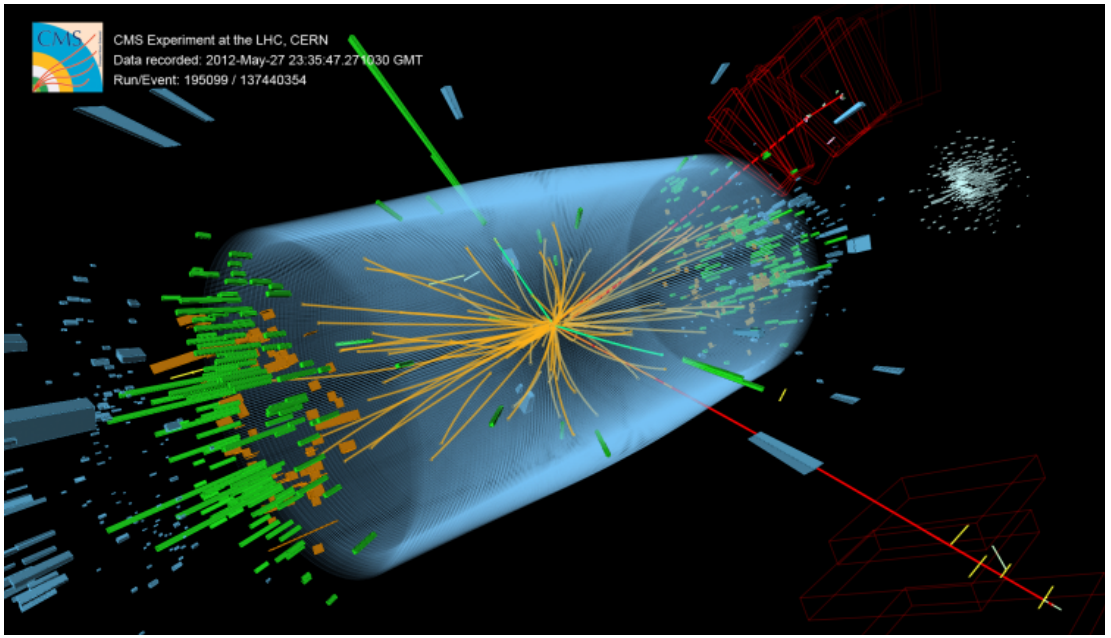
DENTRO IL PROTONE
CON L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE



Stefano Forte

Dipartimento di Fisica dell'Università e INFN, Milano

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI FISICA

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

VIS – SNS; Pisa, 14 febbraio 2018

Raoul Gatto (1930-2017)

una bella scoperta!

Information | References (26) | Citations (190) | Files | Plots

Double asymptotic scaling at HERA

Richard D. Ball, Stefano Forte (CERN)

May 1994 - 22 pages

Phys.Lett. B335 (1994) 77-86
DOI: 10.1016/0370-2693(94)91561-X
CERN-TH-7265-94
e-Print: hep-ph/9405320 | PDF

Abstract (Elsevier)
Perturbative QCD predicts that at sufficiently large Q 2 and small x nucleon structure functions should exhibit scaling in the two variables 1n 1 x 1n 1n Q 2 and 1n 1 x 1n 1n Q 2 provided only that the small- x behaviour of the input to the perturbative QCD evolution is sufficiently soft. We derive these

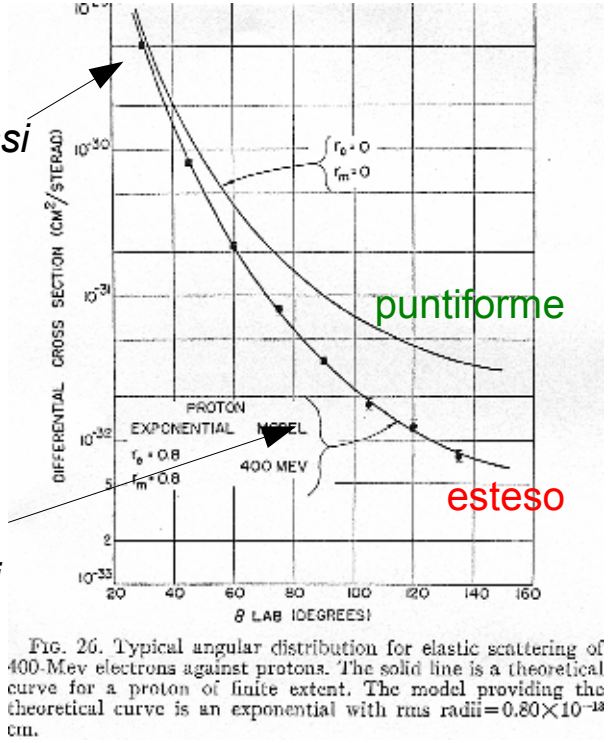
MA IL PROTONE NON È UNA PARTICELLA ELEMENTARE?

The history of physics shows that whenever experimental techniques advance to an extent that matter, as then known, can be analyzed into “elemental” parts, newer and more powerful studies show that the “elementary particles” have a structure themselves

(R. Hofstadter, 1961 Nobel lecture)

*numero di elettron*i

poco deflessi



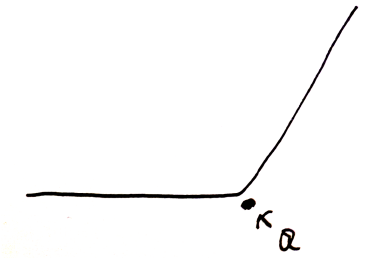
molto deflessi

FIG. 26. Typical angular distribution for elastic scattering of 400-Mev electrons against protons. The solid line is a theoretical curve for a proton of finite extent. The model providing the theoretical curve is an exponential with rms radii = 0.80×10^{-13} cm.

DEFLESSIONE ⇨ **RAGGIO**

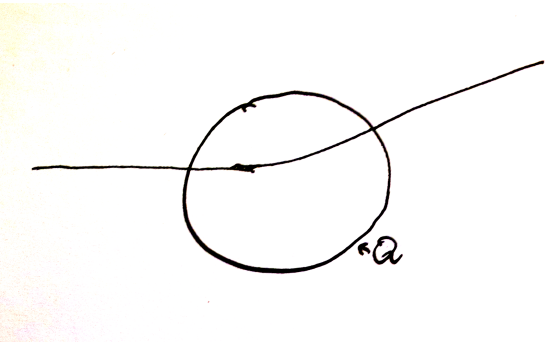
URTO DI ELETTRONI SU PROTONE
PUNTIFORME VS ESTESO

puntiforme



più deflessione

esteso



meno deflessione

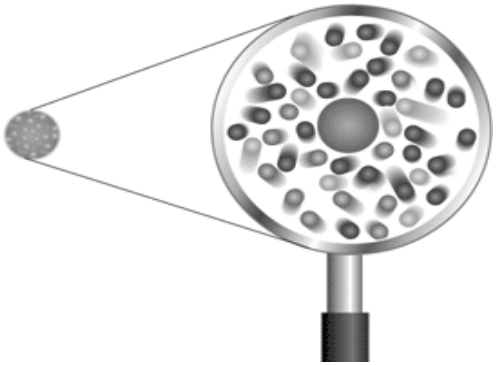
SEMPRE PIÙ IN PROFONDITÀ

ELASTICO

INELASTICO

URTO INELASTICO ⇒ **IL PROTONE VA IN MILLE PEZZI**

URTO SUI COSTITUENTI ⇒ **RAGGIO DEI COSTITUENTI**



...E SE SONO ELEMENTARI?

SONO "VESTITI" DA UNA NUBE DI PARTICELLE "VIRTUALI"

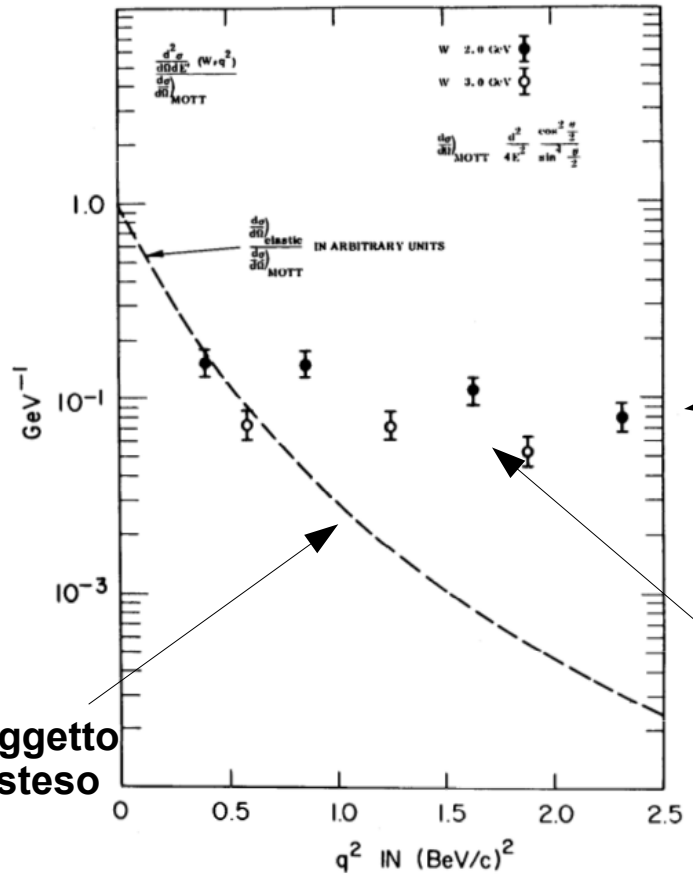
Raggio ⇔ Interazioni (forze)

URTO PROFONDAMENTE INELASTICO: LO "SCALING"

numero di elettroni indipendente dall'angolo!

SCALING

n. di elettroni



"angolo" →

oggetto esteso

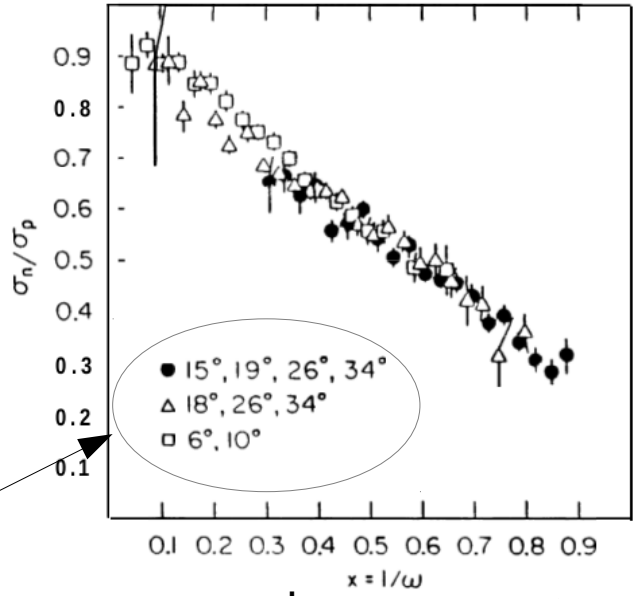
H.W.Kendall, 1990 Nobel Lecture

dati

COSTITUENTI PUNTIFORMI E LIBERI NEL PROTONE!

sono i quark? Carica elettrica 1/3, 2/3...

n. di elettroni



energia →

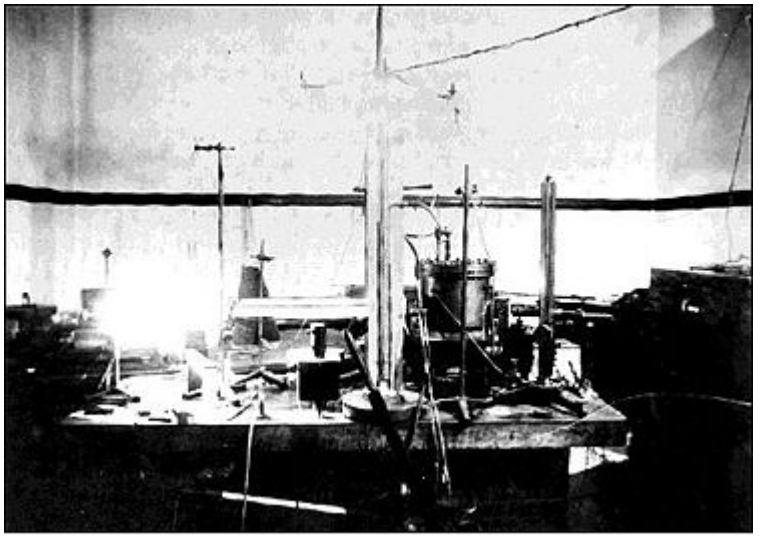
non dipende dall'angolo

SCALING

J.I.Friedman, 1990 Nobel Lecture

IL CONFINAMENTO DEI QUARK

**Se dentro al protone ci sono quark,
perché nessuno ha mai visto un quark?**

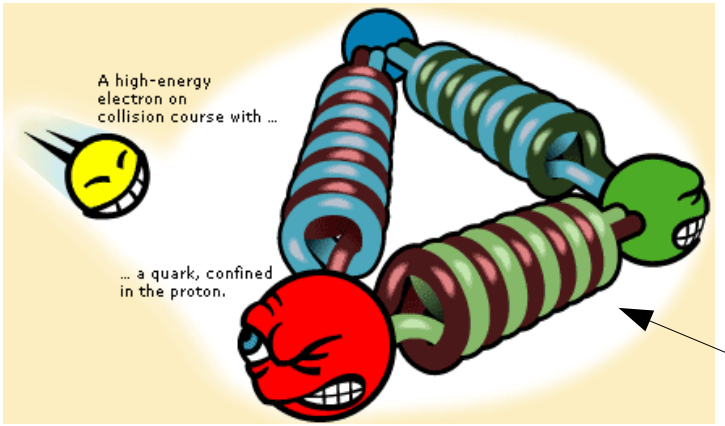


I QUARK DENTRO AL PROTONE SONO LIBERI???

esperimento di Millikan (1909)
ripetuto l'ultima volta nel 2002

carica elettrica ⇔ carica dell'elettrone

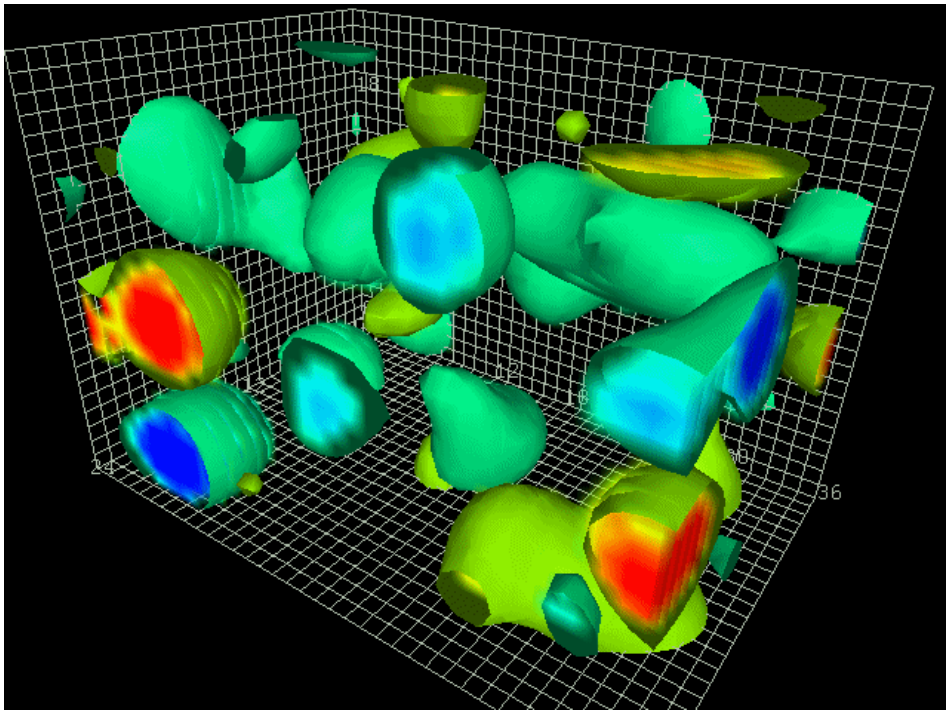
non esistono in natura cariche frazionarie



QUARK

GLUONI

IL VUOTO QUANTISTICO

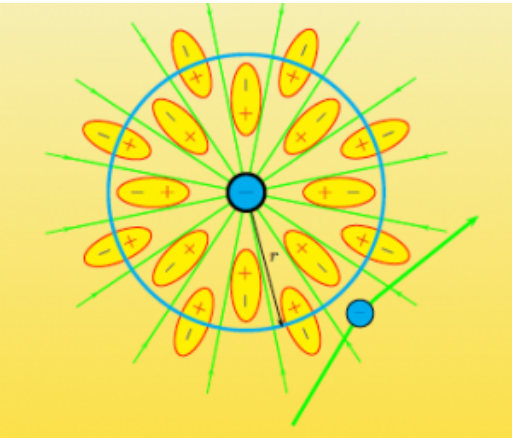


brulica di particelle
(campi) che compaiono
e scompaiono

Simulazione numerica su reticolo (D.B.Leinweber)
F. Wilczek, 2004 Nobel lecture

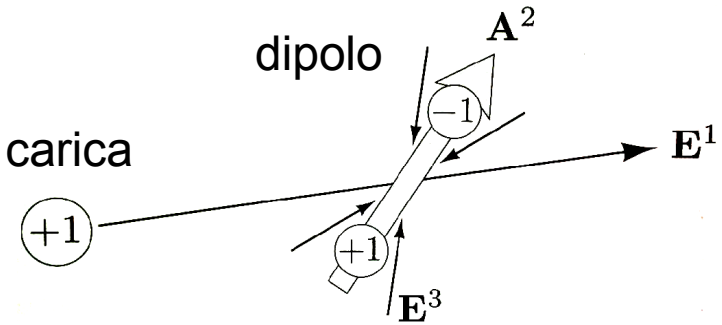
LA CARICA ELETTRICA SCHERMATA DAL VUOTO

**La carica dell'elettrone
a corta distanza diventa più grande!**



CROMODINAMICA QUANTISTICA

LIBERTÀ ASINTOTICA



i quark hanno una **carica "colorata"** (diversi tipi)

Il vuoto la rafforza!

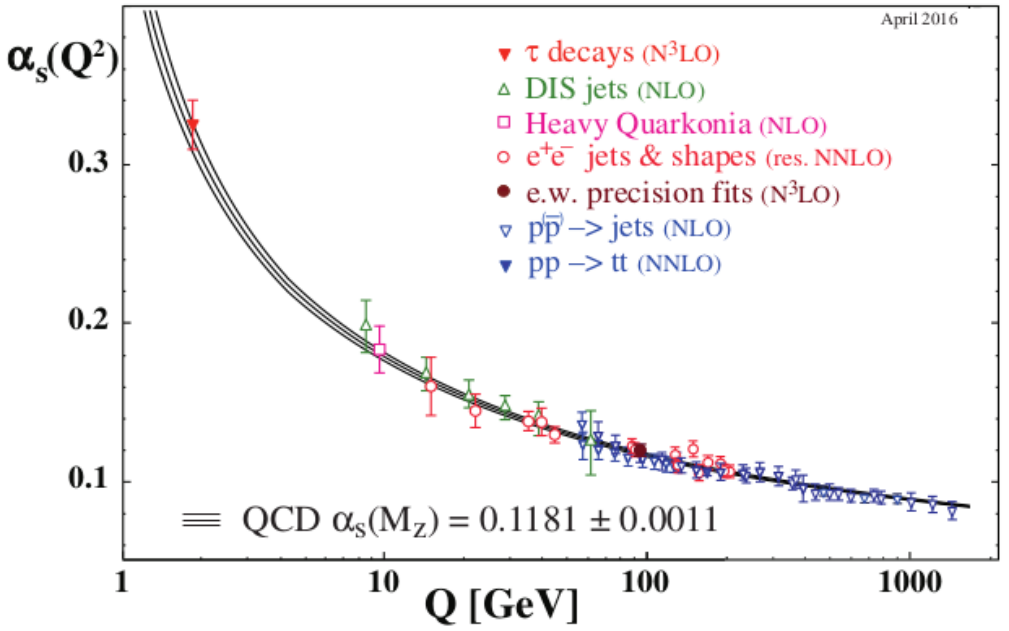
LA "CARICA COLORATA" A CORTA DISTANZA DIVENTA PIÙ PICCOLA

A DISTANZA INFINITESIMA

LA TEORIA È LIBERA

(NESSUNA FORZA)

"carica colorata" dei quark

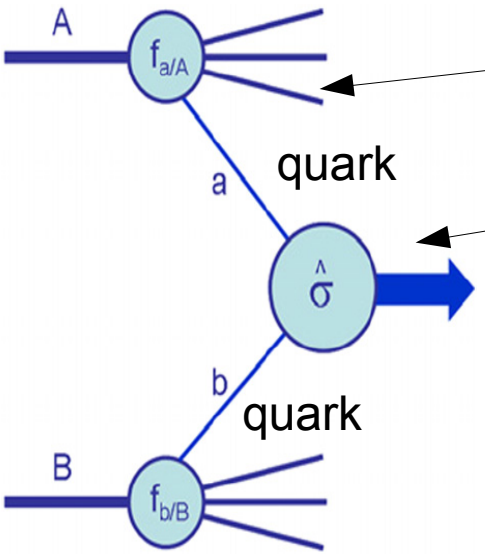


corta distanza ⟶

LA "FATTORIZZAZIONE"

A piccole distanze le forze tra quark scompaiono ⇒ **"perturbativo", calcolabile**

A grandi distanze sono così intense da confinare ⇒ **"nonperturbativo", ignoto**



Protone

Protone

Urto fra protoni =

Quark nel protone × Urto fra quark

confinamento
grande accoppiamento
non si sa calcolare

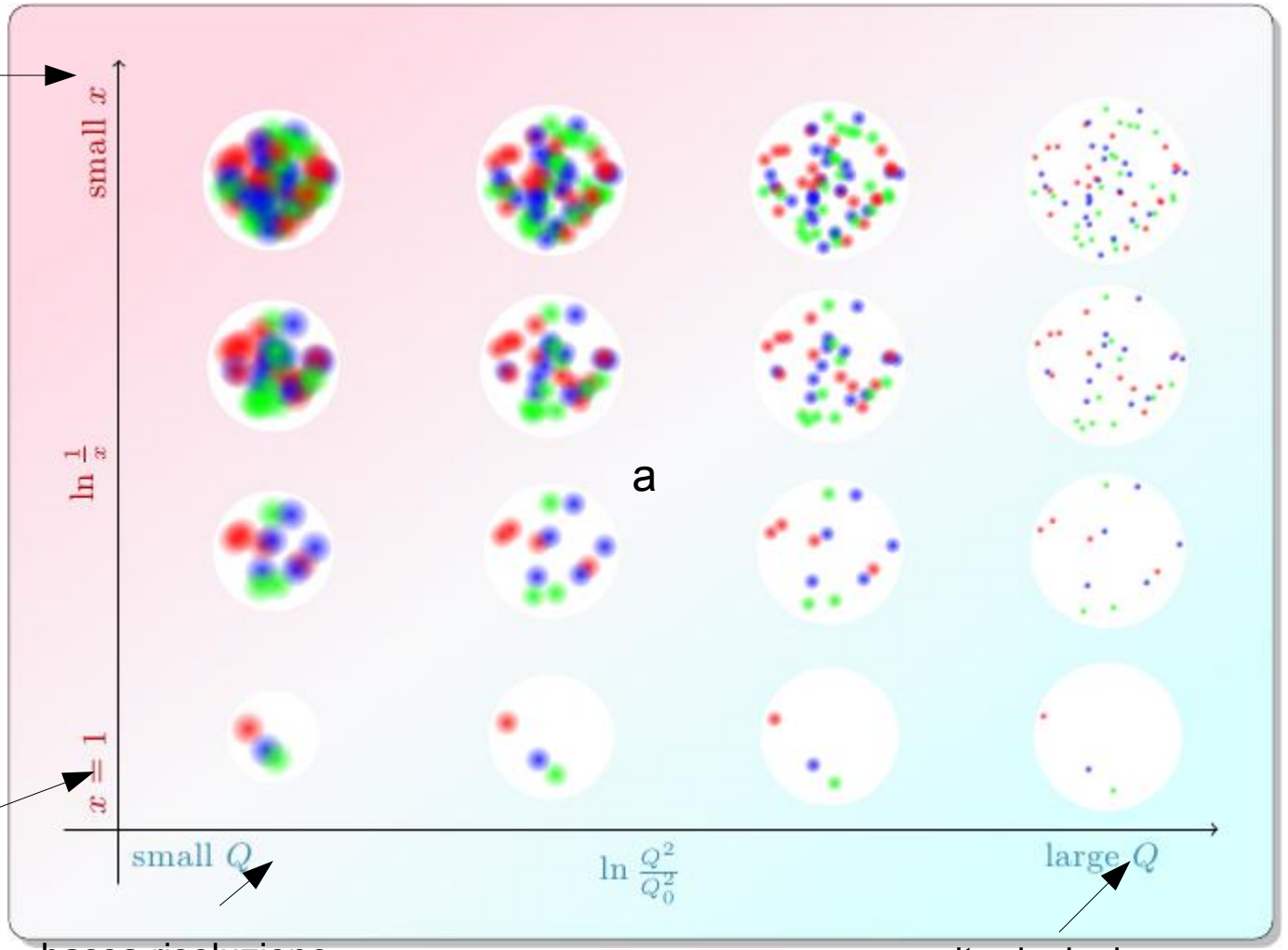
libertà asintotica
piccolo accoppiamento
calcolabile

QUAL È LA PROBABILITÀ DI TROVARE UN QUARK (O GLUONE!) DI UN CERTO TIPO ?

LA STRUTTURA DEL PROTONE

Distribuzioni di probabilità!

tanti costituenti



FRAZIONAMENTO
quanti costituenti

pochi costituenti

bassa risoluzione

alta risoluzione

RISOLUZIONE: quanto ingrandisce il microscopio

Libertà asintotica

DIPENDENZA DALLA RISOLUZIONE: CALCOLABILE!

EQUAZIONE DI ALTARELLI-PARISI

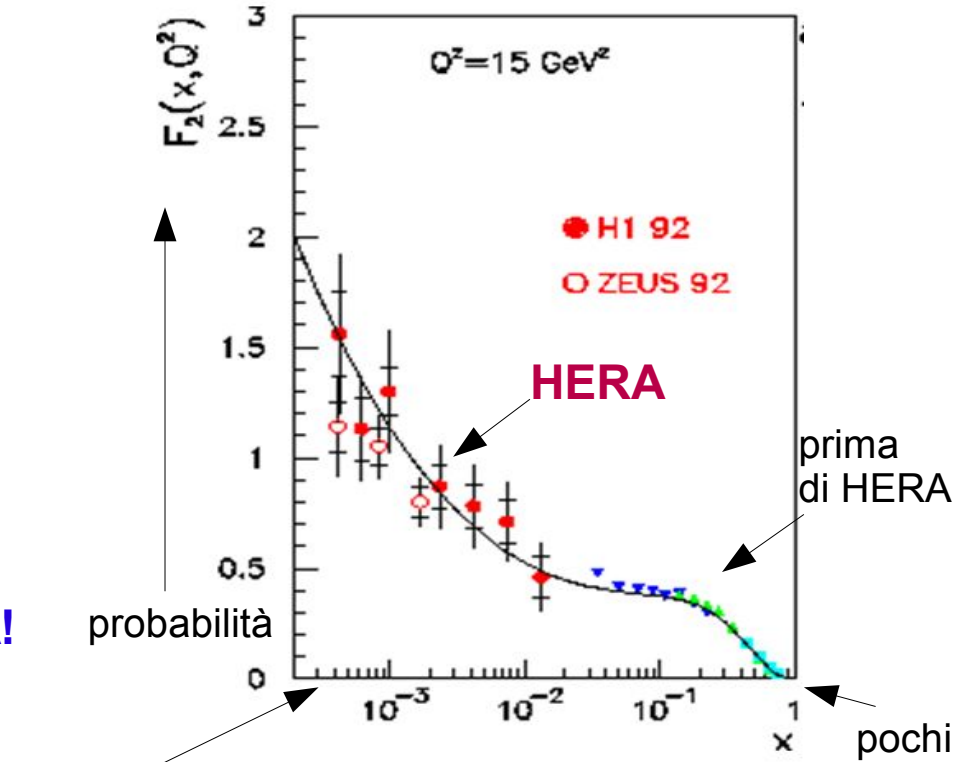
LA STRUTTURA DEL PROTONE AD ALTA ENERGIA

PIÙ FRAZIONAMENTO ⟺ **PIÙ ENERGIA NELL'URTO**

HERA: 1992-2005: primo collider e-p

VERSO LA FRONTIERA "NONPERTURBATIVA"

la "funzione di struttura" del protone



CRESCITA IMPROVVISA AD ALTA ENERGIA!

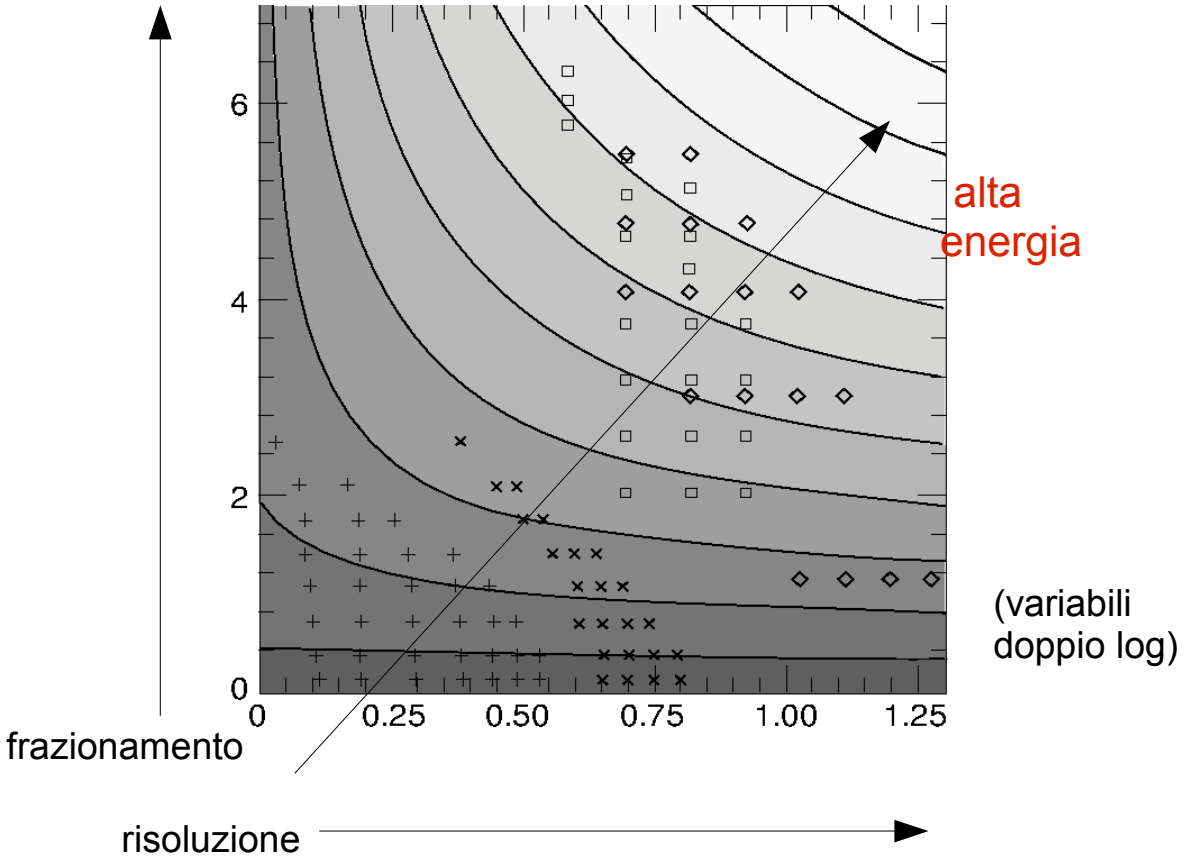
CHE SUCCEDE?
LA FATTORIZZAZIONE FALLISCE?

I DATI DI HERA E L'EQUAZIONE D'ONDA

S.F. e Richard Ball, 1997

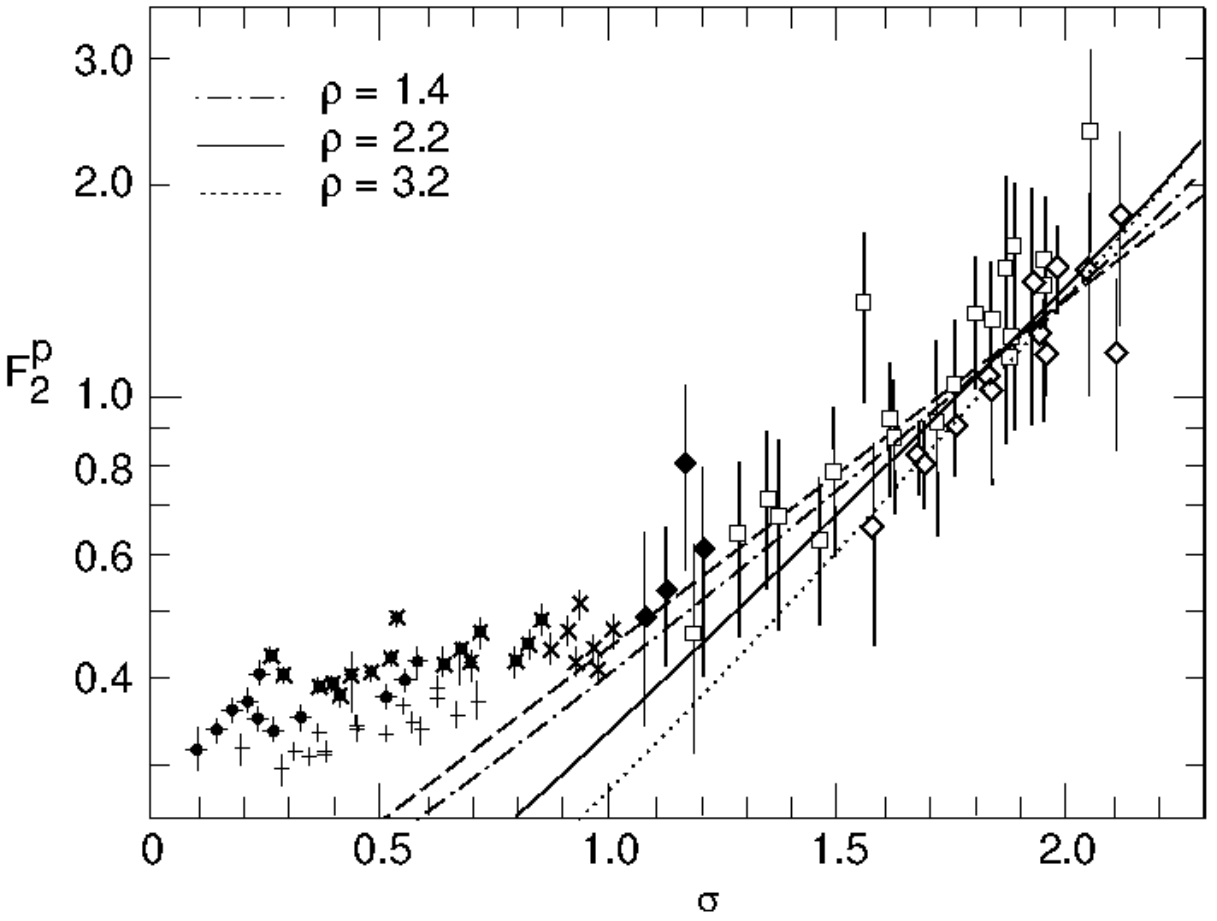
ALTA ENERGIA:

ALTARELLI-PARISI ⇔ EQUAZIONE D'ONDA



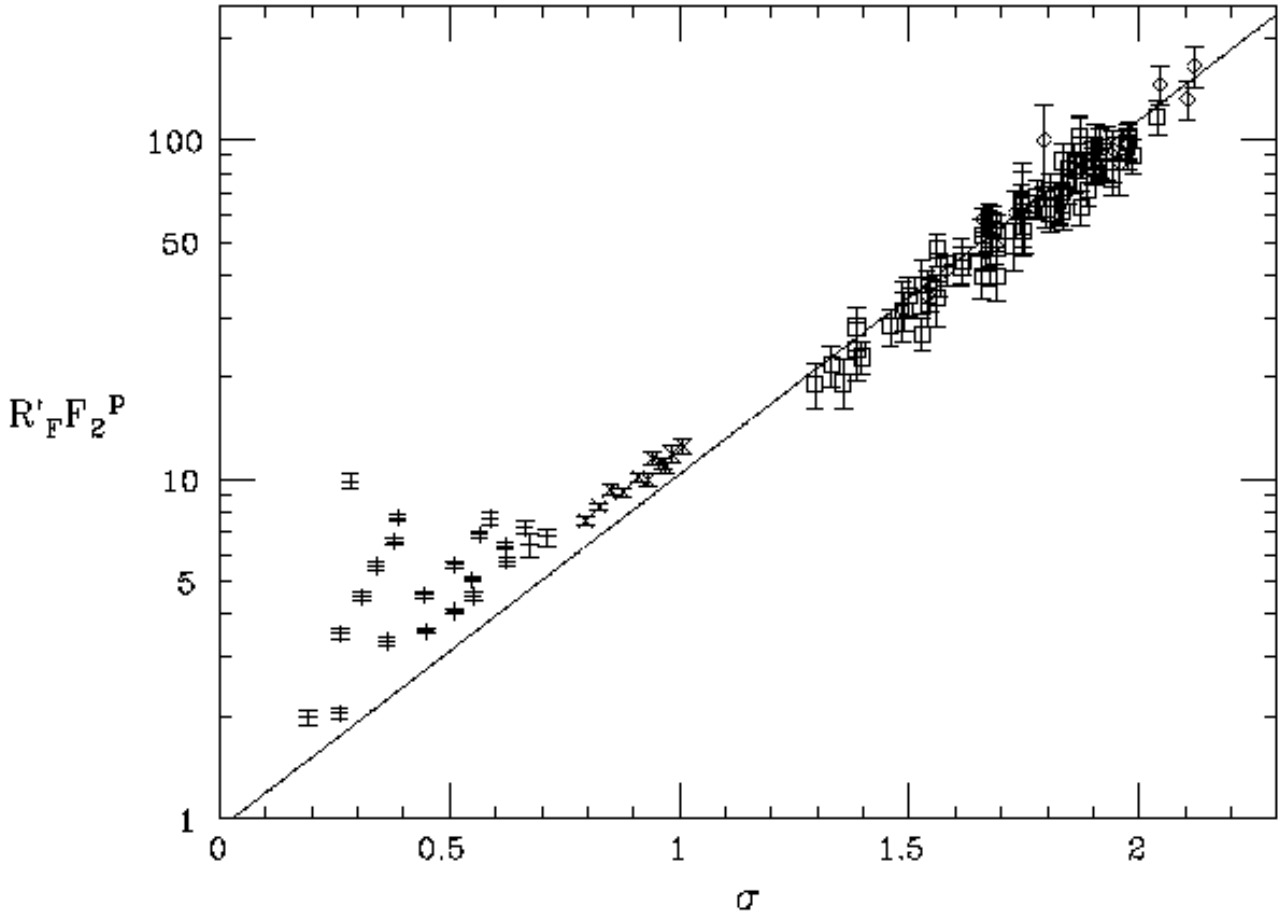
ASINTOTICAMENTE, ANDAMENTO UNIVERSALE! (non dipende dalle condizioni al contorno)

DOUBLE ASYMPTOTIC SCALING



S.F. e R. Ball, 1994

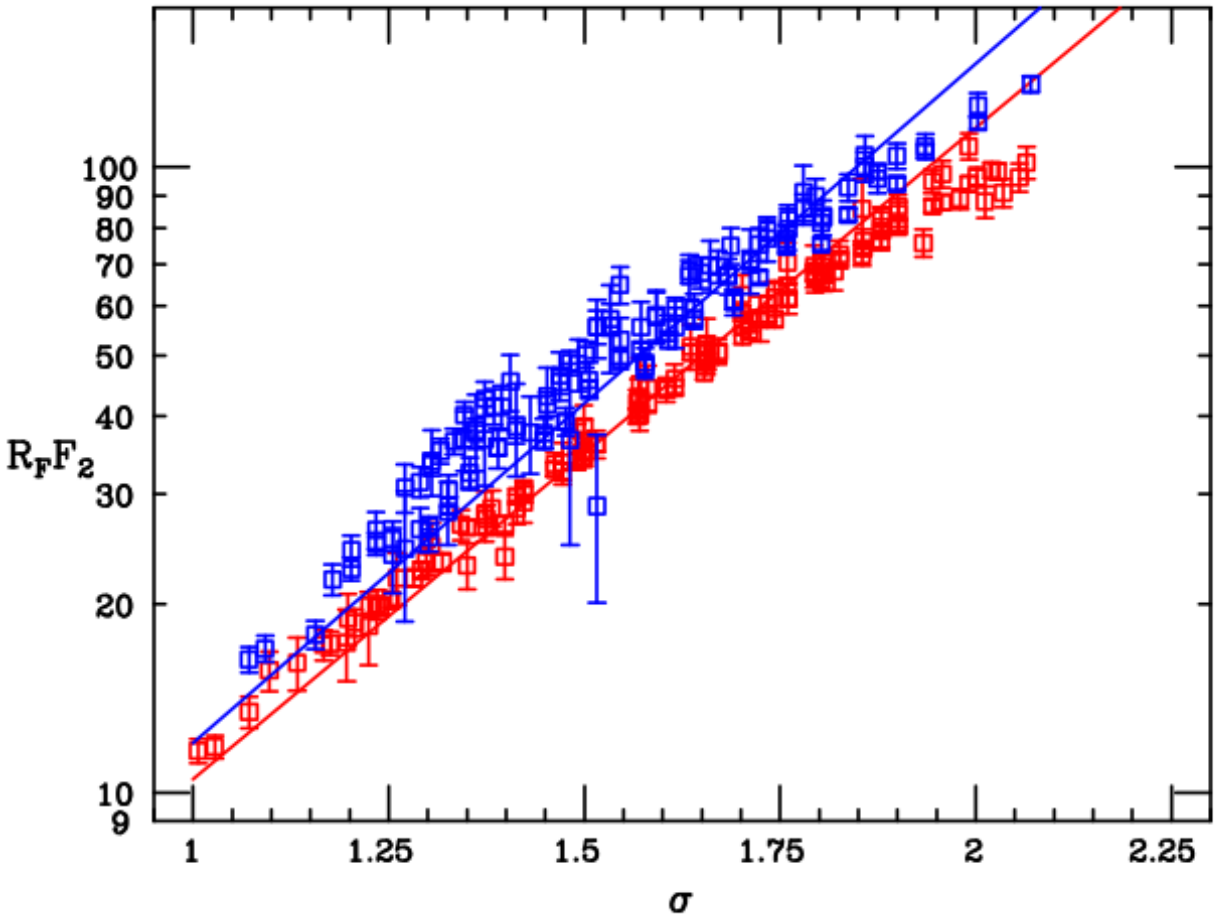
DOUBLE ASYMPTOTIC SCALING



S.F. e R. Ball, 1995

(inclusa la prima correzione)

DOUBLE ASYMPTOTIC SCALING



S.F. e R. Ball, 1997

(con e senza il quark pesante bottom)

Evgenii Levin

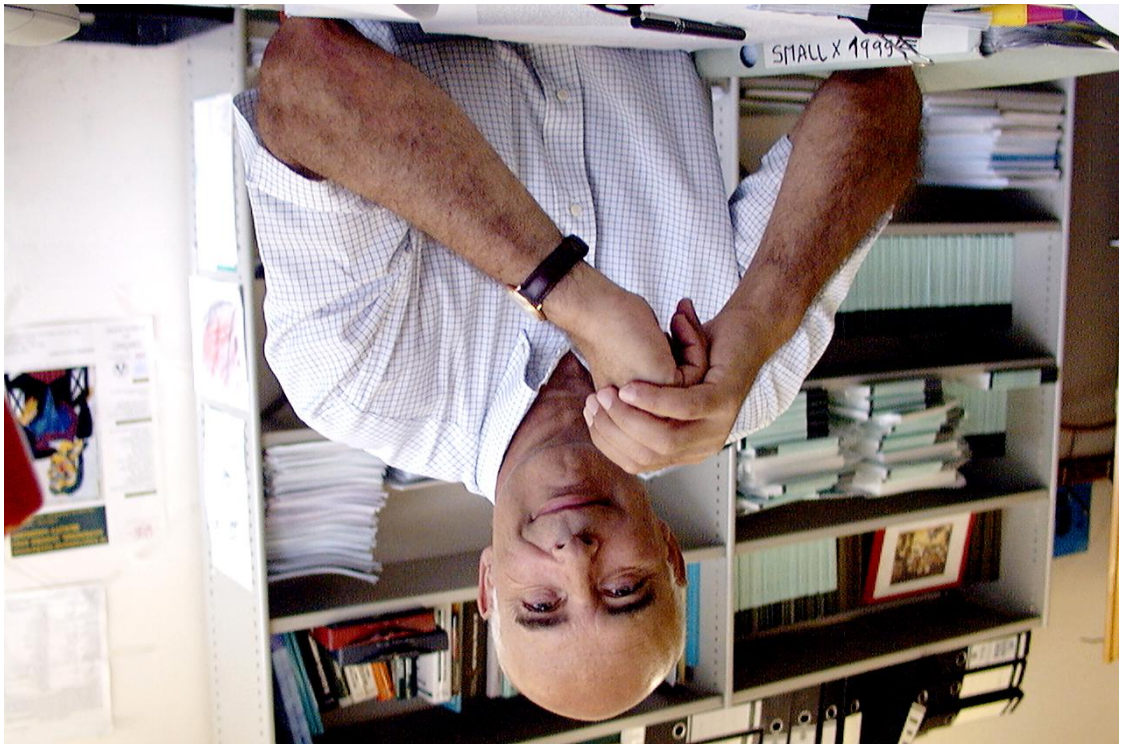
COME CI PUOI CREDERE?! (E. Levin)

IO CREDO IN QUEL CHE VEDO! (G.Altarelli)

Guido Altarelli, 2001

COME CI PUOI CREDERE?! (E. Levin)

IO CREDO IN QUEL CHE VEDO (G.Altarelli)



Guido Altarelli 2001

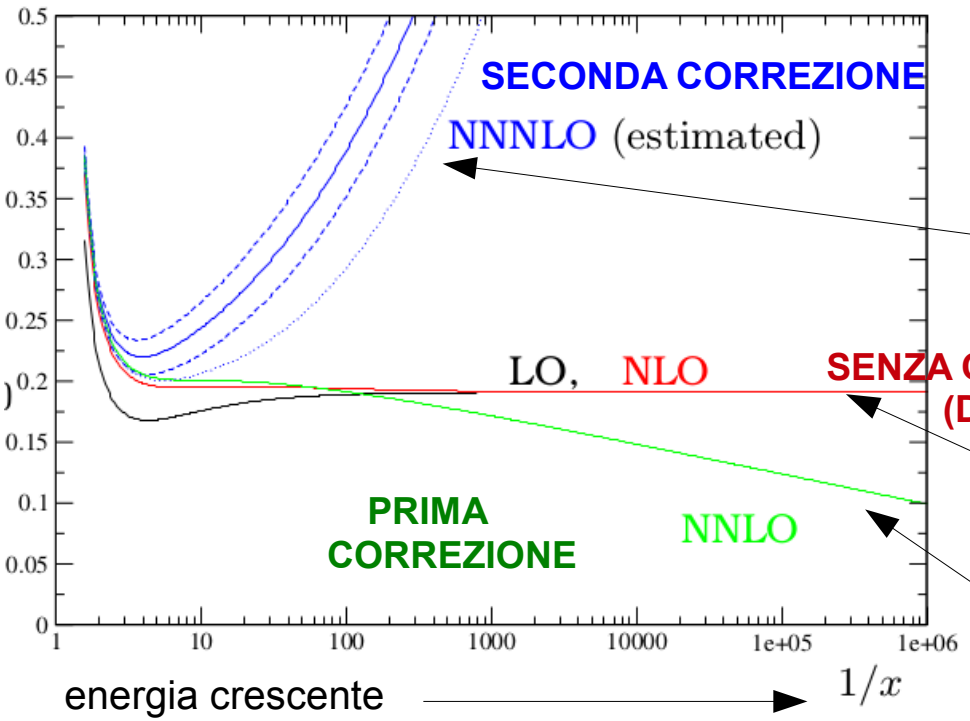
COME CI PUOI CREDERE?! (E. Levin)

IO CREDO IN QUEL CHE VEDO (G.Altarelli)

Guido Altarelli 2001

PERCHÈ NON CREDERE AL “DOUBLE SCALING”?

DISTANZA TRA LE CURVE DI LIVELLO



cresce sempre più

SENZA CORREZIONI (DOUBLE SCALING)

costante (eq. d'onda)

diminuisce (non cresce più)

energia crescente

(prima correzione: Fadin, Lipatov 1998)

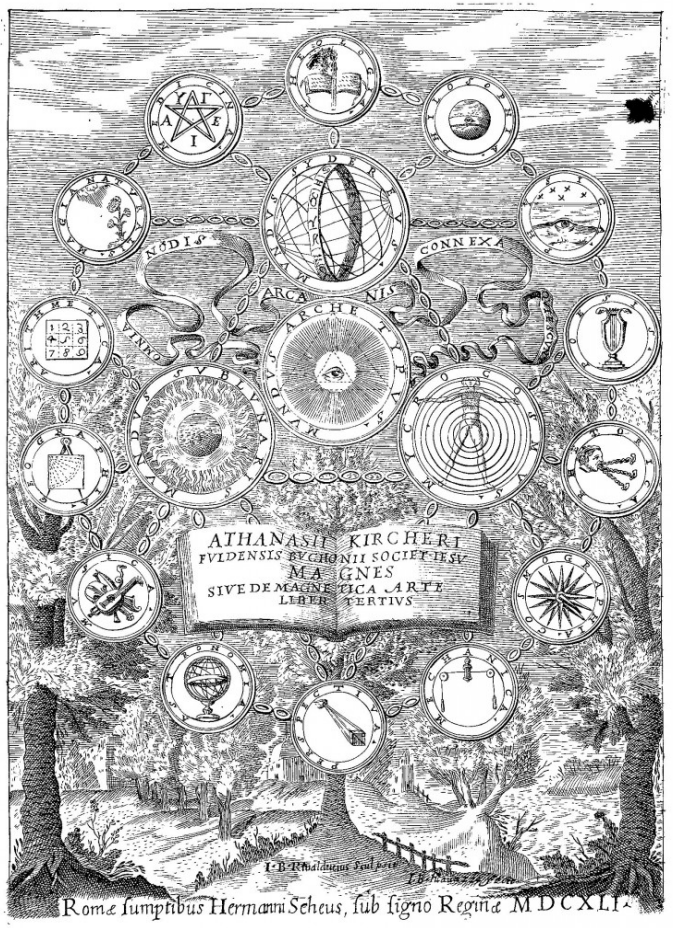
PERCHÈ È “TEORICAMENTE INSTABILE”

UN PROBLEMA DIFFICILE: 1999-2008

(Altarelli, Ball, SF)

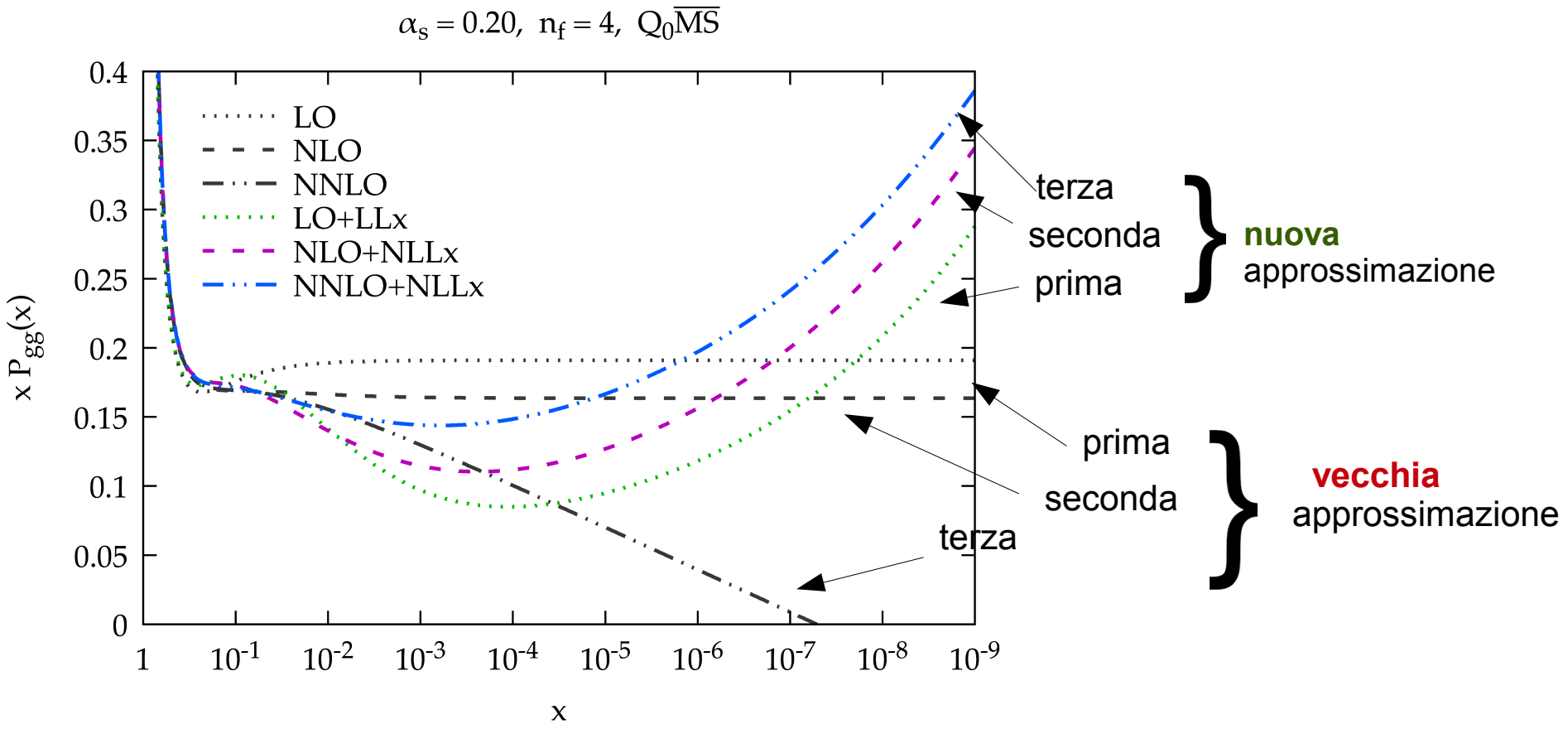
Il santuario della Mentorella

- Dualità energia/risoluzione
- Formalismo operatoriale per l'eq. di Altarelli Parisi in spazio duale
- Somma alla Borel di serie divergenti:
  1+1+1+1+.....=-1/2
- Equazione di Bateman
- Simmetria collineare/anticollineare



Athanasius Kircher,
“De magnetica arte”, Roma 1641

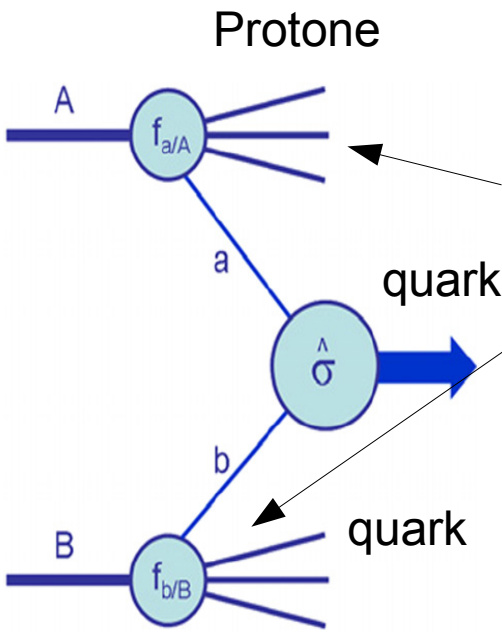
IL RISULTATO FINALE....



PICCOLE DEVIAZIONI DAL DOUBLE SCALING

SI POSSONO VEDERE??

IL PROBLEMA DELLE DISTRIBUZIONI PARTONICHE (PDF)



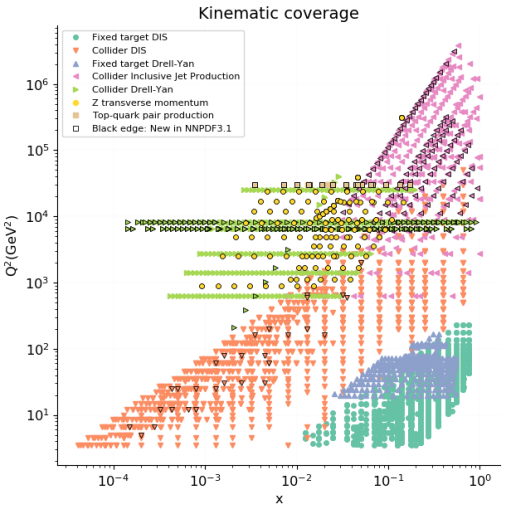
urto fra protoni = densità di quark nel protone **non calcolabile** × urto fra quark calcolabile

QUAL È LA PROBABILITÀ DI ESTRARRE

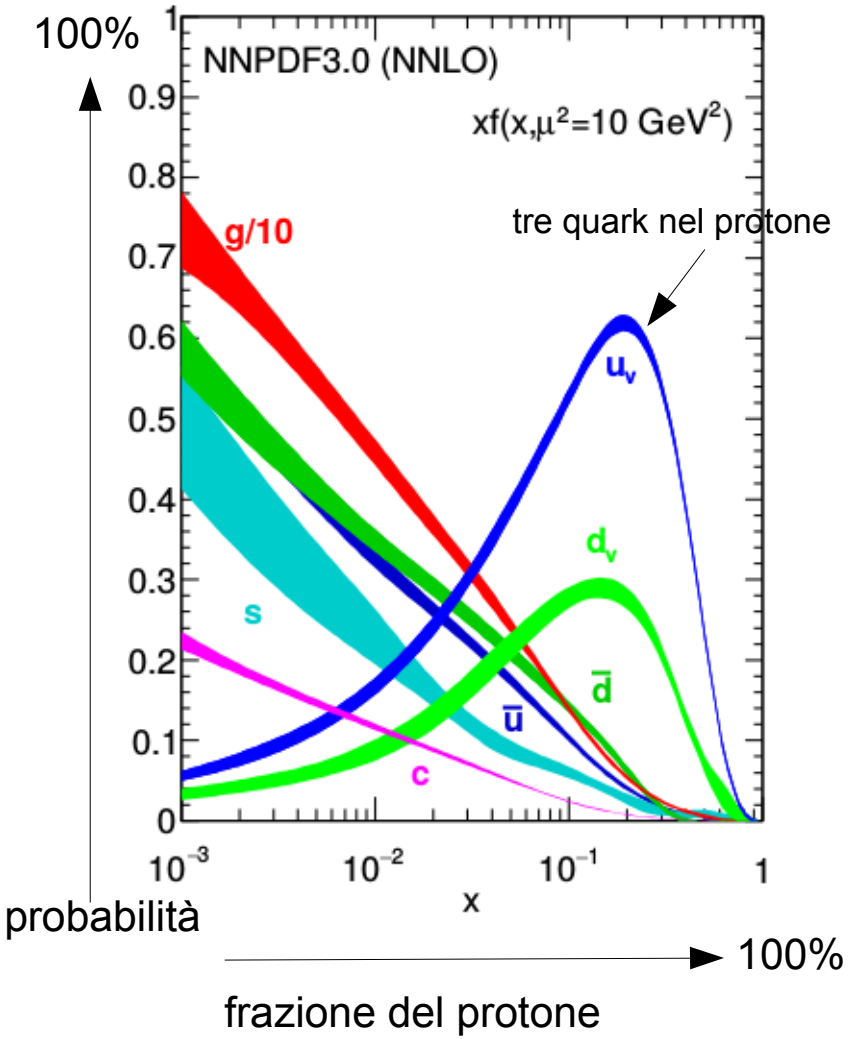
DAL PROTONE UN QUARK O UN GLUONE

CHE NE "PORTA" UNA DATA FRAZIONE?

SI DETERMINANO DAI DATI!



QUAL È IL PROBLEMA?



dal “Particle Data Book”

DETERMINARE:

- **UNA DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DI DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ**
- **UNA (sette, o più) FUNZIONI DA UN INSIEME DISCRETO DI DATI**

soluzione dei poveri:

ci si inventa un modello,

si determinano i parametri

NNPDF

José Ignacio Latorre e S.F., circa 2004

Information | References (18) | Citations (117) | Files | Plots

Neural network parametrization of deep inelastic structure functions

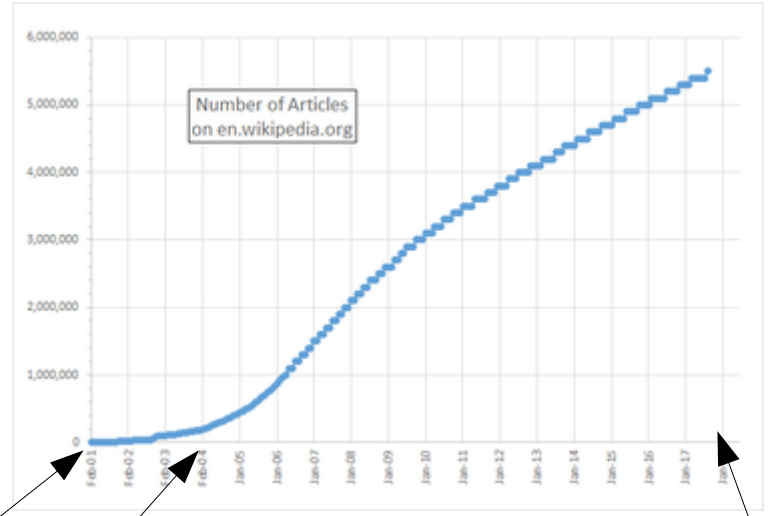
Stefano Forte (INFN, Rome3), Lluis Garrido, Jose I. Latorre (Barcelona U., ECM), Andrea Piccione (INFN, Genoa & Genoa U.)

Apr 2002 - 44 pages

JHEP 0205 (2002) 062
DOI: 10.1088/1126-6708/2002/05/062
GEF-TH-3-02, RM3-TH-02-01
e-Print: hep-ph/0204232 | PDF

Abstract
We construct a parametrization of deep-inelastic structure functions which retains information on experimental errors and correlations, and which does not introduce any theoretical bias while interpolating between existing data points. We generate a Monte Carlo sample of pseudo-data configurations and we train an ensemble of neural networks on them. This effectively provides us with a probability measure in the space of structure functions, within the whole kinematic region where data are

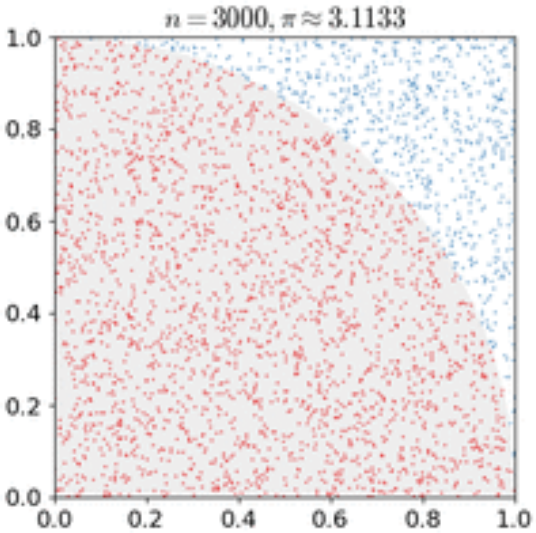
numero di voci wikipedia (inglese)



2001 2004 2018

IL METODO MONTE CARLO

calcolo Monte Carlo di π



Stanislaw Ulam (circa 1955)

DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ

⇕

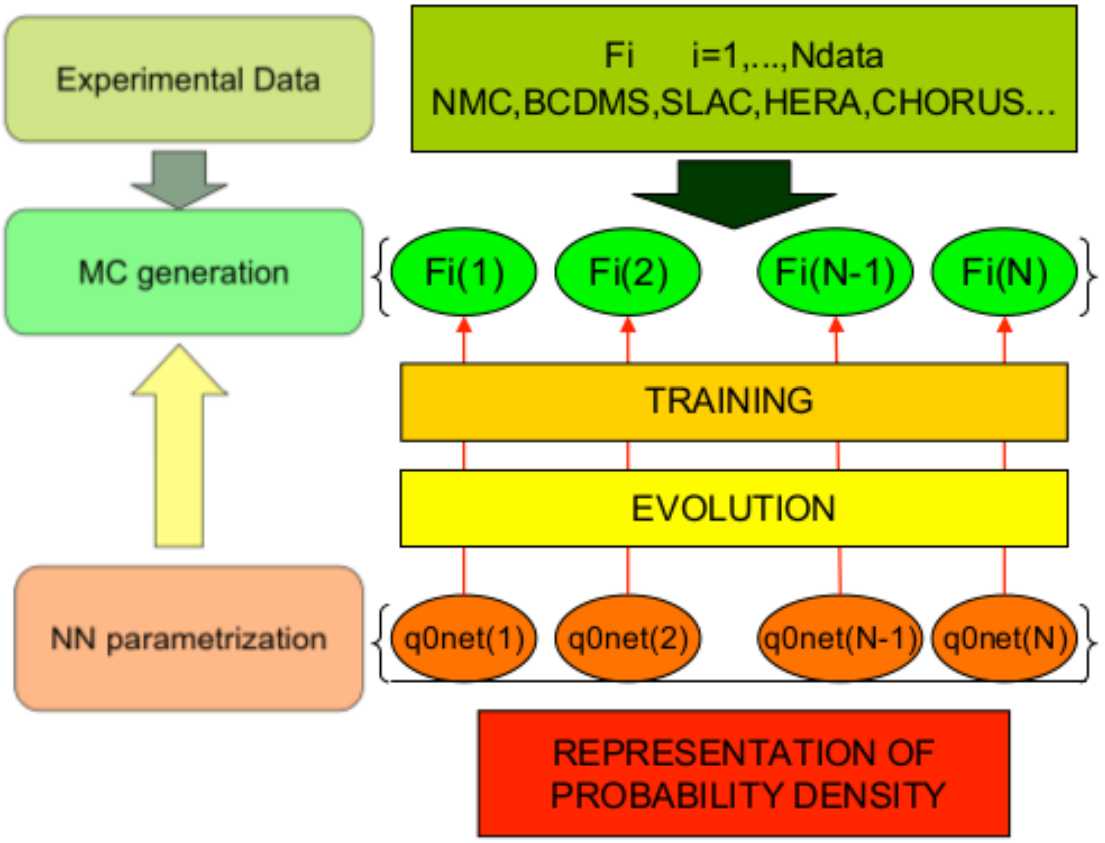
CAMPIONE DI EVENTI

Esempio:

MISURA CON INCERTEZZA ⇔ **INSIEME DI MISURE RIPETUTE**

(repliche)

IL MONTE CARLO NNPDF



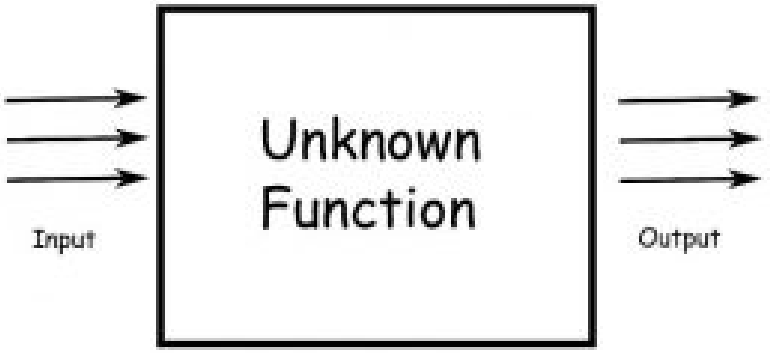
DATI SPERIMENTALI

REPLICHE MONTE CARLO DEI DATI

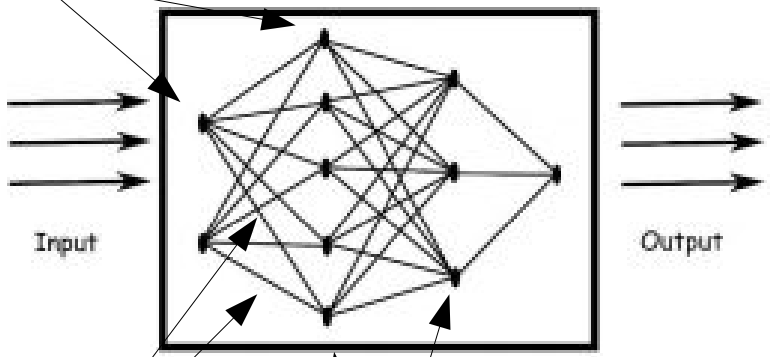
REPLICHE MONTE CARLO DELLE PDF

RETI NEURALI

INTERPOLANTI UNIVERSALI: strati di neuroni connessi da sinapsi



neuroni

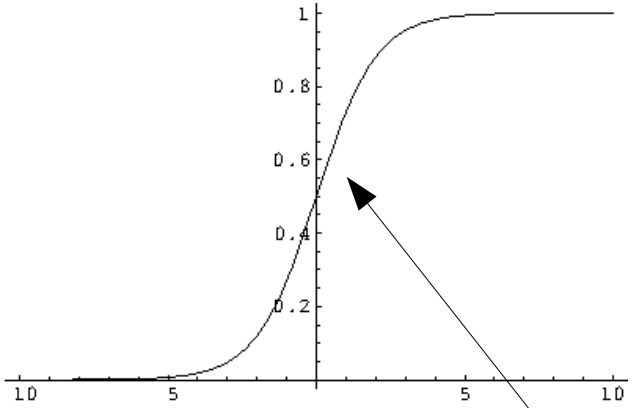


Neural Network as unbiased prior that needs to be trained on patterns

sinapsi

strato
intermedio

funzione di attivazione
una per ogni sinapsi



altezza

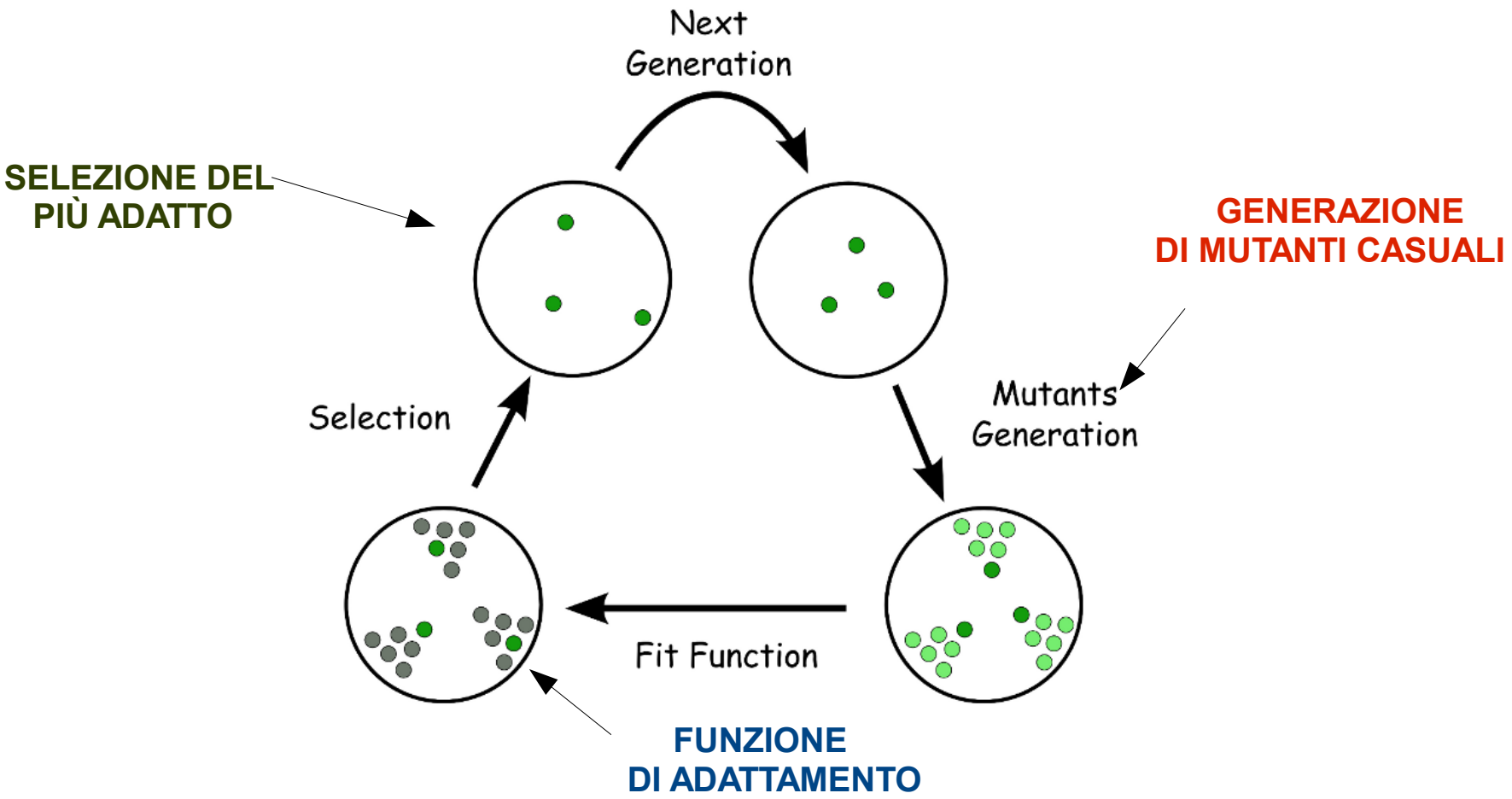
posizione

apprendimento

posizione ed altezza dell'attivazione

ALGORITMI GENETICI

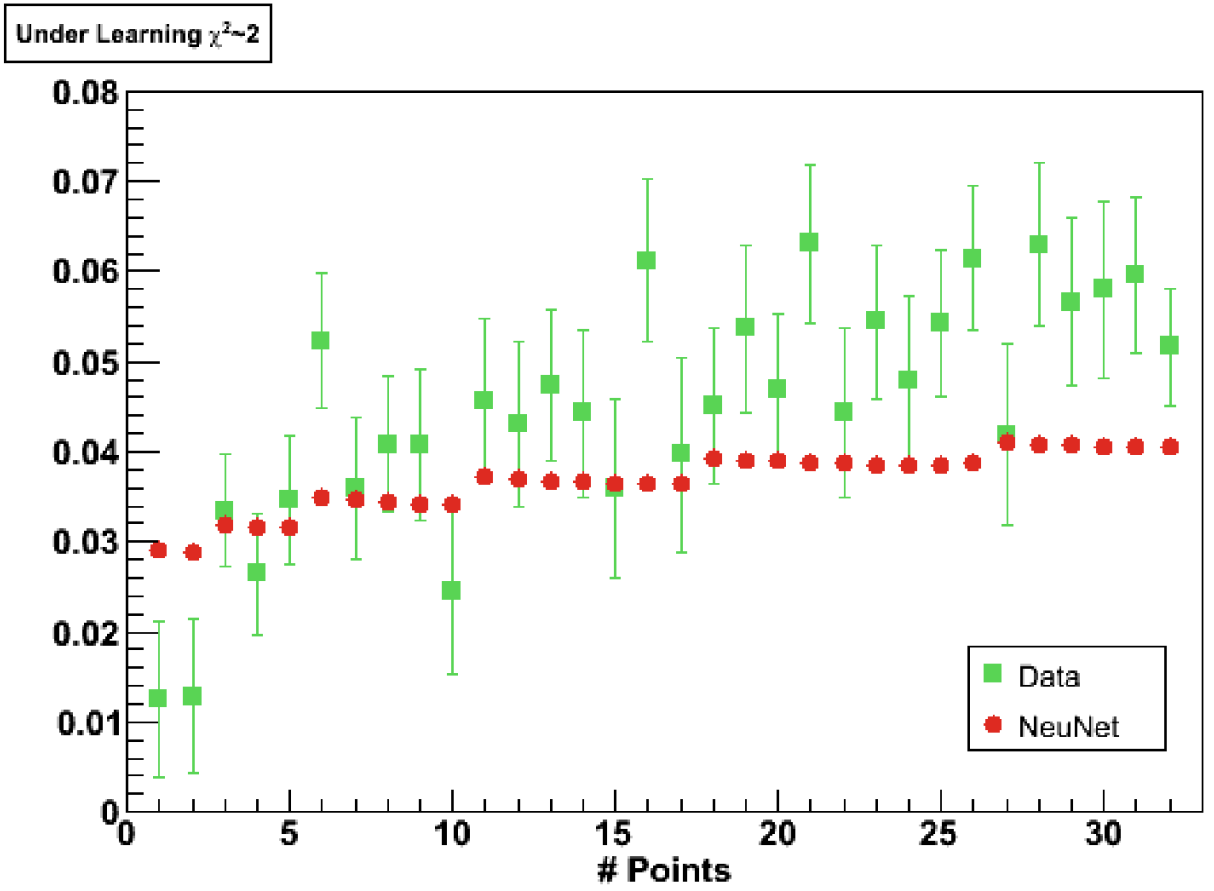
OTTIMIZZAZIONE NON DETERMINISTICA



APPRENDIMENTO NEURALE

la complessità aumenta gradualmente

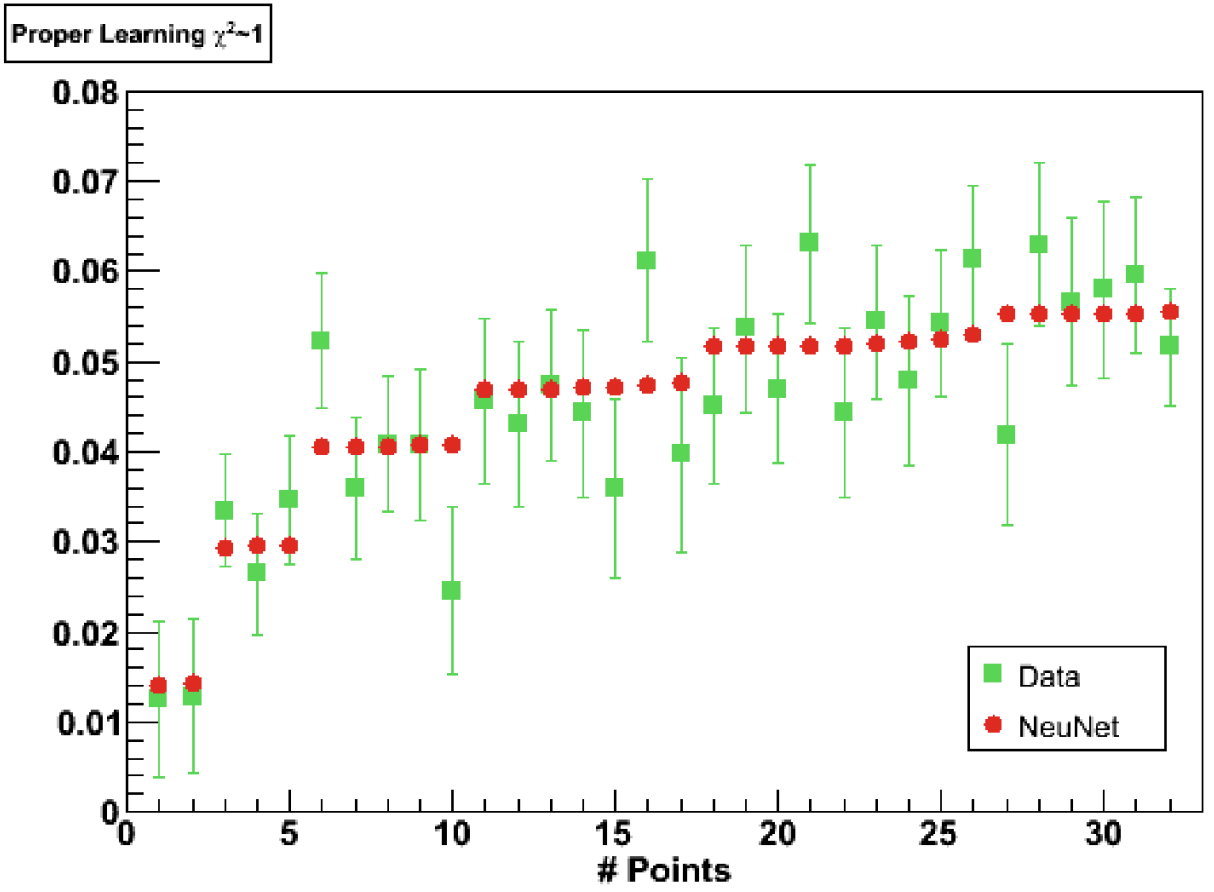
SOTTO-APPRENDIMENTO



APPRENDIMENTO NEURALE

la complessità aumenta gradualmente

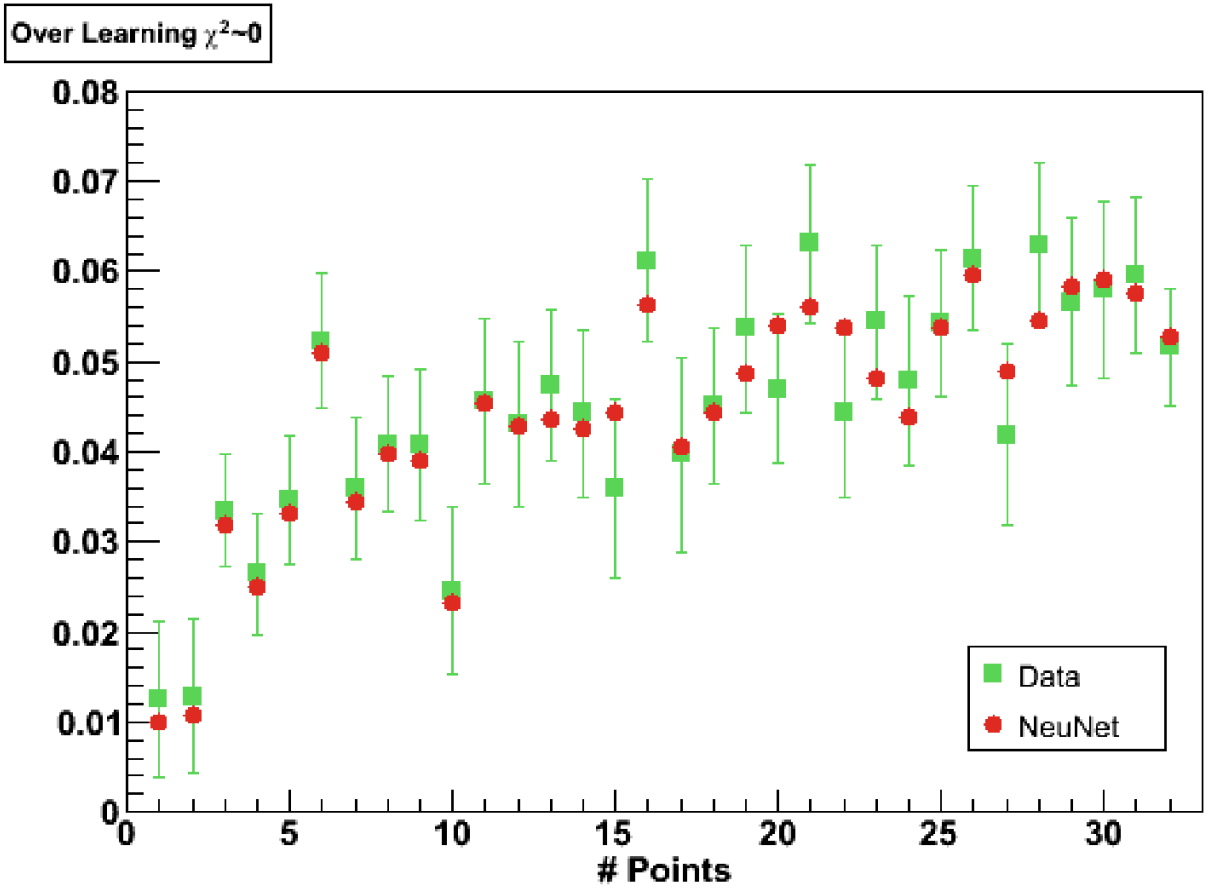
APPRENDIMENTO IDEALE



APPRENDIMENTO NEURALE

la complessità aumenta gradualmente

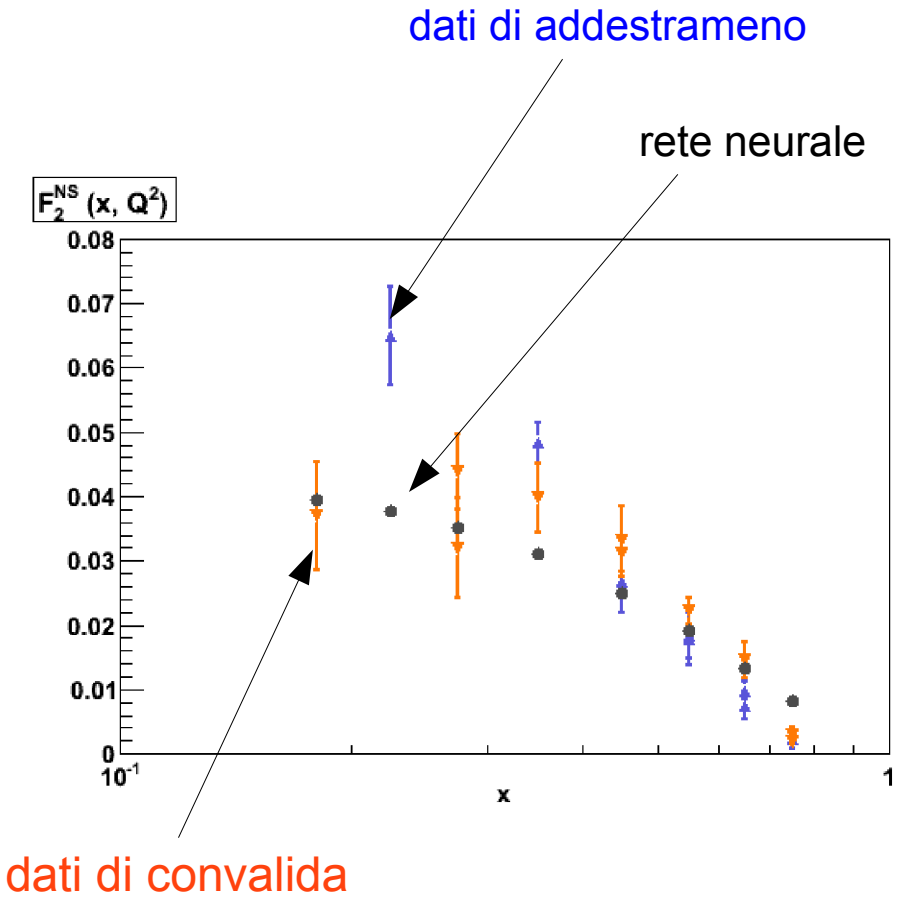
SOVRA-APPRENDIMENTO

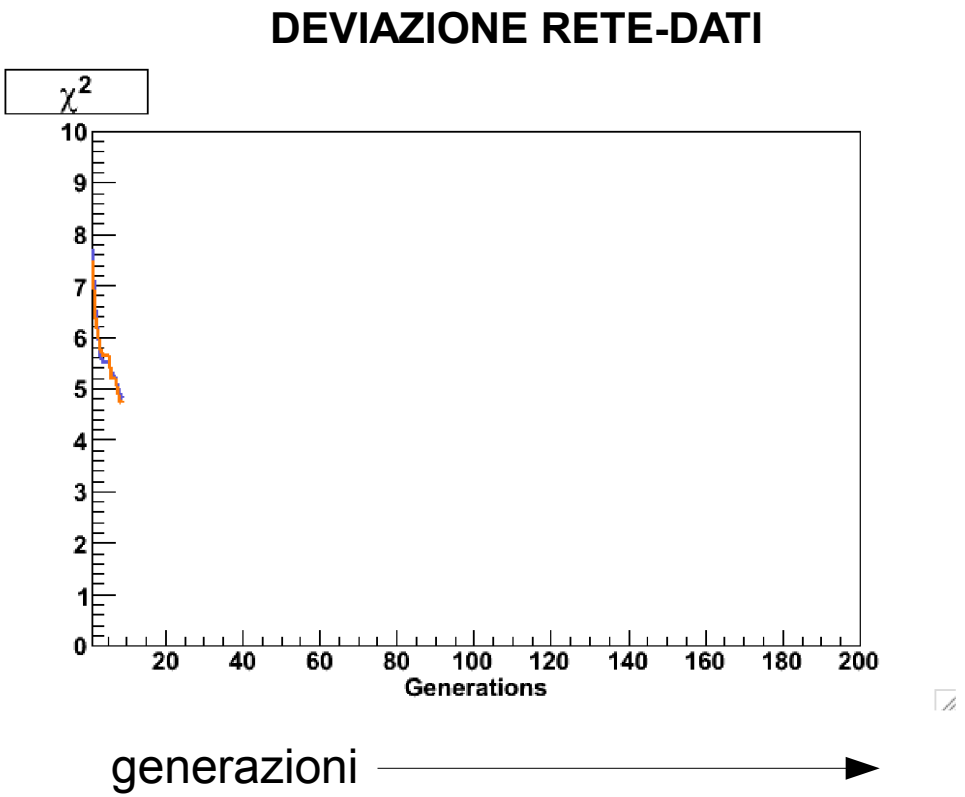


CONVALIDA INCROCIATA

(cross-validation)

dati divisi a caso in due insiemi: addestramento e convalida





CONVALIDA INCROCIATA

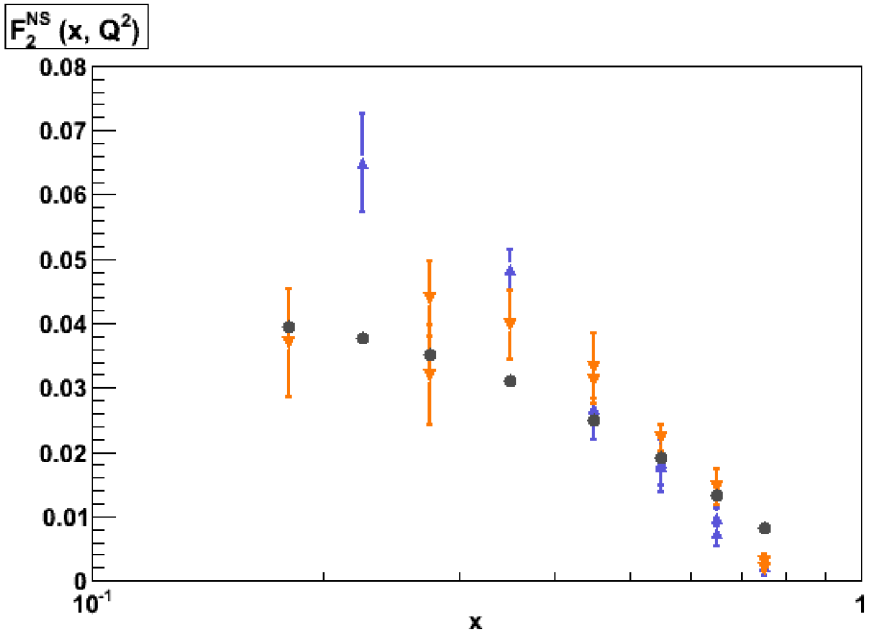
(cross-validation)

dati divisi a caso in due insiemi: addestramento e convalida

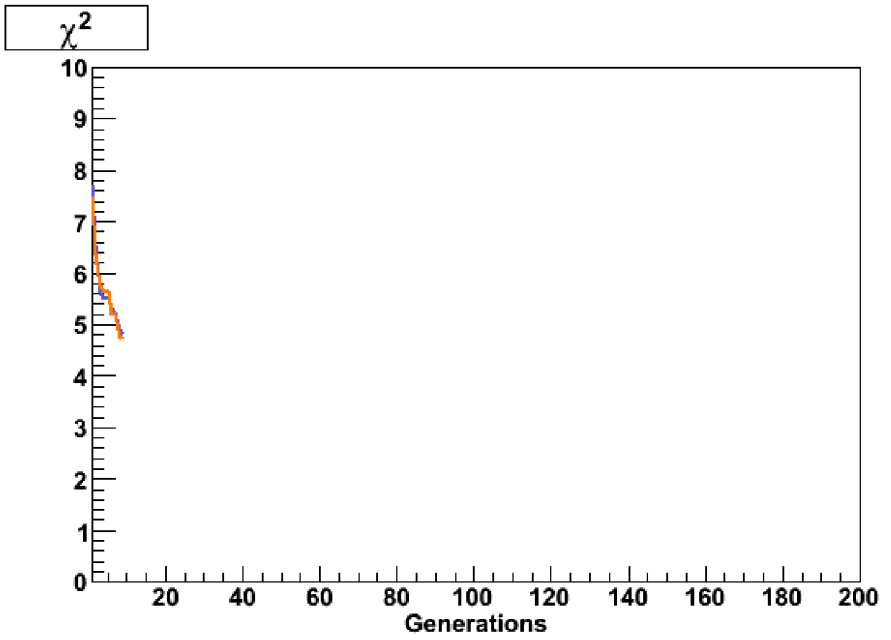
VAI!

SOTTO-APPRENDIMENTO

DATI



DEVIAZIONE RETE-DATI



CONVALIDA INCROCIATA

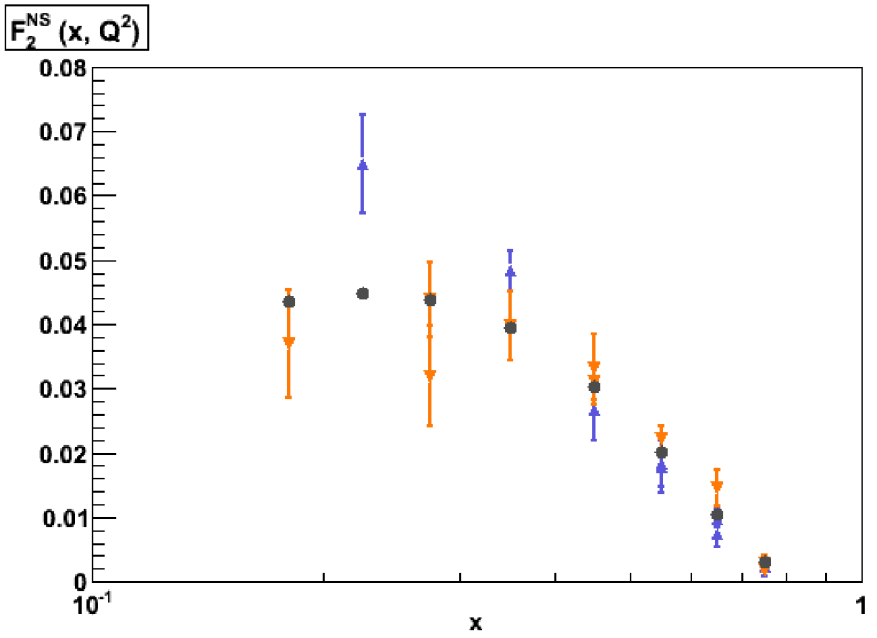
(cross-validation)

dati divisi a caso in due insiemi: addestramento e convalida

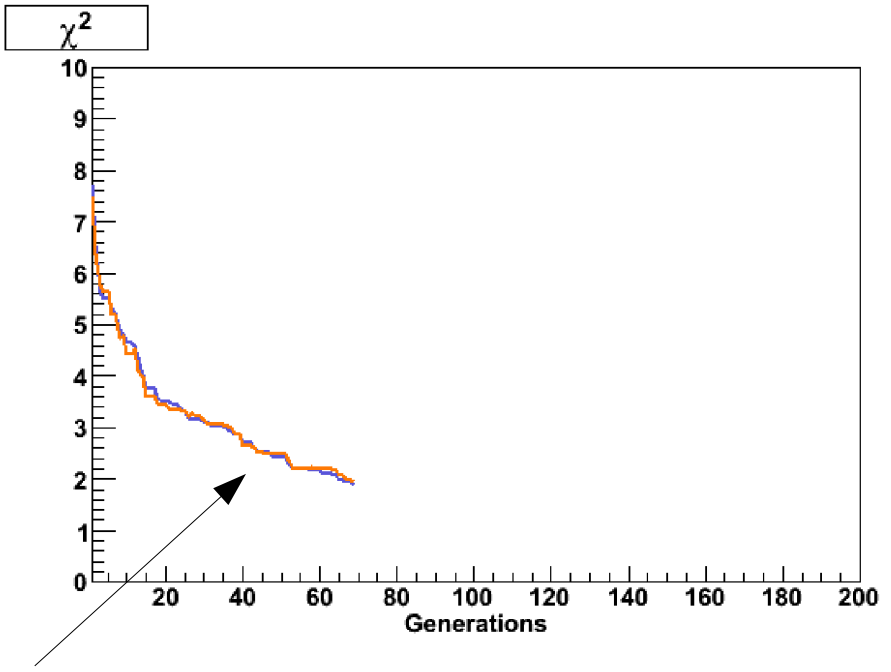
FERMO!

APPRENDIMENTO IDEALE

DATI



DEVIAZIONE RETE-DATI



addestramento e convalida migliorano

CONVALIDA INCROCIATA

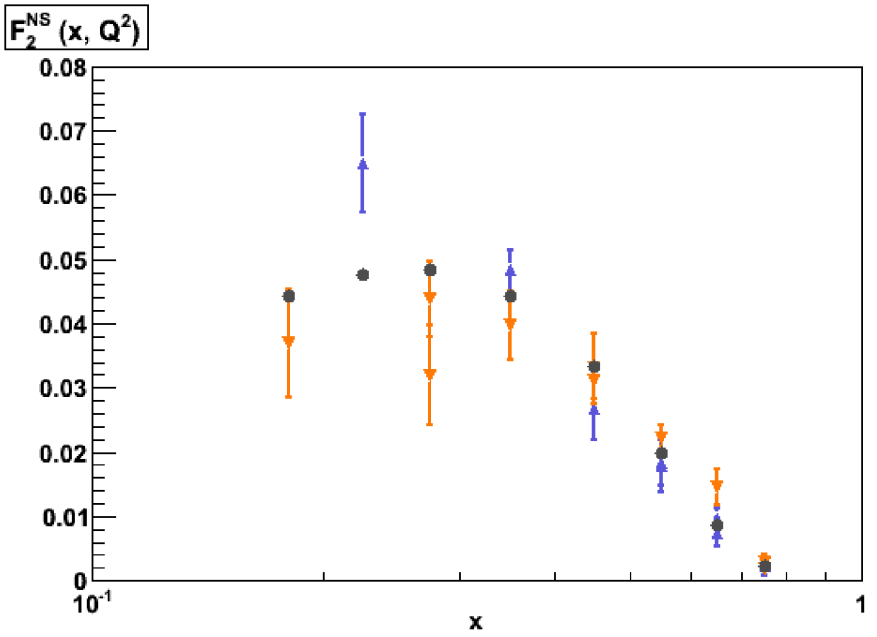
(cross-validation)

dati divisi a caso in due insiemi: addestramento e convalida

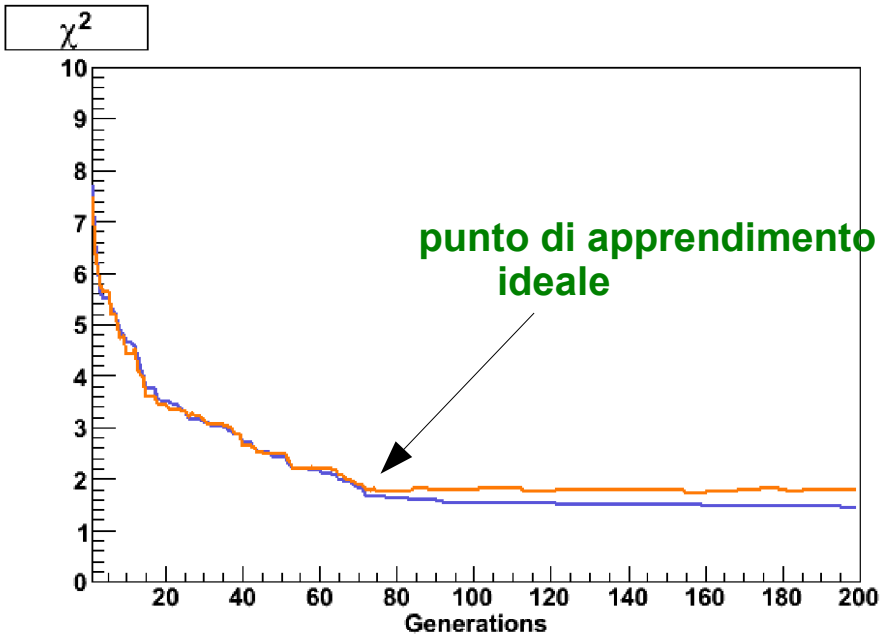
TROPPO TARDI!

SOVRA-APPRENDIMENTO

DATI



DEVIAZIONE RETE-DATI

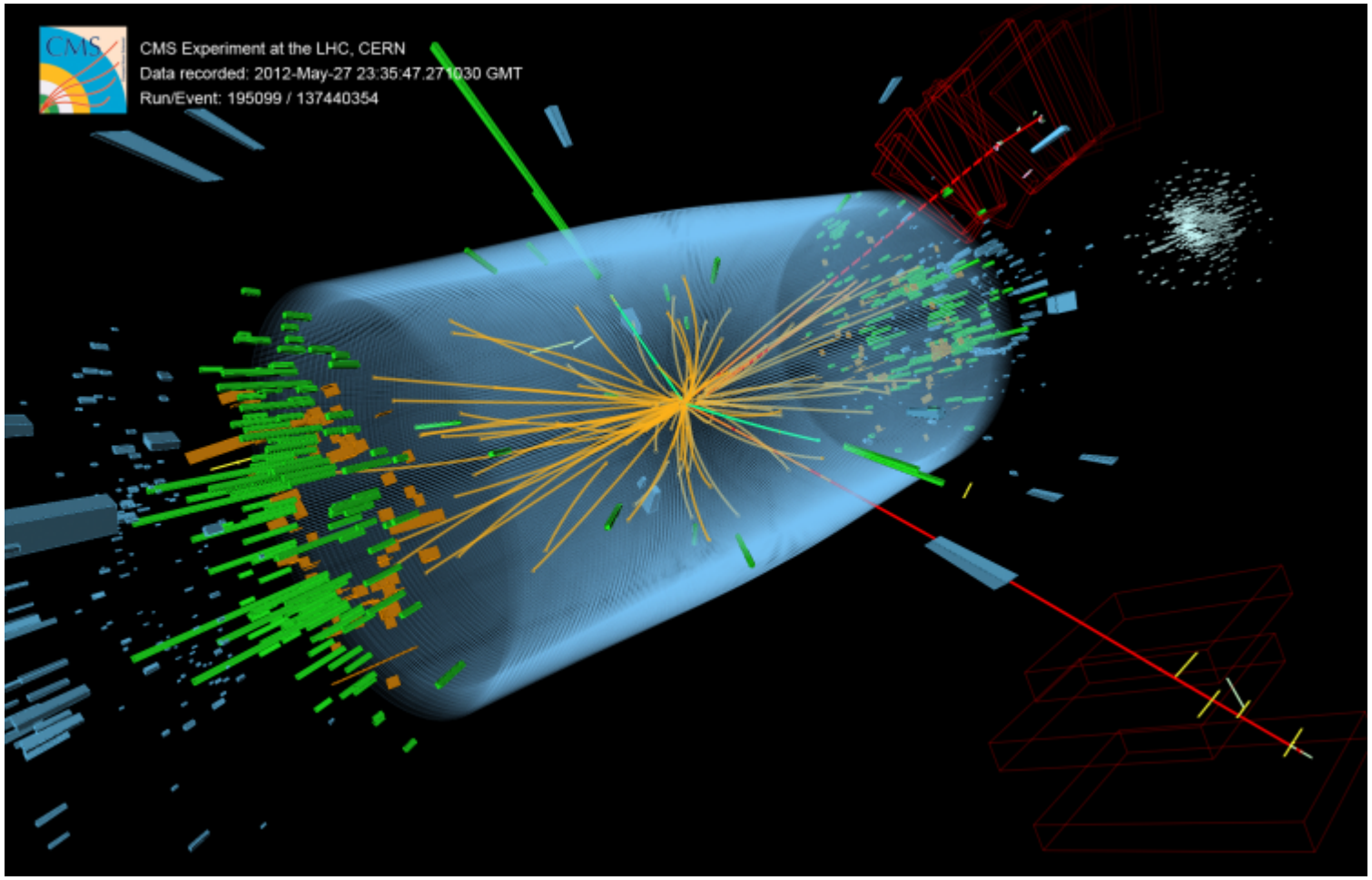


addestramento migliora, convalida peggiora

UNO STRUMENTO STANDARD

SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS (2013)

(NNPDF2.1)



...E LE DEVIAZIONI DAL DOUBLE SCALING?

Information | References (212) | Citations (7) | Files | Plots

Parton distributions with small-x resummation: evidence for BFKL dynamics in HERA data

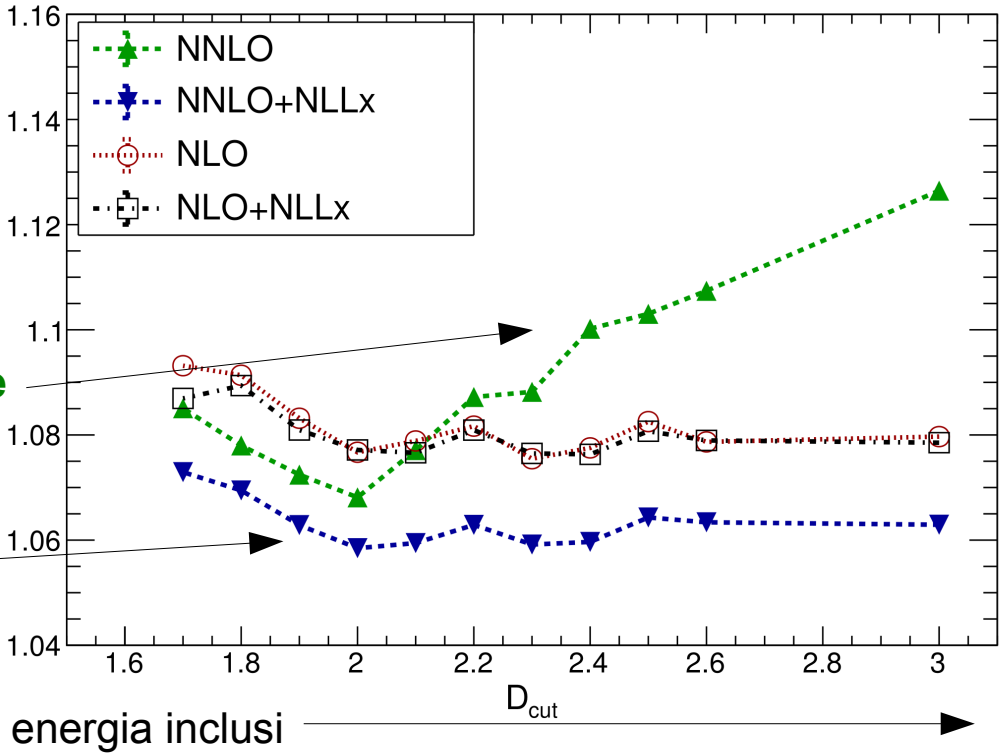
Richard D. Ball (U. Edinburgh, Higgs Ctr. Theor. Phys.), Valerio Bertone (NIKHEF, Amsterdam & Vrije U., Amsterdam), Marco Bonvini (Rome U. & INFN, Rome), Simone Marzani (Genoa U. & INFN, Genoa), Juan Rojo (NIKHEF, Amsterdam & Vrije U., Amsterdam), Luca Rottoli (Oxford U., Theor. Phys.)

Oct 16, 2017 - 65 pages

EDINBURGH-2017-15, NIKHEF-2017-027, OUTP-17-12P
e-Print: arXiv:1710.05935 [hep-ph] | PDF

Abstract (arXiv)
We present a determination of the parton distribution functions of the proton in which NLO and NNLO fixed-order calculations are supplemented by NLLx small-x resummation. Deep inelastic structure functions are computed consistently at NLO+NLLx or NNLO+NLLx, while for hadronic processes small-x resummation is included only in the PDF evolution, with kinematic cuts introduced to ensure the fitted data lie in a region where the fixed-order calculation of the hard cross-sections is reliable. In all other respects, the fits use the same methodology and are based on the same global dataset as the recent NNPDF3.1 analysis. We demonstrate that the inclusion of small-x resummation leads to a quantitative improvement in the perturbative description of the HERA inclusive and charm-production reduced cross-

ACCORDO TEORIA-DATI



CHIARAMENTE VISIBILI!

teoria instabile (senza ABF)

con teoria ABF

dati di alta energia inclusi

SEMPRE PIÙ STANDARD

2017 TOPCITES

20. 491 core citations in 2017
Particle Creation by Black Holes
S.W. Hawking (Cambridge U.). Aug 1975. 22 pp.
Published in **Commun.Math.Phys. 43 (1975) 199-220,** Erratum**: Commun.Math.Phys. 46 (1976) 206**
DOI: 10.1007/BF02345020
References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote
AMS MathSciNet; Project Euclid

21. 490 core citations in 2017
Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae
Supernova Cosmology Project Collaboration (S. Perlmutter (UC, Berkeley, CfPA) *et al.*). Dec 1998. 33 pp.
Published in **Astrophys.J. 517 (1999) 565-586**
LBNL-41801, LBL-41801
DOI: 10.1086/307221
e-Print: **astro-ph/9812133** | **PDF**
References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote
ADS Abstract Service; OSTI Information Bridge Server

22. 487 core citations in 2017
Parton distributions for the LHC Run II
NNPDF Collaboration (Richard D. Ball (U. Edinburgh, Higgs Ctr. Theor. Phys. & CERN) *et al.*). Oct 31, 2014. 138 pp.
Published in **JHEP 1504 (2015) 040**
EDINBURGH-2014-15, IFUM-1034-FT, CERN-PH-TH-2013-253, OUTP-14-11P, CAVENDISH-HEP-14-11
DOI: 10.1007/JHEP04(2015)040
e-Print: arXiv:1410.8849 **[hep-ph]** | PDF
References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote
CERN Document Server; ADS Abstract Service; Link to Article from SCOAP3

NNPDF3.0

23. 462 core citations in 2017
Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure
LUX Collaboration (D.S. Akerib (Case Western Reserve U. & KIPAC, Menlo Park & SLAC) *et al.*). Aug 26, 2016. 8 pp.
Published in **Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.2, 021303**
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.021303
e-Print: **arXiv:1608.07648** **[astro-ph.CO]** | **PDF**
References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote
ADS Abstract Service; Link to Science News article

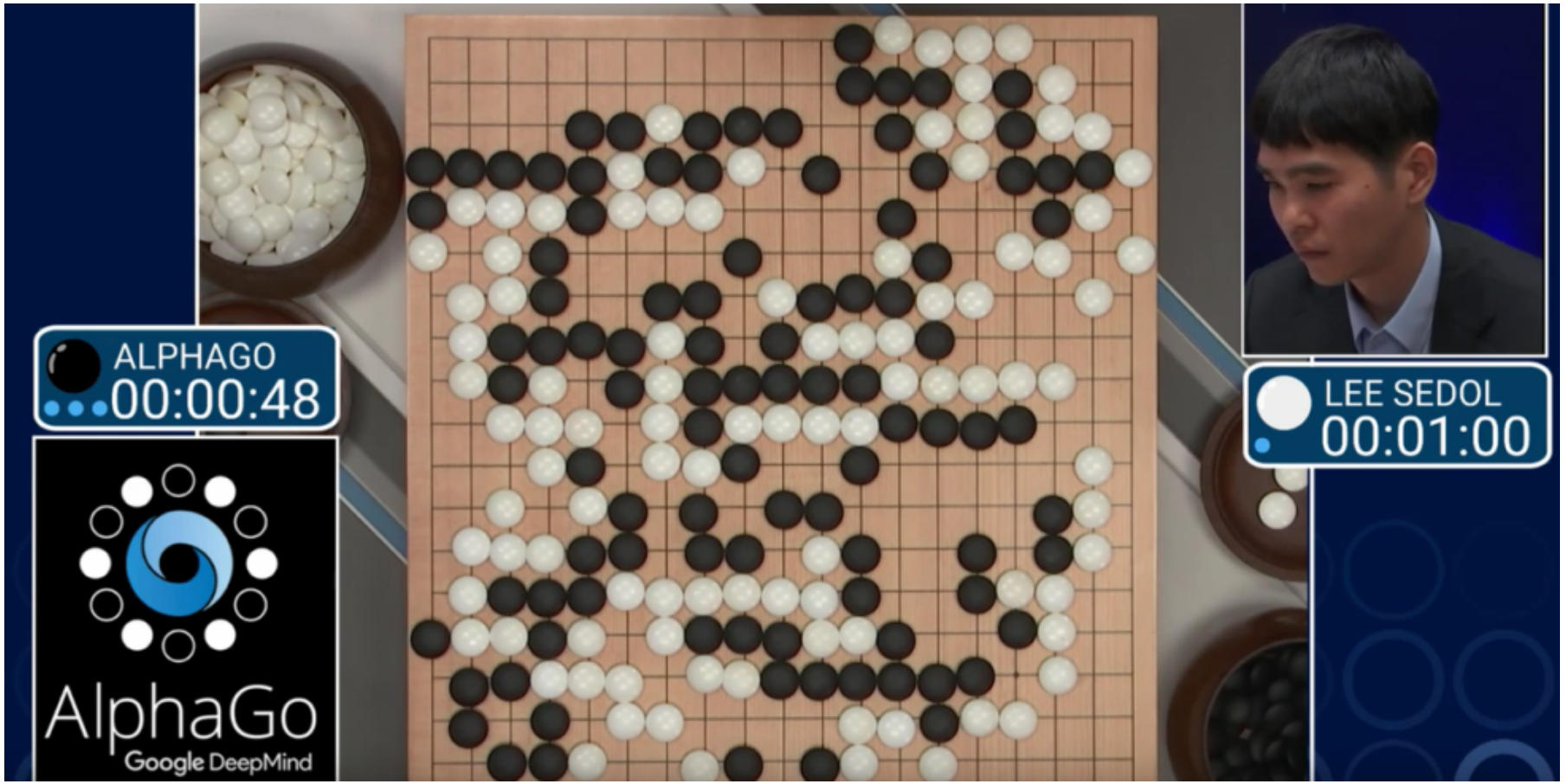
24. 434 core citations in 2017
The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems
Alan H. Guth (SLAC). Jul 1980. 32 pp.
Published in **Phys.Rev. D23 (1981) 347-356**
SLAC-PUB-2576
DOI: 10.1103/PhysRevD.23.347
References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote

LA COLLABORAZIONE

18 membri, 12 istituti (CH, E, I, NL, UK)

NNPDF: meeting di collaborazione, Edimburgo, dicembre 2017

TROPPO UMANO?



FORSE!