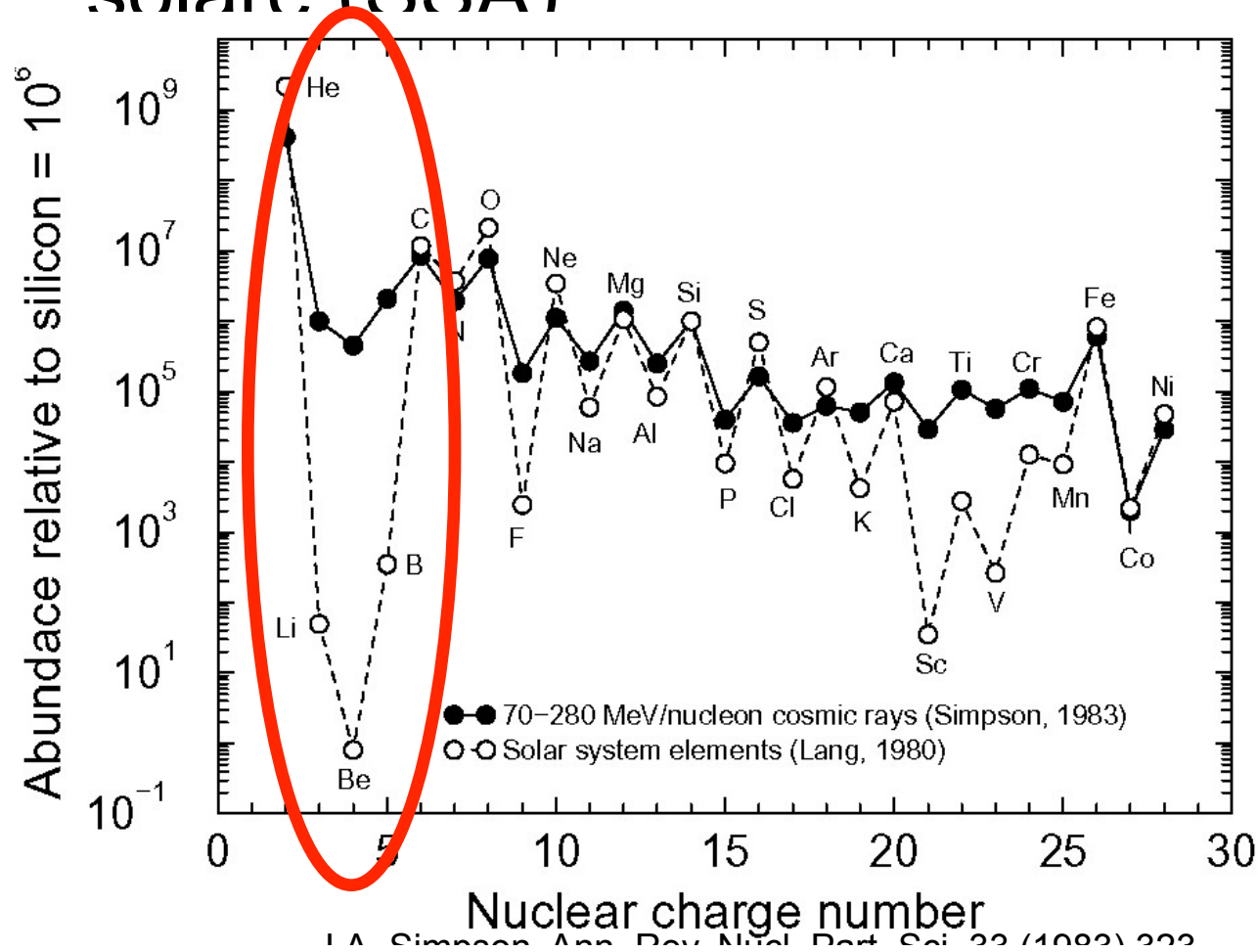
- I RC hanno una composizione chimica analoga a quella del Sistema Solare (Solar System Abundance, SSA)?
- Se sì, questo indica una origine simile a quella del SS.
- Le abbondanze degli elementi nei RC si determinano tramite esperimenti di misura diretta dei RC (vedi.)
- Si notano alcune discrepanze rispetto al SSA, in particolare in corrispondenza al gruppo Li, Be, B e del gruppo prima del Fe → Vedi fig.
- Si nota anche un effetto *pari/dispari*, noto dalla fisica dei nuclei



# Abbondanze relative dei RC e del sistema solare (SSA)

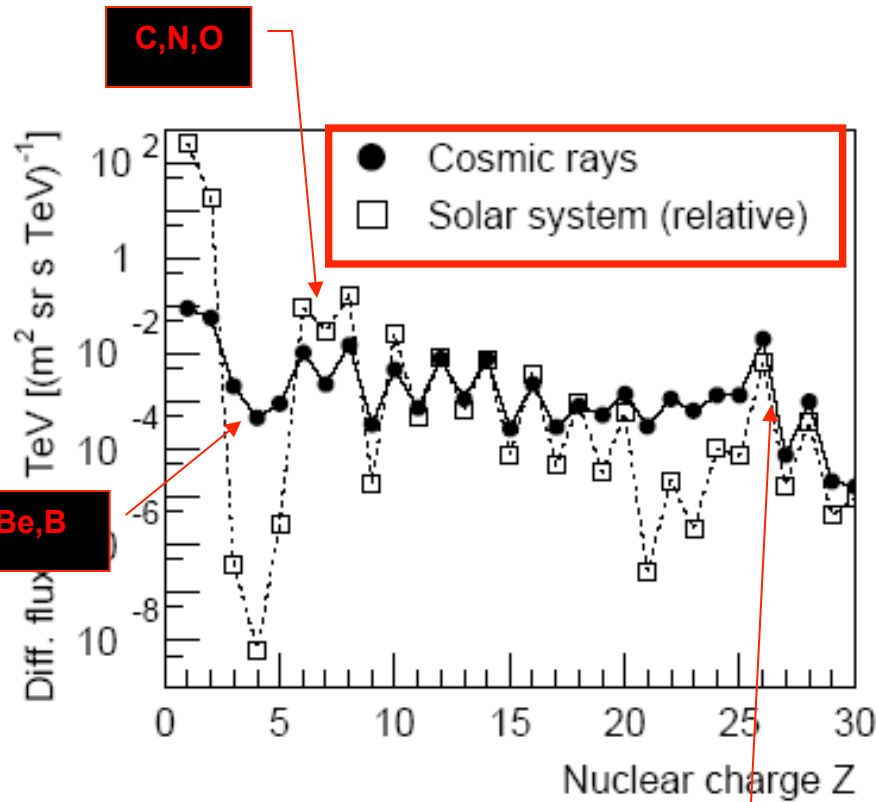
H e He sono dominanti (98%), leggermente in difetto rispetto SSA  
 Buon accordo tra CR e SSA per molti elementi, in particolare C, O, Mg, Fe.

Elementi leggeri Li, Be, B e quelli prima del ferro Sc, V sono straordinariamente abbondanti nei RC rispetto SSA

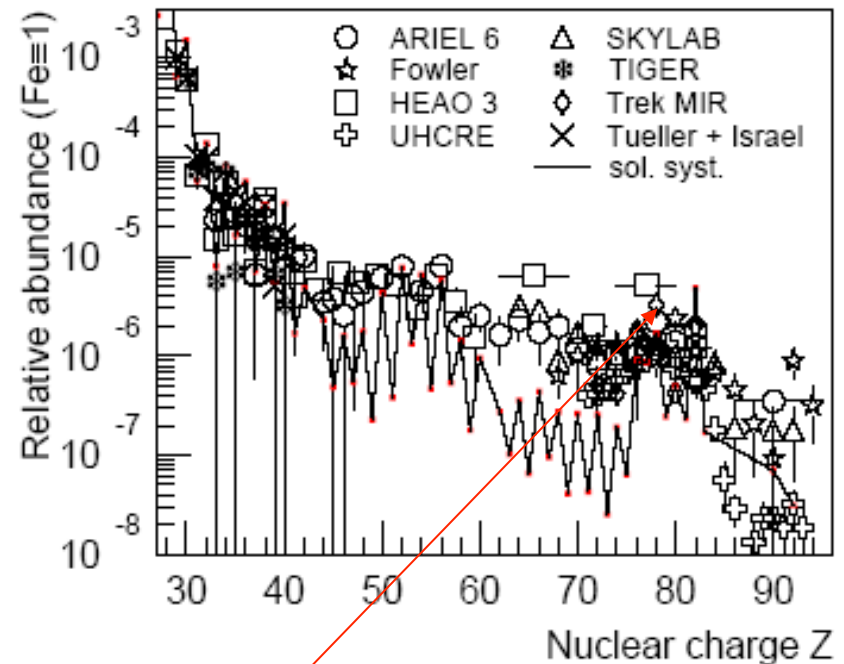


The first conclusion from the data shown is that the accelerated matter arriving on Earth is sampled from a region whose surrounding material has the same chemical composition of our Solar System. This material is plausibly originated by the same mechanism that originated the Sun and the planets, with some exceptions

# La composizione Chimica : confronto tra il elementi prima e dopo il Fe



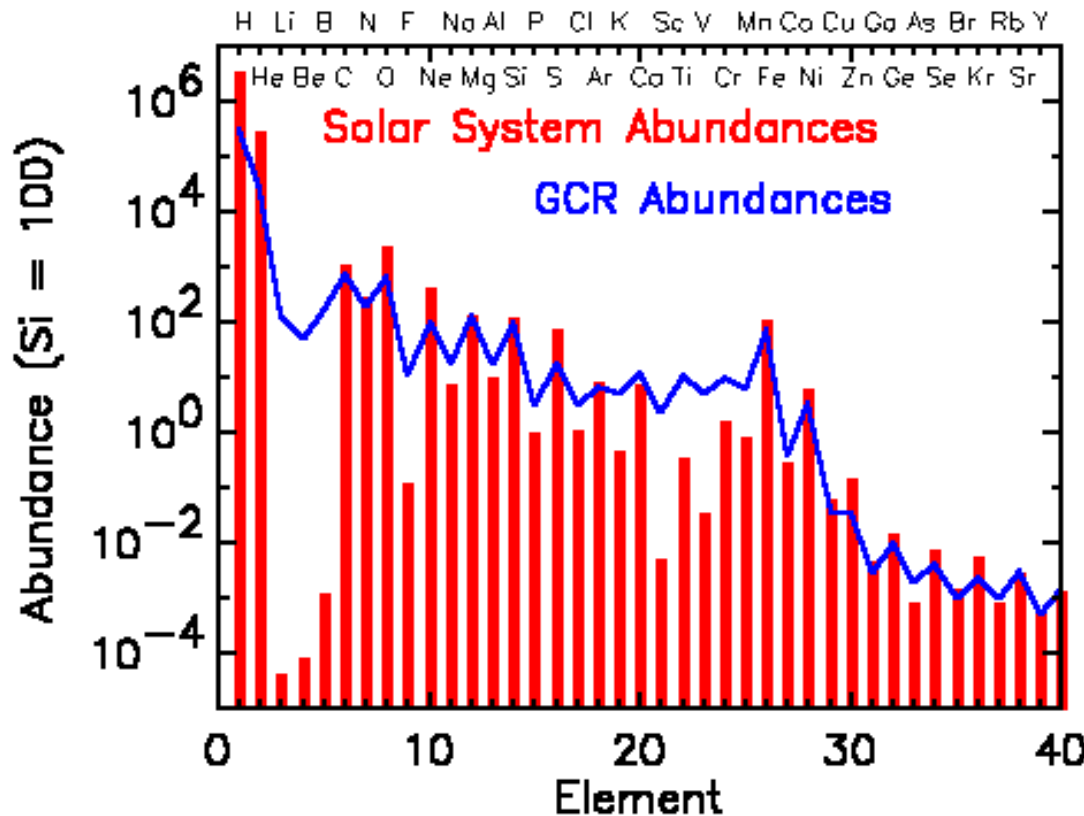
Elementi formati nella  
Nucleosintesi stellare



Elementi formati nell'esplosione  
(supernova)

# La stessa figura...

In addition to stable isotopes, CRs contain long-lived radioactive nuclides, mostly of secondary origin. The observed abundances of these isotopes can be used for establishing various time scales related to the origin of CRs. In particular, secondary isotopes which decay through  $\beta^\pm$  emission have been used as a second method to measure the residence times of CR in the galaxy,  $\tau_{\text{esc}}$ .



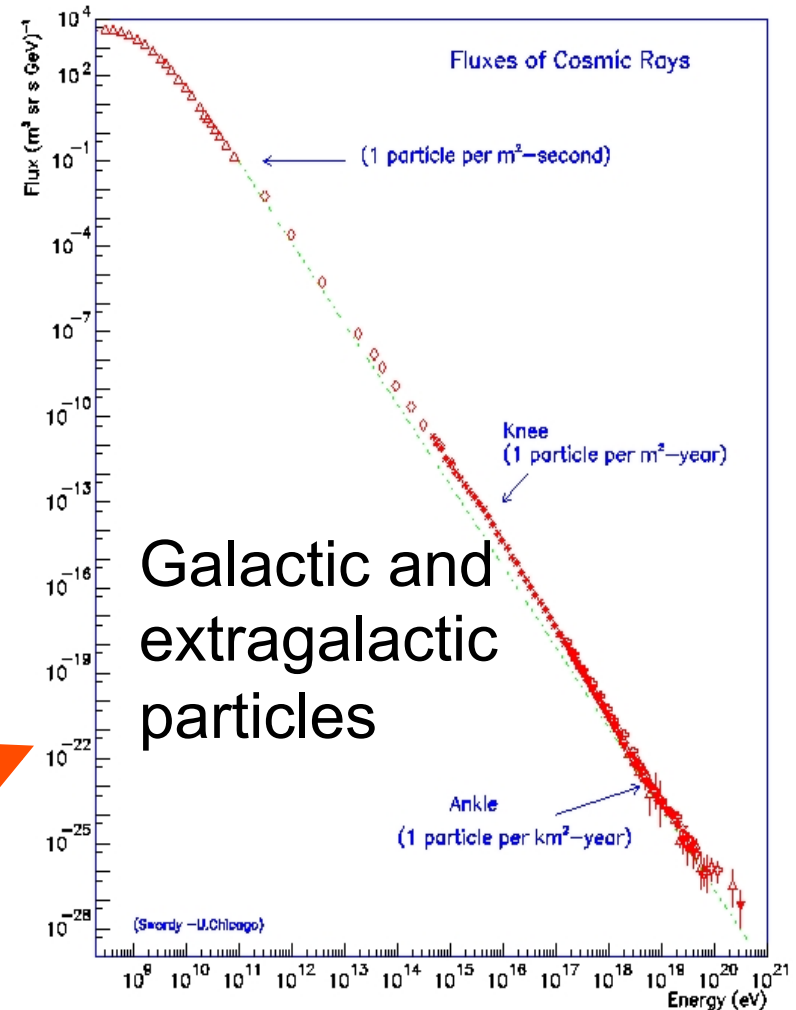
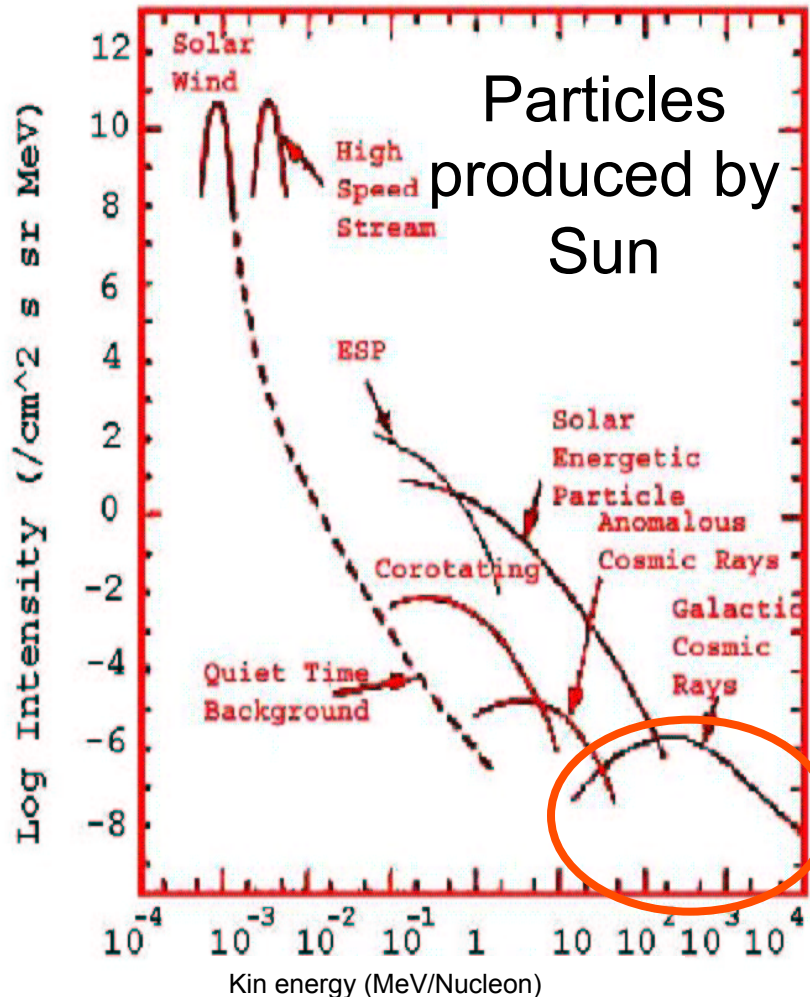
# CHEMICAL COMPOSITION of CR at LOW ENERGIES

Intensity ( $E > 2.5 \text{ GeV/particle}(\text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ sec}^{-1})$ )

Nuclear group	Particle charge, Z	Integral Intensity in CR ( $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ )	Number of particles per $10^4$ protons	
			CR	Universe
Protons	1	1300	$10^4$	$10^4$
Helium	2	94	720	$1.6 \times 10^3$
L (=Li, Be, B)	3-5	2	15	$10^{-4}$
M(=C, N, O)	6-9	6.7	52	14
Heavy	10-19	2	15	6
VeryHeavy	20-30	0.5	4	0.06
SuperHeavy	>30	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$7 \times 10^{-5}$
Electrons	-1	13	100	$10^4$
Antiprotons	-1	>0.1	5	?

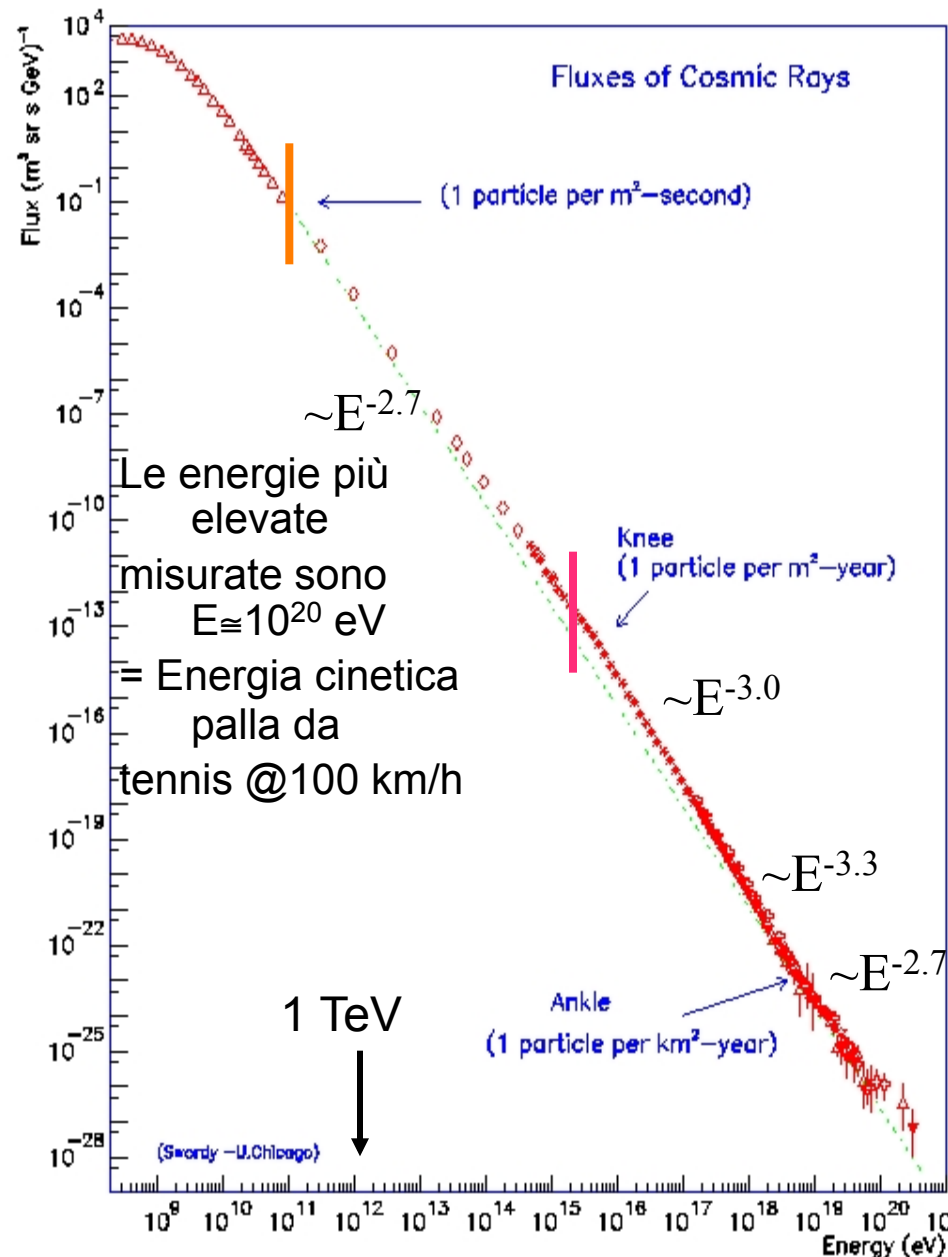
# Lo spettro energetico dei RC primari

Lo spettro differenziale e' il numero di particelle che attraversano l'unita' di superficie per unita' di tempo, di angolo solido e di energia  
 $dN/dtdEdSd\Omega$

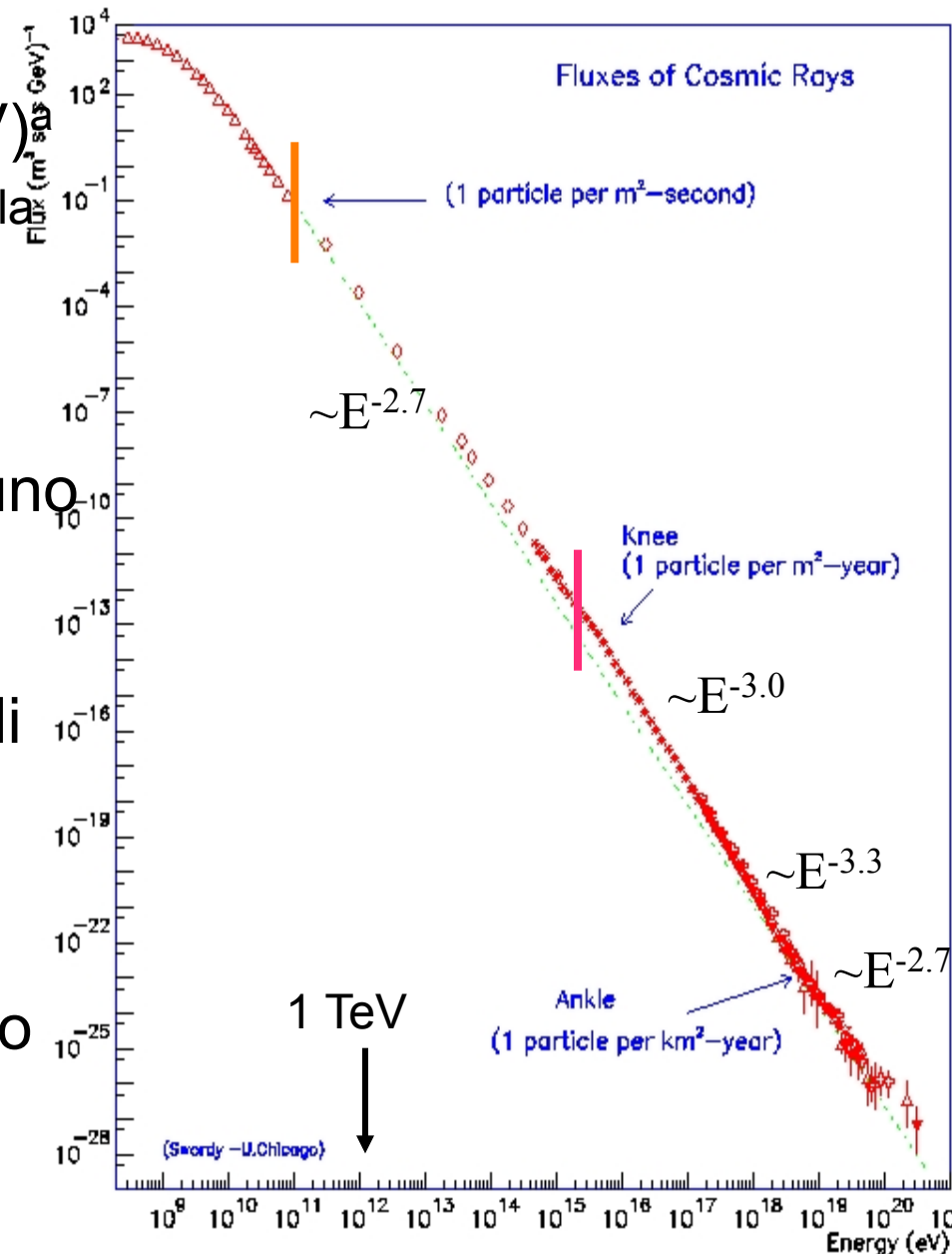


- $\Phi_{\text{TOT}} \sim 10000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
- Misure dirette: 85% p, 12% He,  $\approx 1\%$  nuclei pesanti,  $\approx 2\%$   $e^\pm$ , antiprotoni + fotoni
- Si estende per 13 ordini di grandezza in energia
- Per 32 ordini di grandezza in flusso
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con almeno due cambi di pendenza

Le energie più elevate in gioco nei RC sono irraggiungibili agli acceleratori



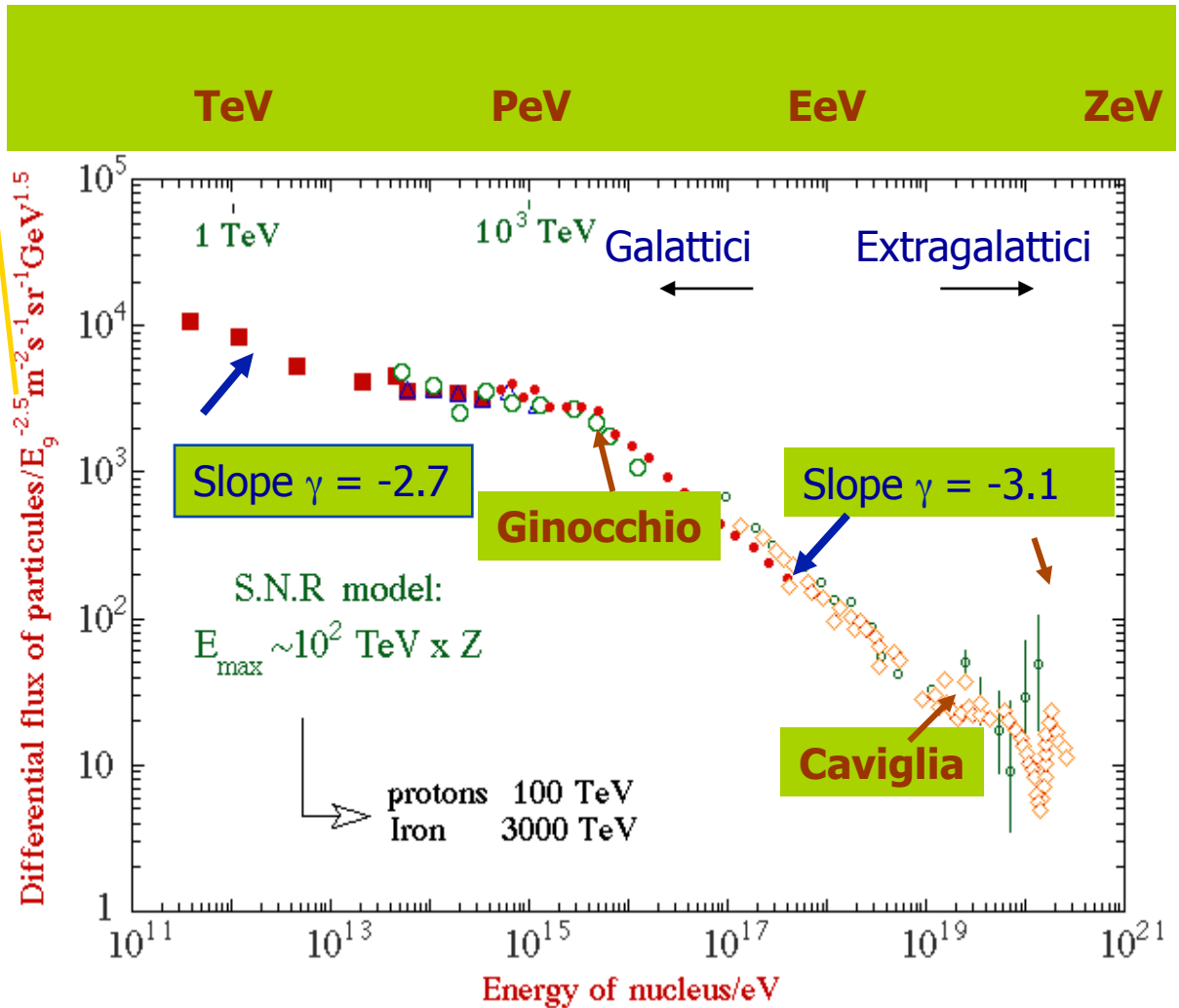
- Legge di potenza  $\Phi = K(E/\text{GeV})^{-\alpha}$
- Spettri non termici (quale sarebbe la distribuzione di energia di uno spettro termico?)
- Processi di accelerazione + propagazione che producono uno spettro regolare
- da informazioni sui processi di accelerazione alle sorgenti e di propagazione nel mezzo interstellare delle particelle
- A bassa energia lo spettro e' influenzato dall'azione del vento solare





# Ancora lo spettro dei RC, ma...

L'asse y viene moltiplicato per  $E^{2.5}$  (o più in generale per una potenza di  $E$ ), in modo da rendere "più piatta" la figura ed accentuare il **cambiamento di pendenza!**





# I dati sperimentali

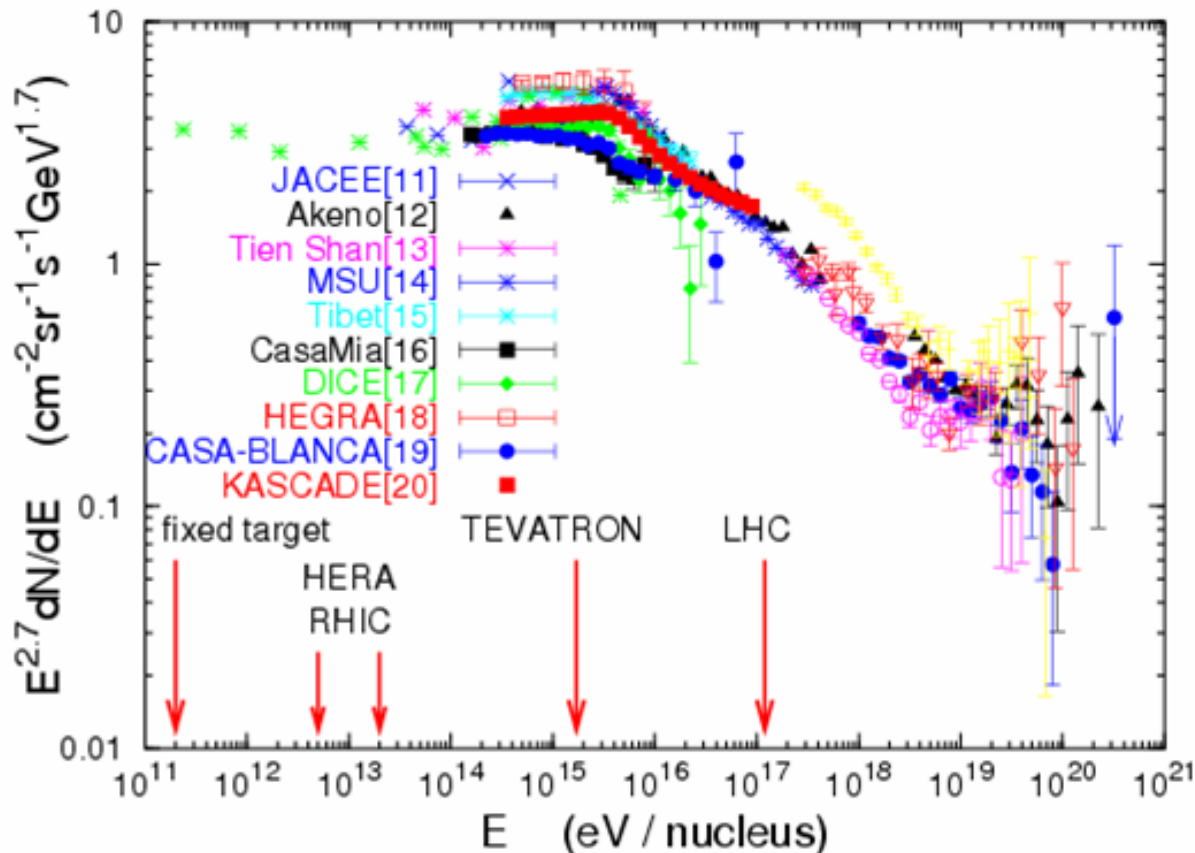
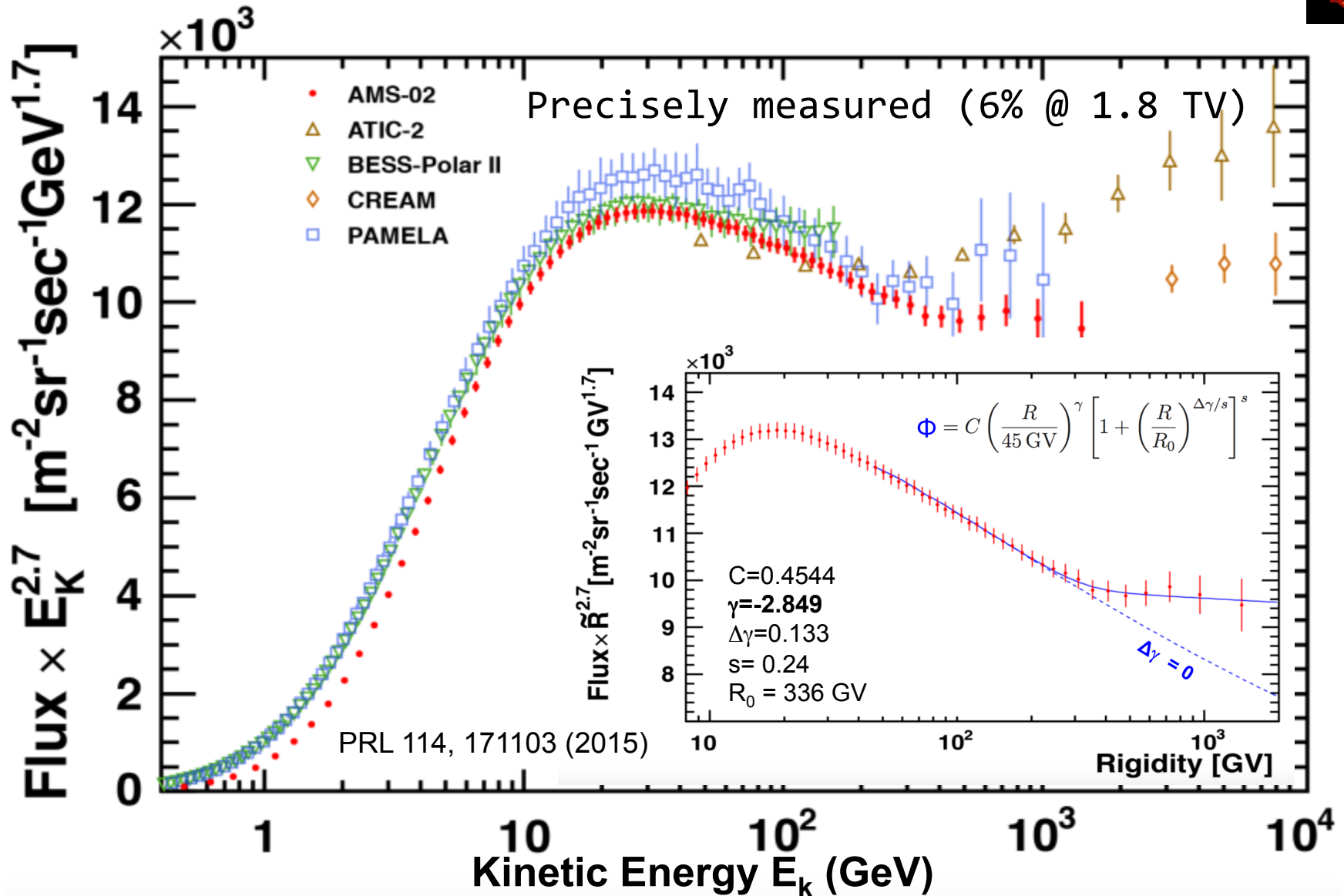


FIGURE 1. Summary of measurements of the high energy cosmic-ray spectrum. Data below 100 TeV are from a satellite detector [10]. Data in the knee region are from Refs. [11–20]. References for data above  $10^{17}$  eV are given in Fig. 4.



# Proton flux

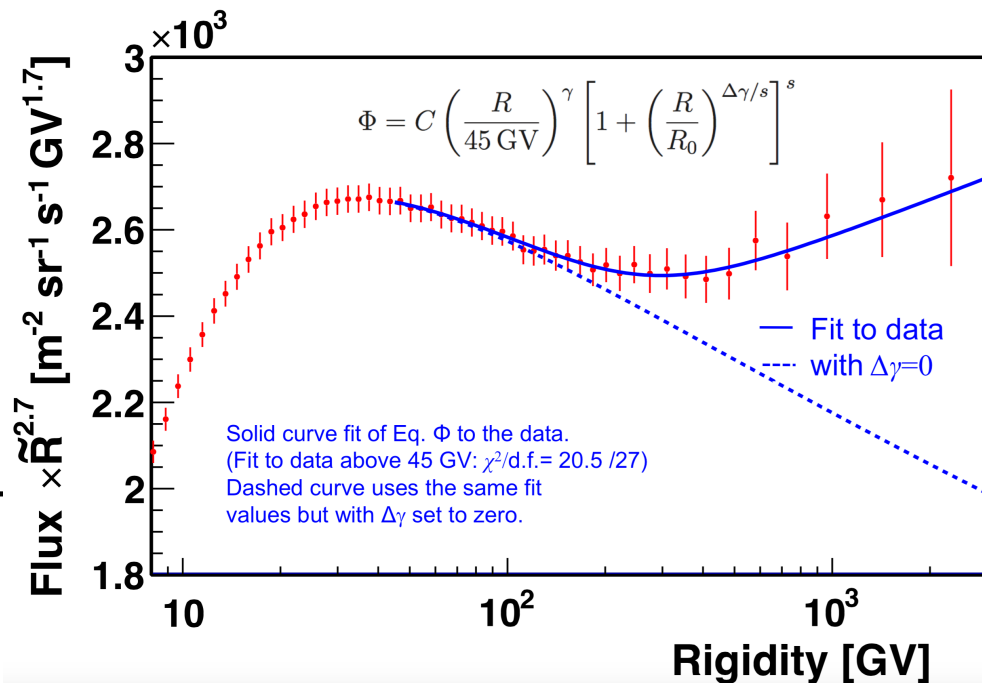
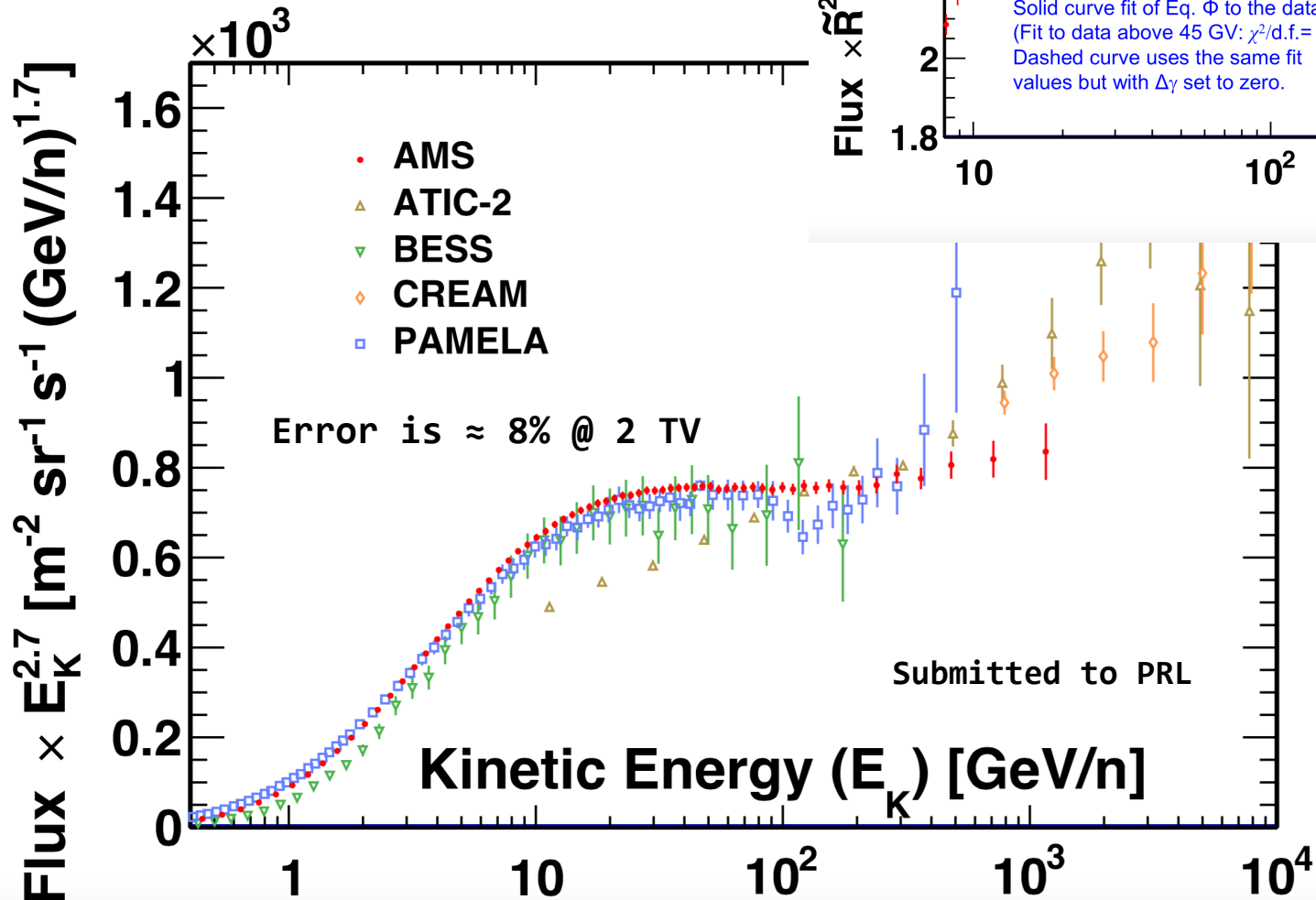


A change in the the spectral index is observed at 336 GV



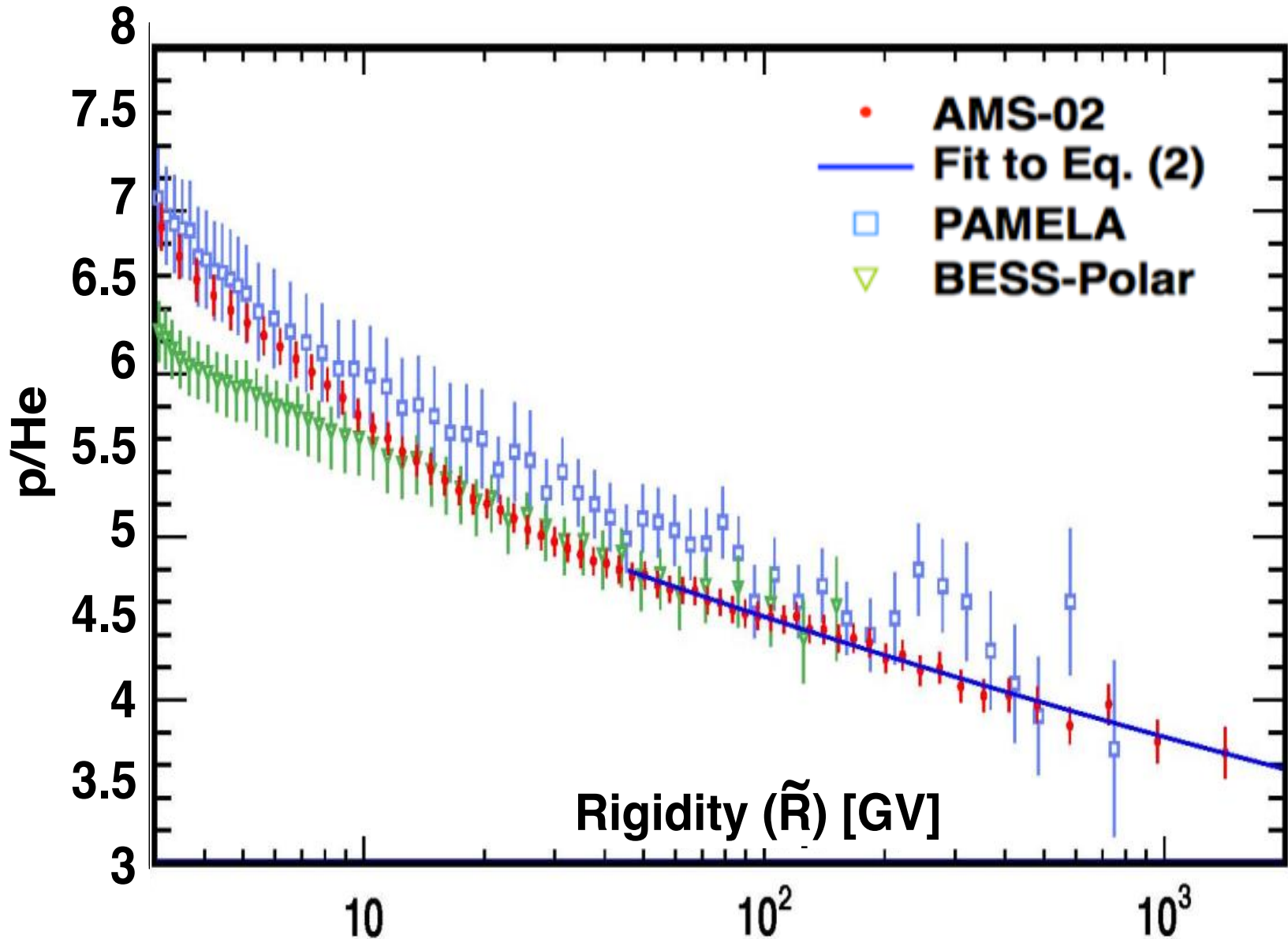
# He Flux

Transition energy  $R_0$  and smoothness parameter  $s$  are the same as for protons



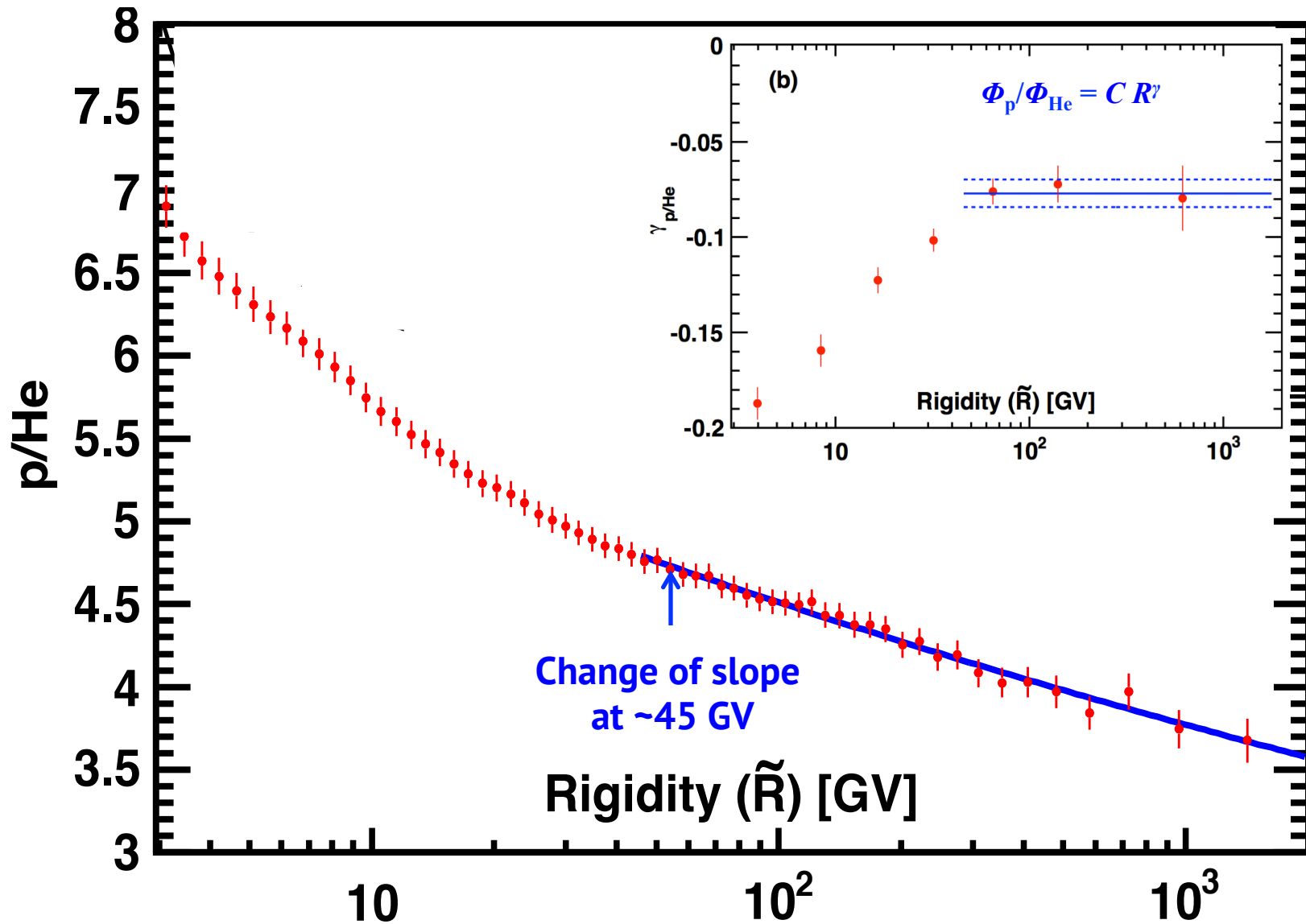


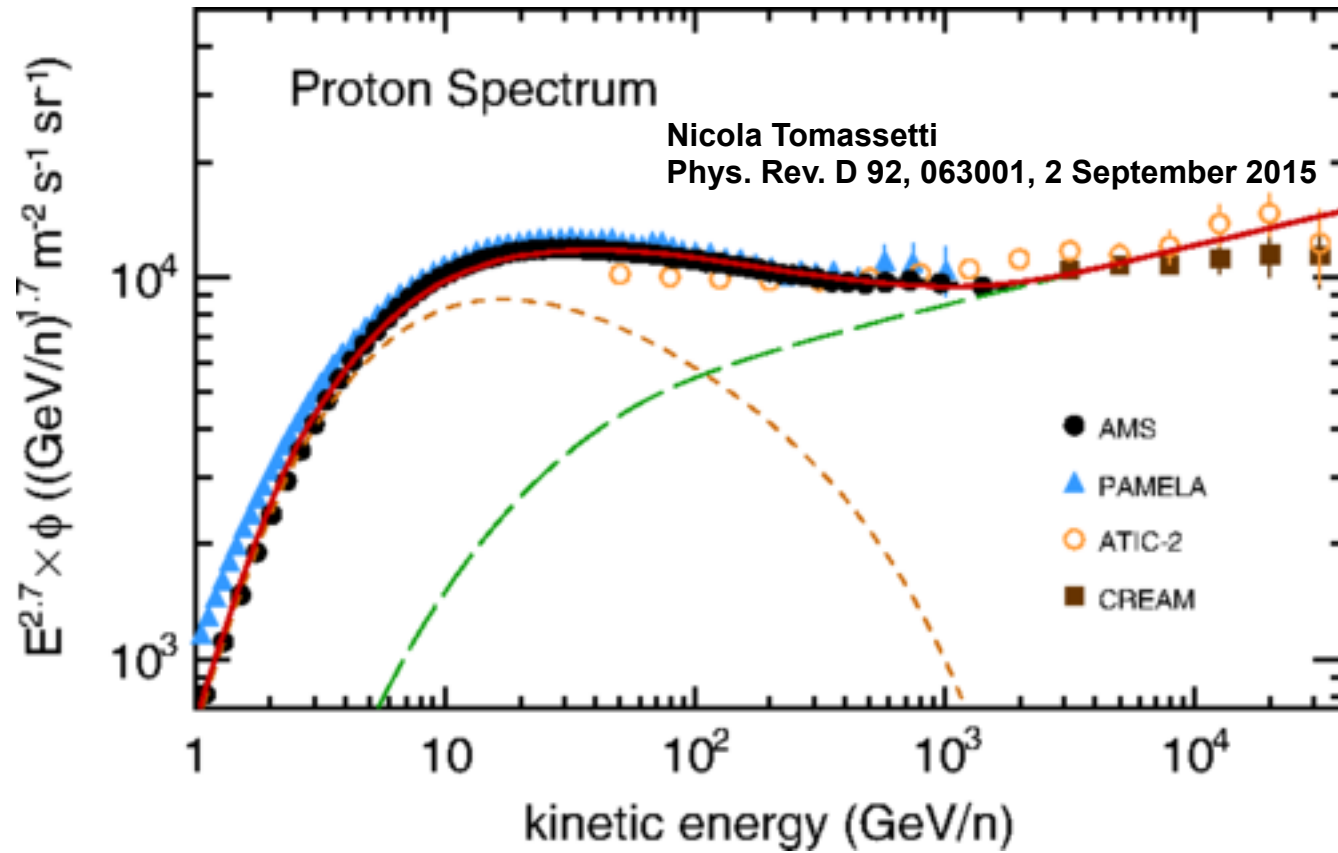
# AMS p/He flux ratio



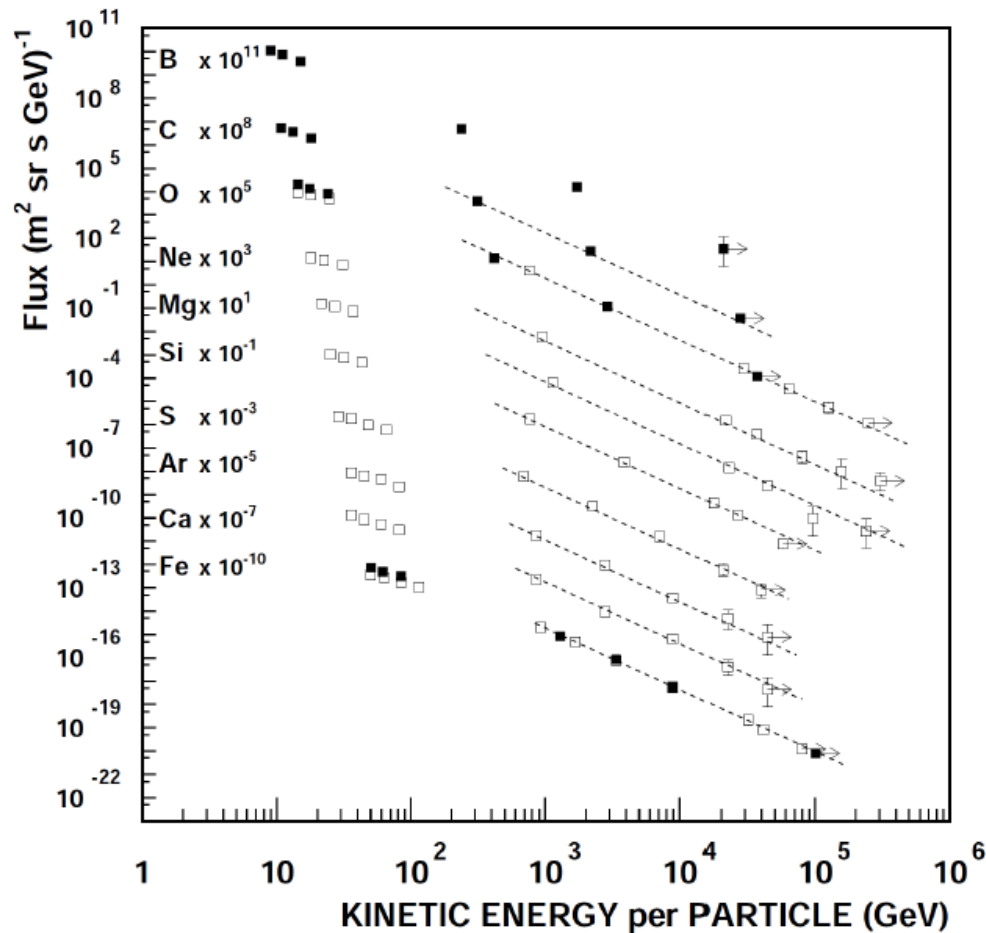


# AMS p/He flux ratio





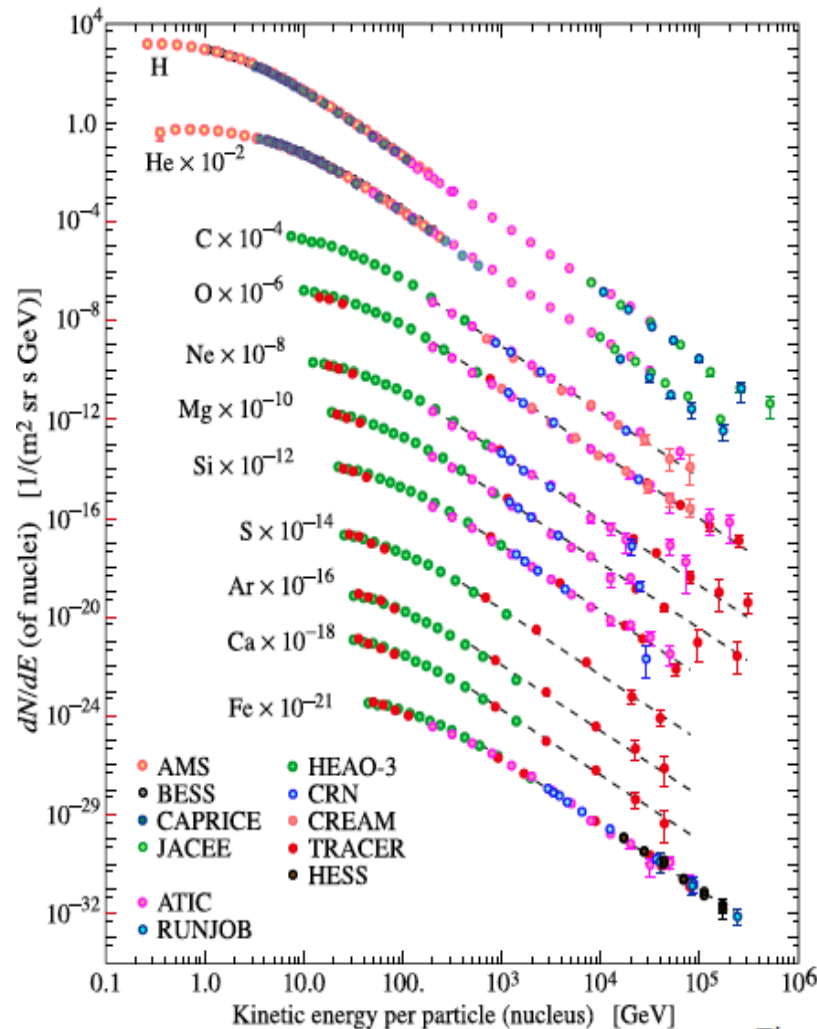
# Nuclear species flux



TRACER 2 flights data:  
POWER\_LAW fit above 20 GeV/n:

$$\text{index } 2.65 \pm 0.05$$

# Comparison between experimental results



## QUESTION:

Are all the hi-Z spectra simple power laws or is there beginning to be evidence for evolution (hardening), as now seems to be the case for H and He?

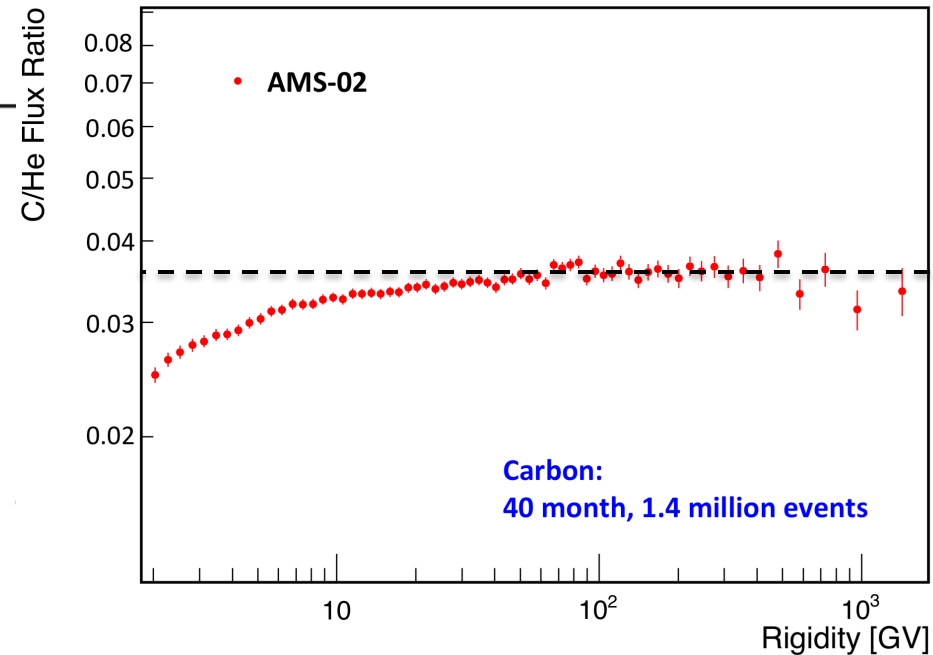
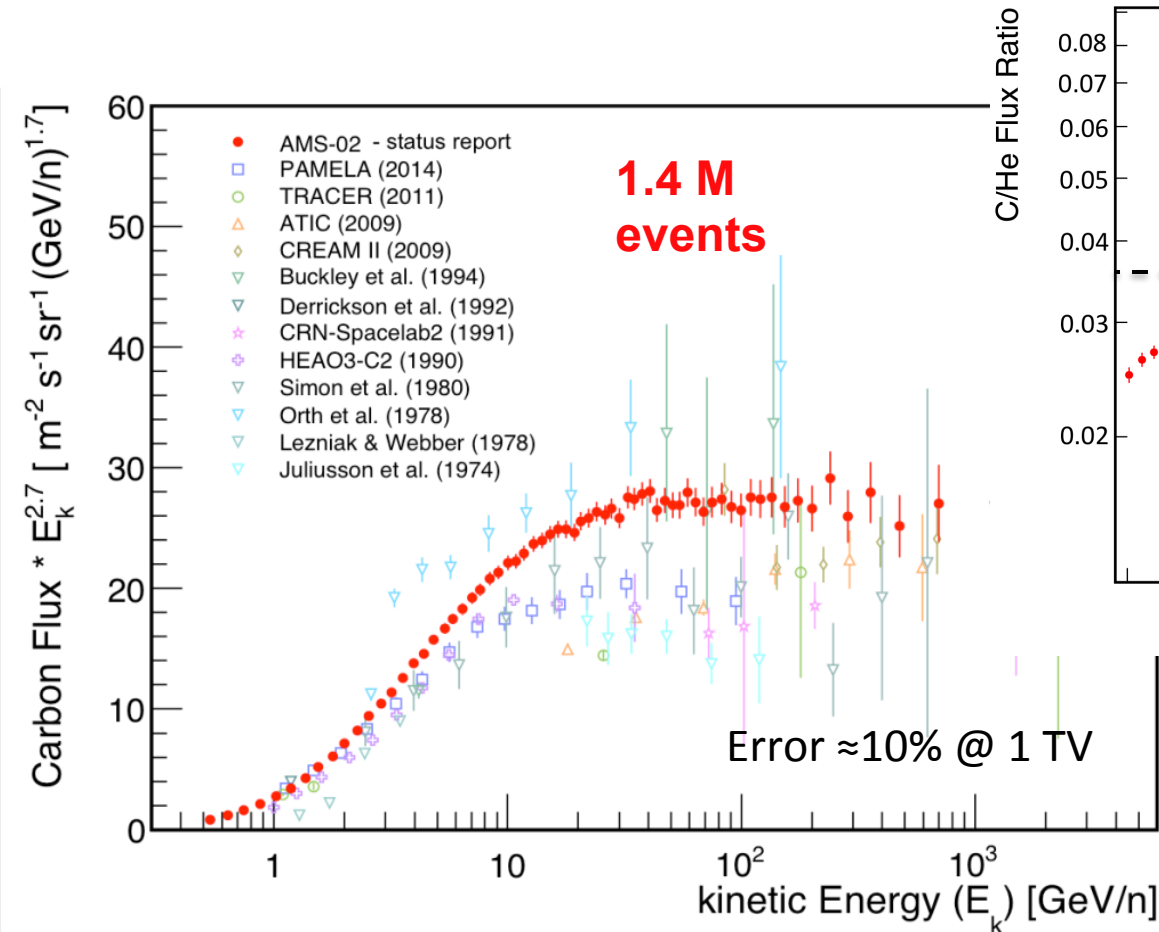
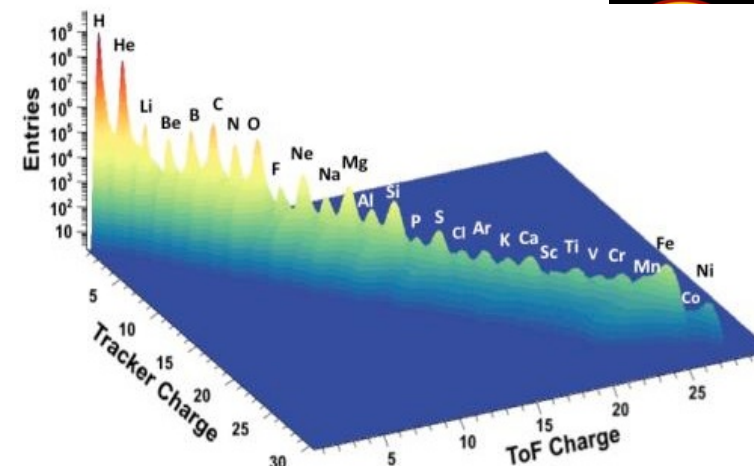
Figure courtesy of P.J. Boyle and D. Mueller





# nuclear fluxes..

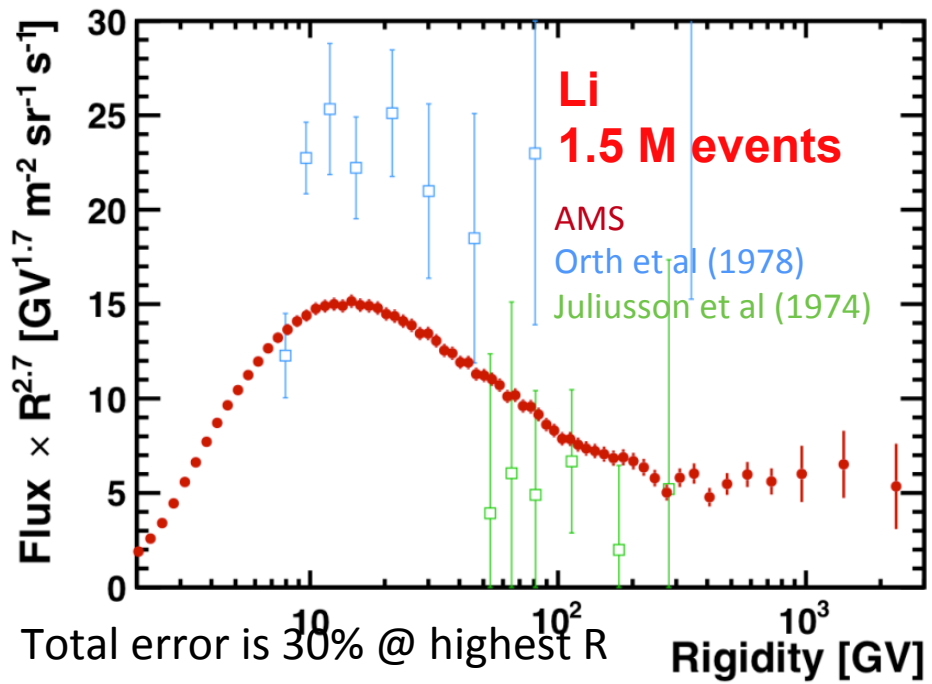
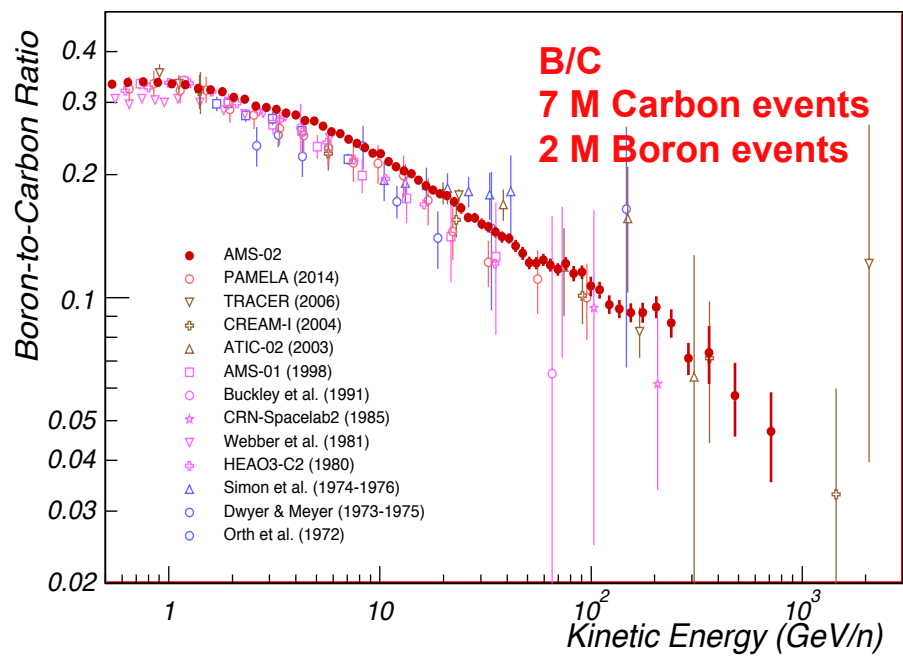
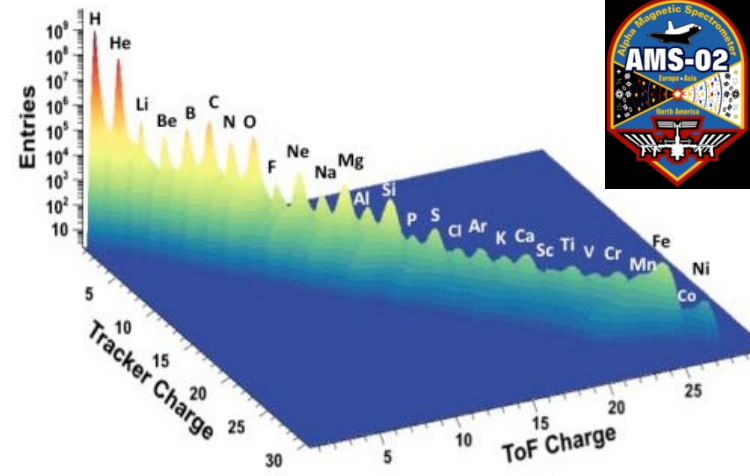
Primaries: e.g. C





# nuclear fluxes

## Secondaries:



# Heavier elements: hardening

