

Συμμετρία αναστροφής του χρόνου T

- Με την αναστροφή του χρόνου T έχουμε $\hat{t} \Rightarrow -\hat{t}$, $\vec{p} \Rightarrow -\vec{p}$, $\vec{J} \Rightarrow -\vec{J}$. Γι' αυτό το λόγο ο T δεν έχει ιδιοτιμές όπως οι C και P. Παρόλα αυτά σε συνδυασμό με την P, PT σημαίνει ότι το στοιχείο του πίνακα (matrix element) για την αντίδραση $a+b \rightarrow c+d$ πρέπει να είναι το ίδιο με την αντίδραση $c+d \rightarrow a+b$. Αυτή η ιδιότητα είναι γνωστή σαν "αρχή λεπτομερούς ισοζυγίου" (detailed balance).
- ΠΡΟΣΟΧΗ!** αυτό δεν σημαίνει ότι οι ενεργοί διατομές είναι οι ίδιες επειδή πρέπει να υπολογίσουμε και τον χώρος των φάσεων. Είδαμε ήδη μια εφαρμογή του λεπτομερούς ισοζυγίου στον καθορισμό του spin του πιονίου.

ποσότητα	T	P	
r	r	-r	
p	-p	-p	πολικό διάνυσμα
s (spin)	-s	s	αξονικό διάνυσμα $r \times p$
E	E	-E	$E = -\partial V / \partial r$
B	-B	B	όπως το s

- Αν και περιμένουμε ότι η T παραβιάζεται από τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις δεν έχουμε ακόμη παρατηρήσει παραβίαση της T.

Γ. Τσιπολίτης

Το Θεώρημα CPT

- Ο συνδυασμός **CPT** διατηρείται πάντα σε κάθε τοπική κβαντική θεωρία πεδίου.
- Η παραβίαση της CPT είναι ισοδύναμη με παραβίαση του αμετάβλητου των μετασχηματισμών Lorentz.
- Η συμμετρία CPT απαιτεί ότι τα σωματίδια και τα αντισωματίδια πρέπει να έχουν ταυτόσημη μάζα, μέσο χρόνο ζωής, φορτίο και μαγνητική διπολική ροπή.
- Το καλύτερο πειραματικό τέστ, μέχρις στιγμής, για τη CPT είναι σε μια ακρίβεια 10^{-18} .

Μεσόνια

Meson Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.

† Indicates that the value of J_{green} is preferred, but needs confirmation.

LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)		STRANGE (S = ±1, C = B = 0)		BOTTOM (B = ±1)			
$\bar{f}(E^*)$	$f(E^*)$	$\bar{f}(E^*)$	$f(E^*)$	$\bar{f}(E^*)$	$f(E^*)$		
• π^+	$1^+(0^-)$	• $\pi_0(1670)$	$1^-(2^-)$	• K^*	$1/2(0^-)$		
• π^0	$1^-(0^-)$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	• K^0	$1/2(0^-)$		
• η	$0^+(0^-)$	• $\rho_0(1690)$	$1^+(3^-)$	• K_S^0	$1/2(0^-)$		
• $\eta_1(600)$	$0^+(0^-)$	• $\rho_1(1700)$	$1^+(1^-)$	• K_L^0	$1/2(0^-)$		
• $\rho_1(770)$	$1^+(1^-)$	• $\omega_0(1700)$	$1^-(2^+)$	• K_{1000}^0	$1/2(0^+)$		
• $\omega(782)$	$0^-(1^-)$	• $\psi(1710)$	$0^+(0^+)$	• K_{1092}^0	$1/2(1^-)$		
• $\eta'(946)$	$0^+(0^-)$	• $\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	• K_{1270}^0	$1/2(1^+)$		
• $\delta_1(985)$	$0^+(0^-)$	• $\pi^0(1800)$	$1^-(0^-)$	• K_{1400}^0	$1/2(1^+)$		
• $\omega_0(3800)$	$1^-(0^-)$	• $\phi_0(1810)$	$0^+(2^+)$	• K_{1410}^0	$1/2(1^-)$		
• $\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	• $\phi_1(1850)$	$0^-(3^-)$	• K_{1430}^0	$1/2(0^+)$		
• $\Lambda_1(1170)$	$0^+(1^-)$	• $\eta_0(1870)$	$0^+(2^-)$	• K_{1430}^0	$1/2(2^+)$		
• $\Delta_1(1285)$	$1^+(1^-)$	• $\rho(1960)$	$1^+(1^-)$	• K_{1460}^0	$1/2(0^-)$		
• $\Lambda_2(1260)$	$1^-(1^+)$	• $\delta_2(1910)$	$0^+(2^+)$	• K_{1580}^0	$1/2(2^-)$		
• $\delta_2(1270)$	$0^+(2^+)$	• $\epsilon_0(1960)$	$0^+(2^+)$	• K_{1630}^0	$1/2(?)$		
• $\Lambda_2(1285)$	$0^+(1^+)$	• $\rho_0(1990)$	$1^+(3^-)$	• K_{1650}^0	$1/2(1^+)$		
• $\eta(1295)$	$0^+(0^-)$	• $\delta_2(2010)$	$0^+(2^+)$	• K_{1680}^0	$1/2(1^-)$		
• $\pi_1(1380)$	$1^-(0^-)$	• $\delta_2(2020)$	$0^+(0^+)$	• K_{1770}^0	$1/2(2^-)$		
• $\omega_1(1320)$	$1^-(2^+)$	• $\epsilon_0(2040)$	$1^-(4^+)$	• K_{1780}^0	$1/2(3^-)$		
• $\delta_1(1370)$	$0^+(0^-)$	• $\delta_0(2050)$	$0^+(4^+)$	• K_{1820}^0	$1/2(2^-)$		
• $\Lambda_1(1380)$	$1^-(1^-)$	• $\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	• K_{1830}^0	$1/2(0^-)$		
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^-)$	• $\delta_0(2180)$	$0^+(0^+)$	• K_{1950}^0	$1/2(0^+)$		
• $\eta(1405)$	$0^+(0^-)$	• $\delta_2(2150)$	$0^+(2^+)$	• K_{1980}^0	$1/2(2^+)$		
• $\omega_1(1420)$	$0^+(1^+)$	• $\rho_2(2150)$	$1^+(1^-)$	• K_{2045}^0	$1/2(4^+)$		
• $\omega_1(1420)$	$0^-(1^-)$	• $\delta_2(2200)$	$0^+(0^+)$	• $K_2(2250)$	$1/2(2^-)$		
• $\delta_2(1430)$	$0^+(2^+)$	• $\delta_2(2220)$	$0^+(2^+)$	• $K_3(2320)$	$1/2(3^+)$		
• $\omega_1(1450)$	$1^-(0^-)$	• $\epsilon_0(2240)$	$0^+(4^+)$	• $K_4(2380)$	$1/2(5^-)$		
• $\rho_1(1450)$	$1^-(1^-)$	• $\eta(2225)$	$0^+(0^-)$	• $K_4(2500)$	$1/2(4^-)$		
• $\eta(1475)$	$0^+(0^-)$	• $\rho_0(2250)$	$1^+(3^-)$	• $K(3100)$	$1/2(?)$		
• $\delta_1(1500)$	$0^+(0^+)$	• $\delta_2(2300)$	$0^+(2^+)$	CHARMED (C = ±1)			
• $\delta_1(1510)$	$0^+(1^+)$	• $\delta_2(2300)$	$0^+(4^+)$	• D^0	$1/2(0^-)$		
• $\rho_1(1525)$	$0^+(2^+)$	• $\delta_2(2340)$	$0^+(2^+)$	• D^0	$1/2(0^-)$		
• $\delta_1(1565)$	$0^+(2^+)$	• $\rho_0(2350)$	$1^+(5^-)$	• D^0	$1/2(1^-)$		
• $\Lambda_1(1595)$	$0^-(1^-)$	• $\omega_0(2450)$	$1^-(6^+)$	• $D^0(2010)^0$	$1/2(1^-)$		
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^-)$	• $\delta_0(2510)$	$0^+(6^+)$	• $D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$		
• $\pi_1(1640)$	$1^-(1^+)$	OTHER LIGHT		• $D_1(2420)^0$	$1/2(2^+)$		
• $\delta_1(1640)$	$0^+(2^+)$	Further States		• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$		
• $\eta_1(1645)$	$0^+(2^-)$			• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$		
• $\omega(1650)$	$0^-(1^-)$			• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$		
• $\omega_1(1670)$	$0^-(3^-)$			• $D^*(2645)^0$	$1/2(3^+)$		
CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)							
• D_s^0	$0(0^-)$			• $\eta_0(15)$	$0^+(0^-)$		
• D_s^0	$0(?)$			• $T(1.5)$	$0^-(1^-)$		
• $D_s^0(2317)^0$	$0(0^+)$			• $\chi_0(1P)$	$0^+(0^+)$		
• $\Delta_{2J}(2460)^0$	$0(1^+)$			• $\chi_0(1P)$	$0^+(1^+)$		
• $\Omega_{21}(2536)^0$	$0(1^+)$			• $T(1.5)$	$0^-(1^-)$		
• $\Omega_{22}(2573)^0$	$0(?)$			• $T(4.5)$	$0^-(1^-)$		
NON- $\psi\bar{\psi}$ CANDIDATES							
NON- $\eta\bar{\eta}$ CANDIDATES							

Γ. Τσιπολίτης

Bapuóvia

Baryon Summary Table

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the states of baryons in the Review. Only the baryons with 3-star or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established as baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For Λ , Δ , and Ξ resonances, the angular momentum is indicated by the symbol $L_{2(2J)}$, where L is the orbital angular momentum (S, P, D, \dots), J is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the symbol is L_{1J} .

**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

*** Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.

^{**} Evidence of existence is only fair.

* Evidence of existence is poor.

Γ. Τσιπολίτης

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1 IA																18 VIIA	
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Beryllium 9.012182															2 He Helium 4.002602	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182																
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9	10	11	12	IB	III	IV	V	VI	VII
19 K Potassium. 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge German. 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.95	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybd. 95.94	43 Tc Technet. 97.907215	44 Ru Ruthen. 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8662	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Antimony 116.710	51 Sb Tellurium 121.760	52 Te Iodine 127.60	53 I Xenon 131.29	
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanides 138.9055	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.06655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.08038	84 Po Polonium (208.082415)	85 At Astatine (209.987131)	86 Rn Radon (222.017570)
87 Fr Francium (223.010731)	88 Ra Radium (226.025402)	89-103 Actinides (261.1080)	104 Rf Rutherford (262.1144)	105 Db Dubnium (263.1186)	106 Sg Seaborg. (262.1231)	107 Bh Bohrium (265.1306)	108 Hs Hassium (266.1378)	109 Mt Meitner. (269.271)	110 Ds Darmstadt. (272)	111							

Lanthanide series	57 La Lanthan. 138.9055	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodym. 140.90765	60 Nd Neodym. 144.24	61 Pm (144.912745)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolin. 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dyspros. 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
-------------------	-------------------------------	----------------------------	----------------------------------	----------------------------	-----------------------	-----------------------------	------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------

Actinide series	89 Ac Actinium (227.027747)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactin. 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium (237.048156)	94 Pu Plutonium (244.064197)	95 Am Americ. (243.061372)	96 Cm Curium (247.070346)	97 Bk Berkelium (247.070298)	98 Cf Californ. (251.079579)	99 Es Einstein. (252.08297)	100 Fm Ferrmium (257.095096)	101 Md Mendelev. (258.098427)	102 No Nobelium (259.10111)	103 Lr Lawrence. (262.1098)
-----------------	-----------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-----------------------------	------------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Γ. Τσιπολίτης

Βαρυόνια

- Ταξινόμηση ανάλογα με τα spin, parity, isospin, παραδοξότητα, μάζα ...
- Βαρυόνια με $J^P = \frac{3}{2}^+$

$I_3 =$	$-\frac{3}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{2}$	+1	$+\frac{3}{2}$	Mass (MeV/c ²)	Strangeness
$I = \frac{3}{2}$	Δ^-		Δ^0		Δ^+		Δ^{++}	1230	0
$I = 1$		Σ^{*-}		Σ^{*0}		Σ^{*+}		1380	-1
$I = \frac{1}{2}$			Ξ^{*-}		Ξ^{*0}			1530	-2
$I = 0$				Ω^-				1670	-3

Γ. Τσιπολίτης

Βαρυόνια

- Βαρυόνια με $J^P = \frac{1}{2}^+$

I_3	$-\frac{3}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{2}$	+1	$+\frac{3}{2}$	Mάζα (MeV/c ²)	Strangeness
$I=\frac{1}{2}$			n		p			940	0
$I=1/0$		Σ^-		Σ^0/Λ		Σ^+		1190	-1
$I=\frac{1}{2}$			Ξ^-		Ξ^+			1320	-2

Γ. Τσιπολίτης

Κουάρκ

- Όλα αυτά μπορούν να εξηγηθούν με ένα βασικό σετ τριών αντικειμένων με spin $\frac{1}{2}$ τα οποία ονομάζονται κουάρκ (u, d, s) τα οποία συνδυάζονται σε τριάδες
- Για τα βαρυόνια με $J^P = \frac{3}{2}^+$ θα πρέπει τα spin να είναι ευθυγραμμισμένα:

$$\frac{1}{2}(\uparrow) + \frac{1}{2}(\uparrow) + \frac{1}{2}(\uparrow) = \frac{3}{2}(\uparrow \uparrow \uparrow)$$

επίσης οι μάζες μπορούν να εξηγηθούν αν θεωρήσουμε:

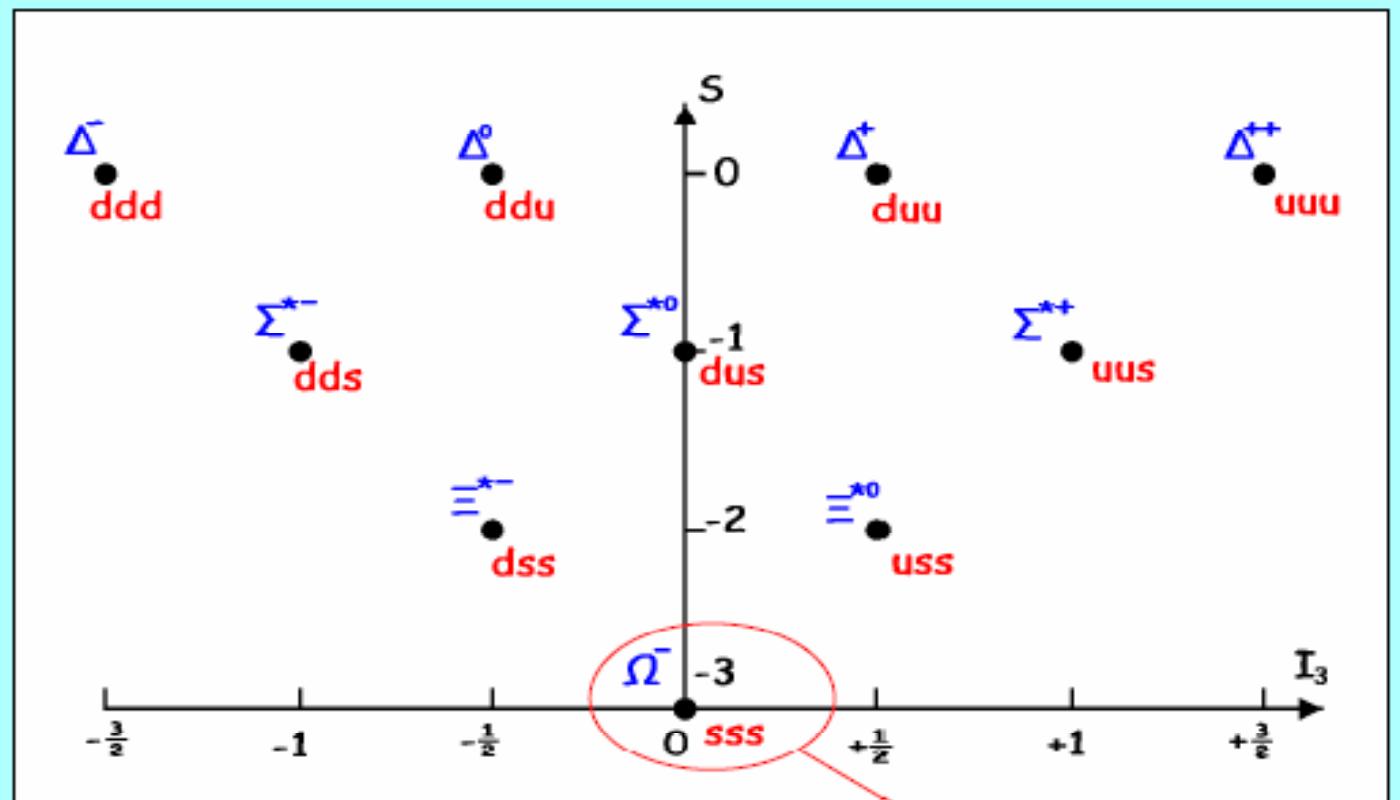
$$m_u \approx m_d \quad \text{και} \quad m_s \approx m_u + 150 \text{ MeV}$$

Κουάρκ	B	J	I	I_3	S	Q
u	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}\hbar$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	$+\frac{2}{3}e$
d	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}\hbar$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{3}e$
s	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}\hbar$	0	0	-1	$-\frac{1}{3}e$

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2}$$

Γ. Τσιπολίτης

Βαρυόνια με $J^P = \frac{3}{2}^+$



Γ. Τσιπολίτης

Ανακάλυψη του Ω^-

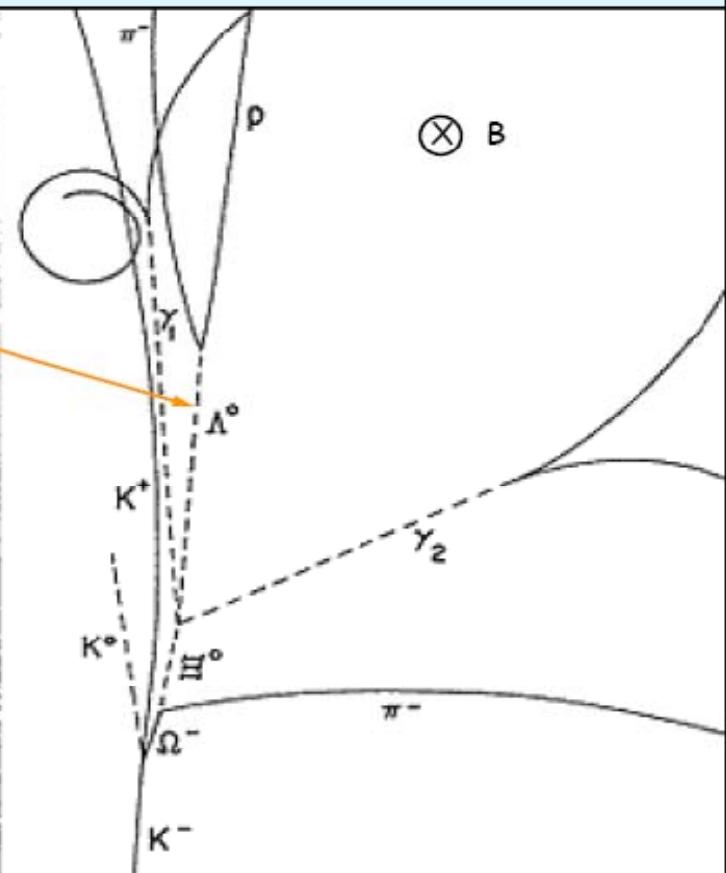
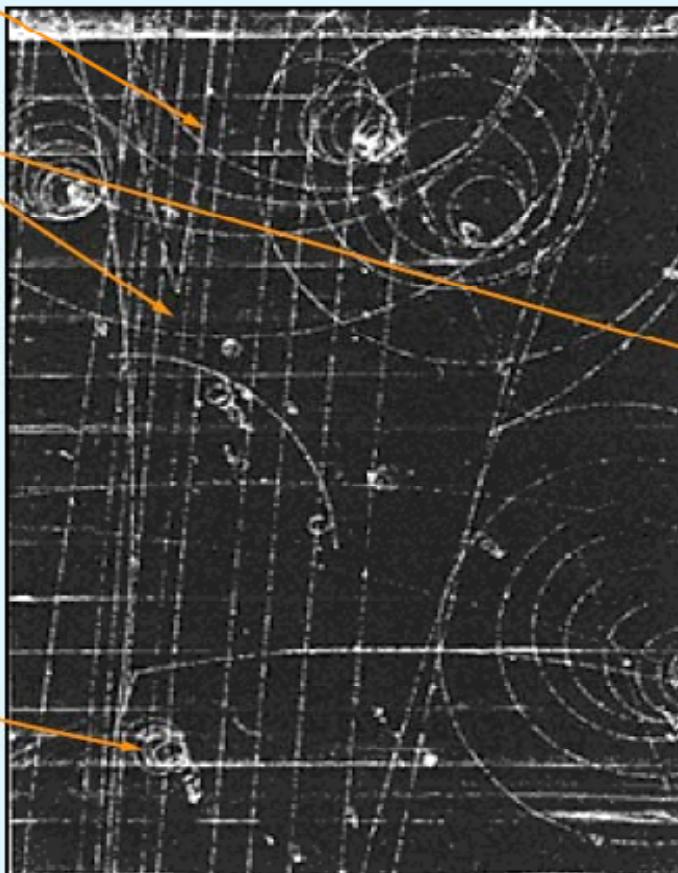
Chamber is in a uniform magnetic field: charged particles will bend with $\rho = p/(0.3B)$

Trail of bubbles

Neutral particles
leave no tracks

Atomic electron
knocked out

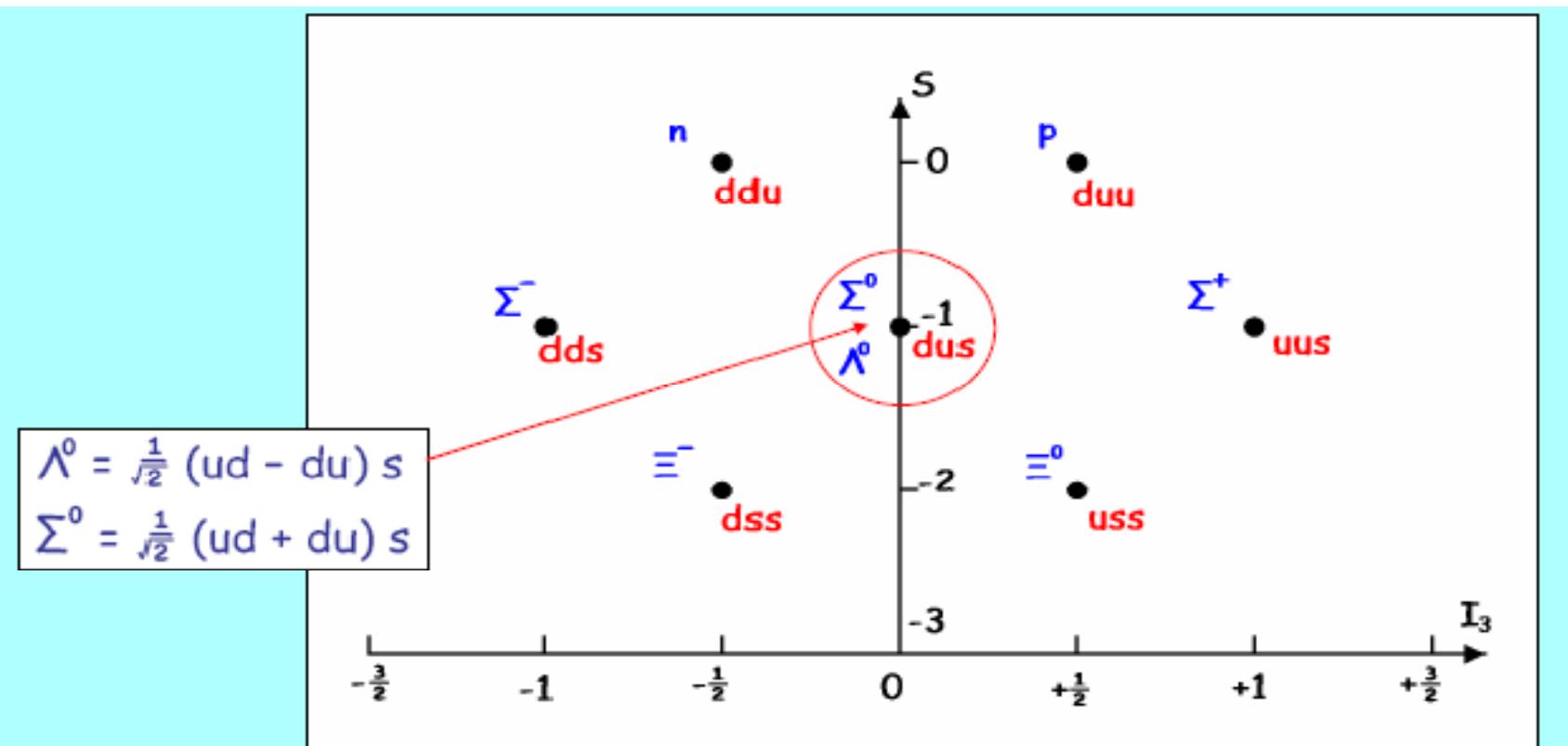
Which way does
magnetic field
point?



Γ. Τσιπολίτης

Βαρυόνια με $J^P = \frac{1}{2}^+$

- 3 κουαρκ με spin $\frac{1}{2}(\uparrow) - \frac{1}{2}(\downarrow) + \frac{1}{2}(\uparrow) = \frac{1}{2}(\uparrow \downarrow \uparrow)$



Γ. Τσιπολίτης

Κουάρκ

- Για τα u, d και s κουάρκ έχουμε $3 \times 3 \times 3 = 27$ συνδυασμούς.
- 1 (singlet) + 8 (octet) + 8 (octet) + 10 (decuplet)
- $\Delta^{\frac{3}{2}+}_{uus}$ → Φερμιόνιο → αντισυμμετρική κυμματοσυνάρτηση
- Για να λύσουμε το πρόβλημα με τη στατιστική ένας καινούριος "κρυμμένος" βαθμός ελευθερίας εισήχθη, το χρώμα, το οποίο είναι πάντοτε αντισυμμετρικό.

$$|qqq\rangle_A = |\text{χρώμα}\rangle_A \otimes |\text{χώρος, spin, γεύση}\rangle_s$$

- Για τα $J^P = \frac{3}{2}^+$ και $\frac{1}{2}^+$ βαρυόνια $\ell = 0$ άρα το χωρικό μέρος της κυμματοσυνάρτησης είναι συμμετρικό και συνεπάγεται ότι και το spin \otimes γεύση μέρος θα πρέπει να είναι συμμετρικό.
- Για τον συνδυασμό uuu (ή ddd ή sss) έχουμε ήδη συμμετρική κατάσταση για τη γεύση άρα και το spin πρέπει να είναι σε συμμετρική κατάσταση ($\uparrow\uparrow\uparrow$)

Κουάρκ

- Οι καταστάσεις uuu, ddd και sss μπορούν να υπάρξουν μόνο στην κατάσταση $J^P = \frac{3}{2}^+$ (decuplet) και μας δίνουν τα Δ^{++} , Δ^- , Ω^-
- Για το uud έχουμε (uud + udu + duu) (συμμετρική) και spin ($\uparrow\uparrow\uparrow + \uparrow\uparrow\uparrow + \uparrow\uparrow\uparrow$) (συμμετρική) και μας δίνει το Δ^+
- Οι άλλες καταστάσεις του uud δεν έχουν ξεκάθαρη συμμετρία αλλά συνδυάζονται με spin ($\uparrow\uparrow\downarrow$) (που επίσης δεν έχει ξεκάθαρη συμμετρία) ώστε να μας δώσουν τελικά μια συμμετρική κατάσταση $\frac{1}{2}^+$ το p.
- Ας φτιάξουμε το πρωτόνιο: χρειαζόμαστε μια συμμετρική κυματοσυνάρτηση με spin $\frac{1}{2}$. Ξεκινάμε με spin 0 αντισυμμετρική κατάσταση $\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$. Παίρνουμε την αντισυμμετρική I=0 κατάσταση ud-du και προσθέτουμε ένα u \uparrow κουάρκ

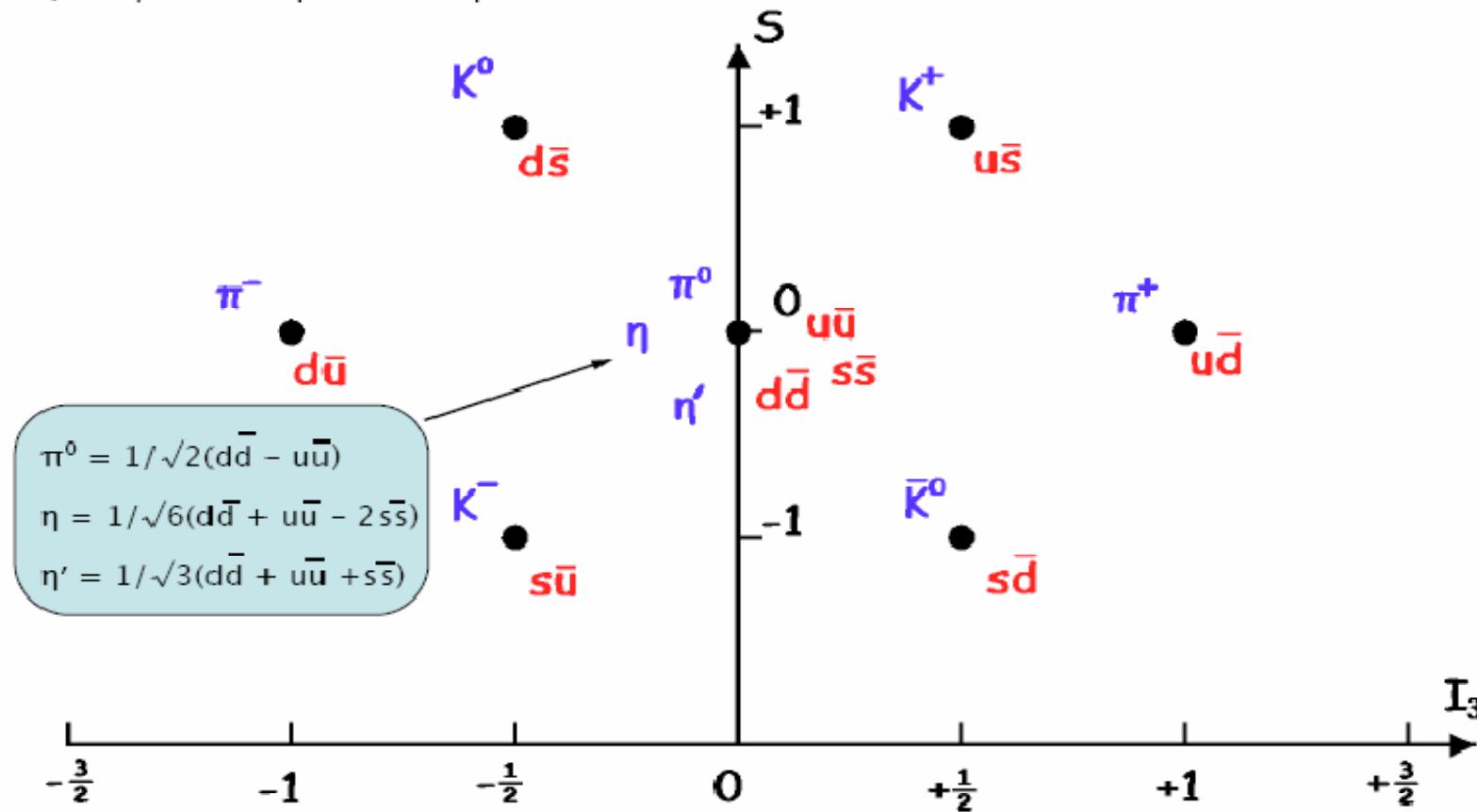
$$(u\uparrow d\downarrow - u\downarrow d\uparrow - d\uparrow u\downarrow + d\downarrow u\uparrow)u\uparrow$$

αυτή η κατάσταση είναι συμμετρική στην εναλλαγή των δύο πρώτων κουάρκ αλλά επιπλέον πρέπει να κάνουμε μια κυκλική εναλλαγή για να την κάνουμε συμμετρική $1 \leftrightarrow 3$ και $2 \leftrightarrow 3$

$$\begin{aligned} |p\rangle = \frac{1}{\sqrt{18}} &|2u\uparrow d\downarrow u\uparrow + 2u\uparrow u\uparrow d\downarrow + 2d\downarrow u\uparrow u\uparrow - u\uparrow u\downarrow d\uparrow \\ &- u\uparrow d\uparrow u\downarrow - d\uparrow u\uparrow u\downarrow - u\downarrow u\uparrow d\uparrow - u\downarrow d\uparrow u\uparrow - d\uparrow u\downarrow u\uparrow\rangle \end{aligned}$$

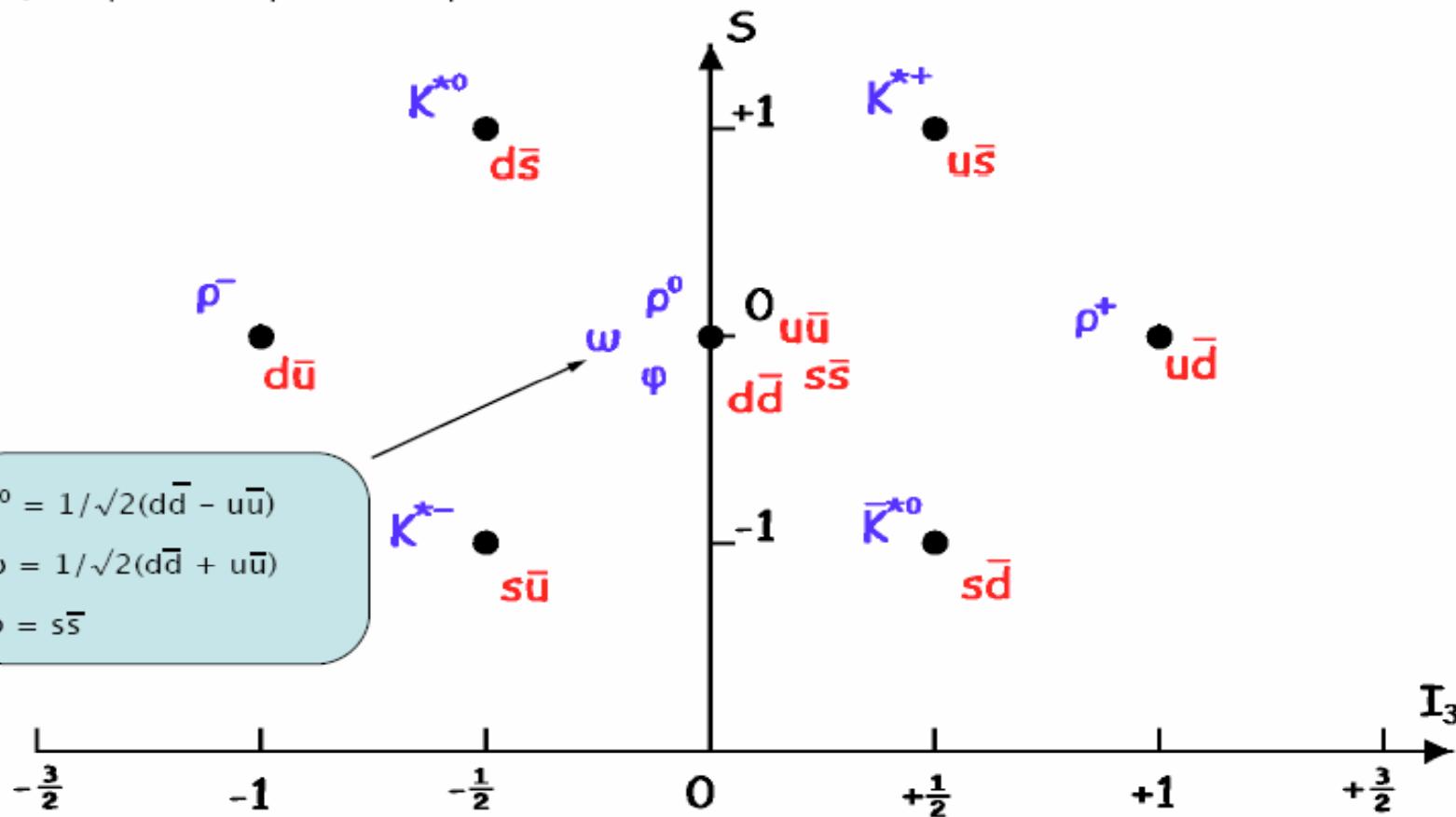
Μεσόνια με $J^P = 0^-$ (pseudoscalars)

Quark plus anti-quark with spins $\uparrow\downarrow = 0$



Μεσόνια με $J^P = 1^-$ (vectors)

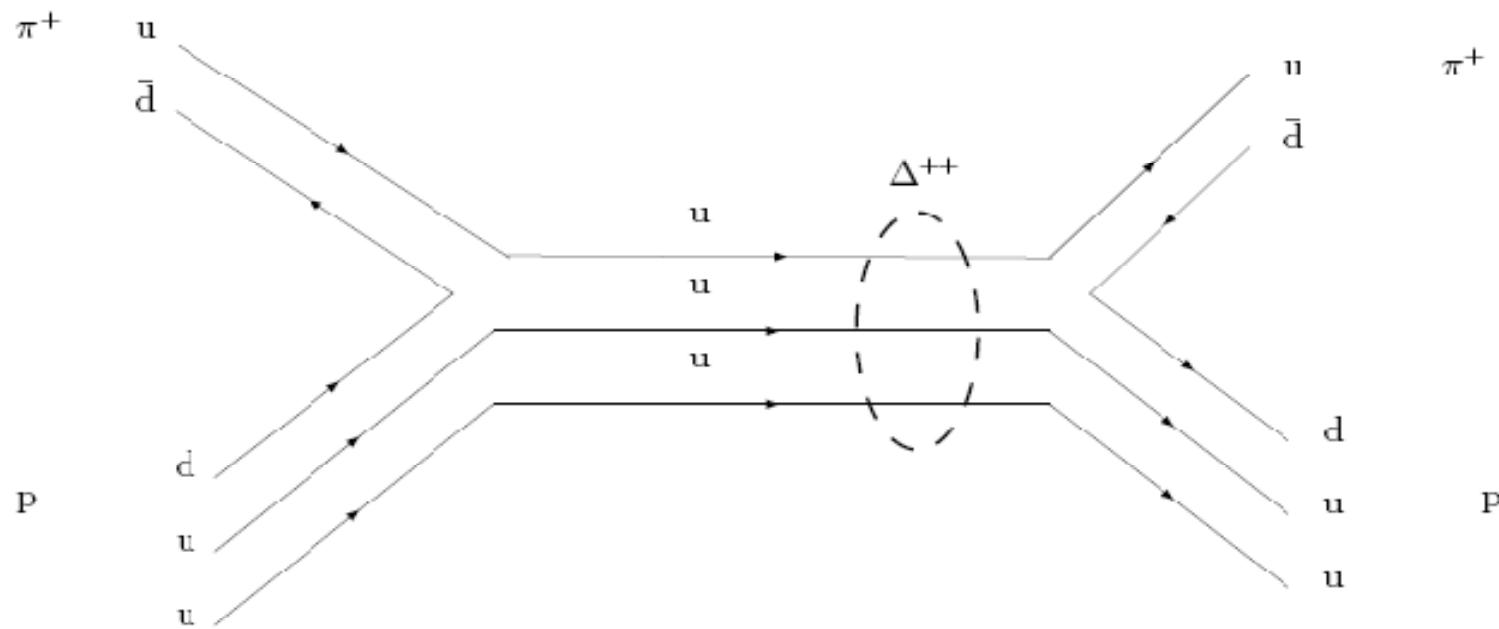
Quark plus anti-quark with spins $\uparrow\downarrow = 1$



Γ. Τσιπολίτης

Διαγράμματα ροής Κουαρκ

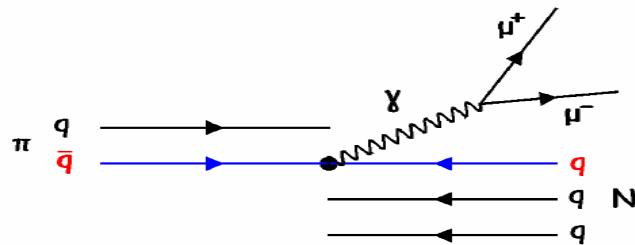
- Τα διαγράμματα ροής μας βοηθάνε να αντιληφθούμε το τι συμβαίνει σε κάποιες αλληλεπιδράσεις. Είναι σαν τα διαγράμματα Feynman χωρίς να έχουν τις αλληλεπιδράσεις.
- πχ. η αντίδραση $\pi^+ + p \rightarrow \Delta^{++} \rightarrow \pi^+ + p$ μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Γ. Τσιπολίτης

Ένδειξη για κουαρκ

- Παραγωγή ζεύγους λεπτονίων στην αλληλεπίδραση π -C :



Η ενεργός διατομή είναι $\sigma \sim [\text{φορτίο } q]^2$

χρησιμοποιώντας σα στόχο πυρήνα με ίδιο αριθμό u και d κουαρκ (isoscalar target)

$^{12}_6 C$ έχει 6 πρωτόνια (uud) και 6 νετρόνια (udd) $\rightarrow 18 \text{ u} + 18 \text{ d}$

για $\pi^- (\bar{u}d) \rightarrow \bar{u}u$ εξαϋλωση σε $\mu^+ \mu^-$

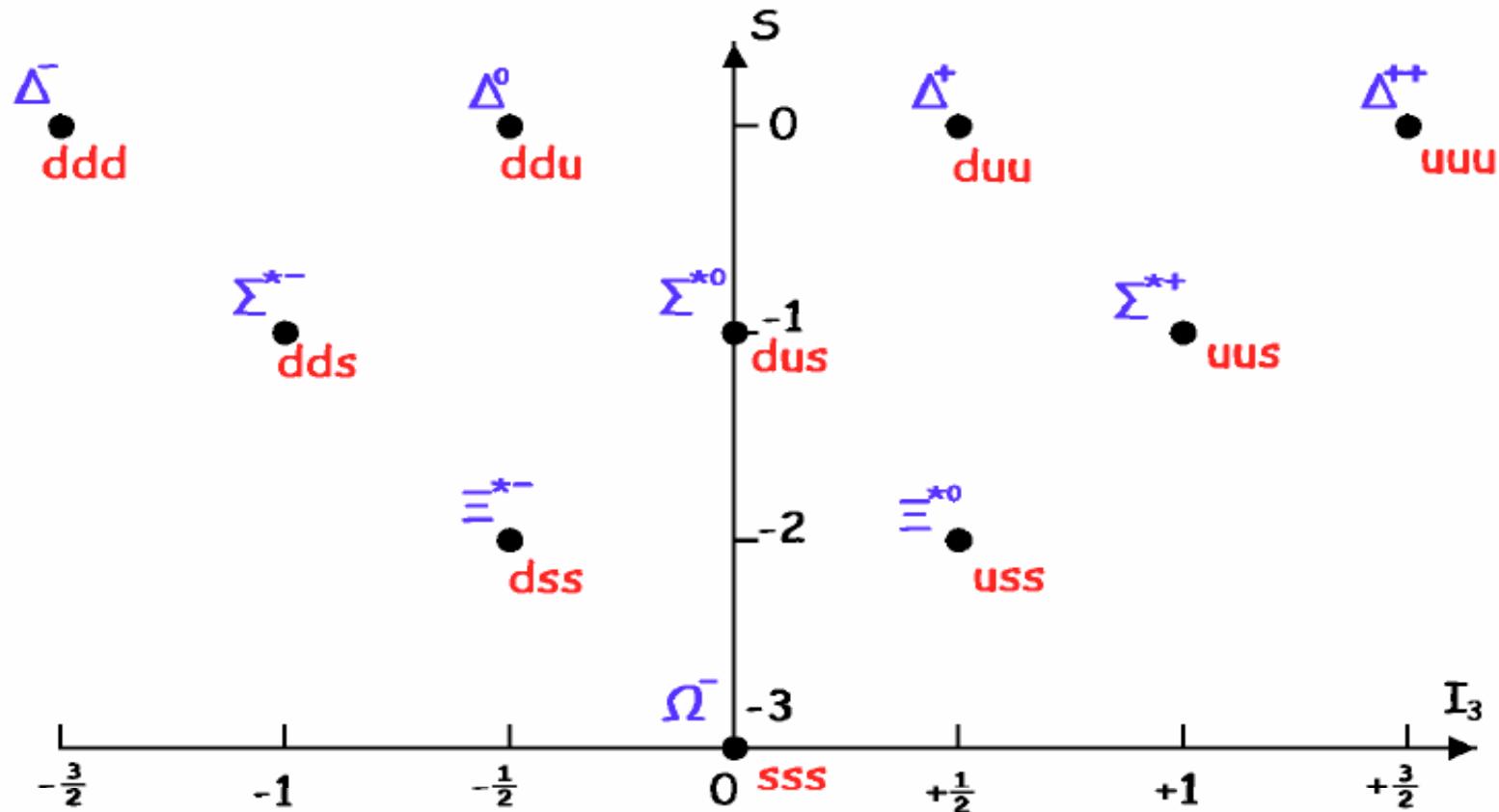
για $\pi^+ (u\bar{d}) \rightarrow \bar{d}d$ εξαϋλωση σε $\mu^+ \mu^-$

$$\frac{\sigma(\pi^- + C \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\sigma(\pi^+ + C \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{\left(\frac{2}{3}\right)^2}{\left(-\frac{1}{3}\right)^2} = 4$$

μετρήθηκε

Γ. Τσιπολίτης

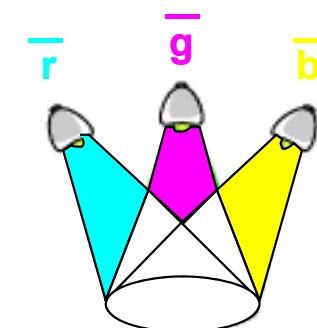
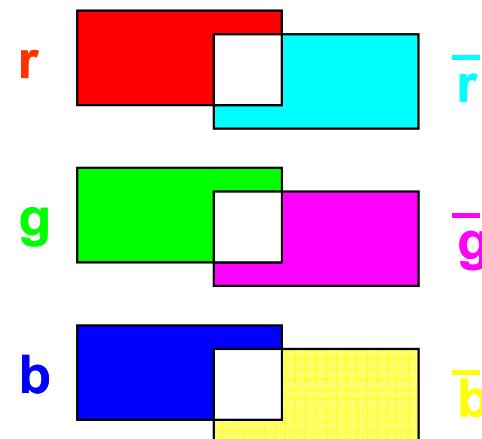
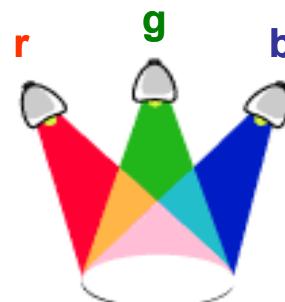
Βαρυόνια με $J^P = \frac{3}{2}^+$



Γ. Τσιπολίτης

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Υπάρχουν τρία βασικά χρώματα:
κόκκινο r (red) – πράσινο g (green) – κυανούν b (blue)
- Πρόσθεση των τριών βασικών χρωμάτων δίνει λευκό: **rgb = λευκό**
- Σε κάθε βασικό χρώμα αντιστοιχεί το συμπληρωματικό του χρώμα με την ιδιότητα (βασικό χρώμα) + (συμπληρωματικό χρώμα) = λευκό



Γ. Τσιπολίτης

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Υπάρχουν κατ' αναλογία τρία είδη φορτίου στα κουάρκ
κόκκινο r (red) – πράσινο g (green) – κυανούν b (blue)
- Κάθε κουάρκ έχει υποχρεωτικά ένα από τα τρία αυτά φορτία (χρώματα)
- Σε κάθε φορτίο αντιστοιχεί ένα αντιφορτίο (συμπληρωματικό χρώμα)
- Συνύπαρξη και των τριών φορτίων χρωμάτων (ή και των αντιχρωμάτων) δίνει λευκό: **r+g+b = λευκό** (**$\bar{r}+\bar{g}+\bar{b}$ = λευκό**)
- Στα βαρύνια τα τρία κουάρκ έχουν διαφορετικό φορτίο χρώμα. Στα μεσόνια το αντικουάρκ έχει το συμπληρωματικό χρώμα του κουάρκ που το συνοδεύει.
- **Όλα τα αδρόνια είναι άχρωμα!**

Γ. Τσιπολίτης

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

		red	green	blue	
Red	Red	1	0	0	
Green	Green	0	1	0	
Blue	Blue	0	0	1	
Cyan	Cyan	0	1	1	= anti-red \bar{r}
Magenta	Magenta	1	0	1	= anti-green \bar{g}
Yellow	Yellow	1	1	0	= anti-blue \bar{b}
White	White	1	1	1	
Black	Black	0	0	0	

Βαρύνια: $r + g + b = 111 = \lambda\epsilonυκό$

Μεσόνια: $r + \bar{r} = 111 = \lambda\epsilonυκό \quad (\text{ή } g + \bar{g}, b + \bar{b})$

Πρωτόνιο: $p = (u_r \ u_g \ d_b)$

Μεσόνιο (π^+): $\pi^+ = (u_r \ \bar{d}_r)$

Νετρόνιο: $n = (u_r \ d_g \ d_b)$

Αντιπρωτόνιο: $\bar{p} = (\bar{u}_r^- \ \bar{u}_g^- \ \bar{d}_b^-)$

Γ. Τσιπολίτης

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Κατ' αντιστοιχία με το spin έτσι και για το χρώμα, το βαρυόνιο που αποτελείται από τρία κουάρκ, είναι color singlet state με συνολικό χρώμα μηδέν, η οποία περιγράφεται από την έκφραση:

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(r_1g_2b_3 - r_1b_2g_3 + b_1r_2g_3 - b_1g_2r_3 + g_1b_2r_3 - g_1r_2b_3)$$

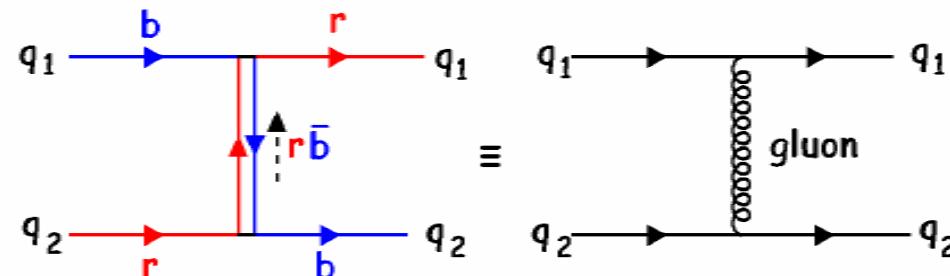
- Αντισυμμετρική ως προς την εναλλαγή δύο οποιωνδήποτε κουάρκ!
- Για τα μεσόνια η color singlet state δίνεται από την έκφραση:

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(r_1\bar{r}_2 + g_1\bar{g}_2 + b_1\bar{b}_2)$$

- Συμμετρική ως προς την εναλλαγή δύο οποιωνδήποτε κουάρκ!

Το χρώμα

- Το χρώμα είναι για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις ότι είναι το φορτίο για τον ΗΜ
- Η Κβαντική Χρωμοδυναμική (QCD) η κβαντική θεωρία πεδίου των ισχυρών αλληλεπιδράσεων "χρώματος" μεταξύ των κουάρκ. Η ισχυρή δύναμη μεταφέρεται από 8 διανυσματικά γκλουόνια ($J^P=1^-$) με μηδενική μάζα. Είναι ισοδύναμα με ζεύγη $q\bar{q}$



- Πρόκειται για μια μη-Αβελιανή (non-Abelian) θεωρία που οι διαδότες της αλληλεπίδρασης έχουν "φορτίο" και μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους - αντίθετα με τον ηλεκτρομαγνητισμό που οι διαδότες (φωτόνια) δεν έχουν φορτίο και δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Γ. Τσιπολίτης

Γκλουόνια

- Περιμένουμε 9 συνδυασμούς $(r, g, b) \otimes (\underline{r}, \underline{g}, \underline{b})$ τους εξής:

$r \underline{b}$

$r \underline{g}$

$\underline{g} r$

$\underline{g} b$

$b \underline{g}$

$b \underline{r}$

$r \underline{r}$

$\underline{g} \underline{g}$

$b \underline{b}$

Mix

$$\frac{rr\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b}}{\sqrt{3}}$$
$$\frac{rr\bar{r} - 2g\bar{g} + b\bar{b}}{\sqrt{6}}$$
$$\frac{rr\bar{r} - b\bar{b}}{\sqrt{2}}$$

άχρωμη και συμμετρική
κατάσταση στην εναλλαγή

$r \rightarrow b \rightarrow g.$

\Rightarrow δεν αλληλεπιδρά

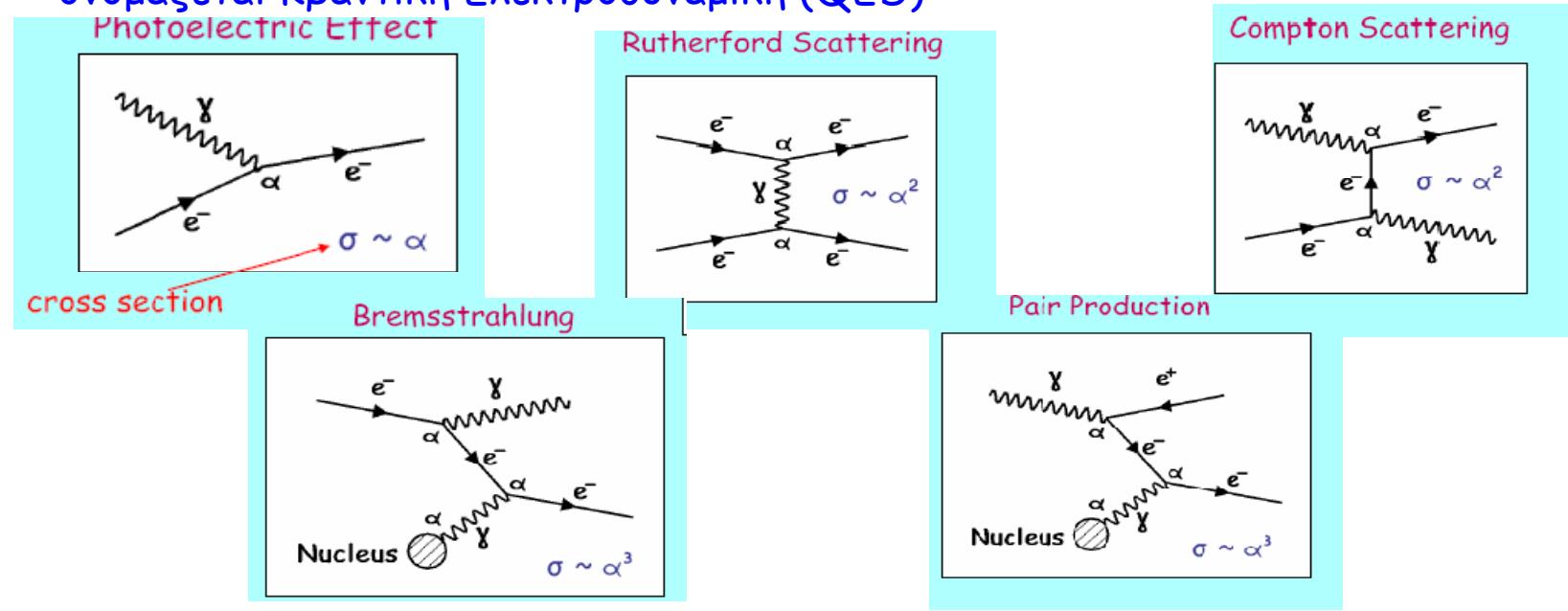
8 αλληλεπιδρόντα γκλουόνια

ΗΜ αλληλεπιδράσεις

- Ας πάμε για λίγο στις ΗΜ αλληλεπιδράσεις. Τα φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν μέσω της ανταλλαγής φωτονίων (γ). Η ισχύς της αλληλεπίδρασης δίνεται από την σταθερά λεπτής υφής α :

$$\sigma = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

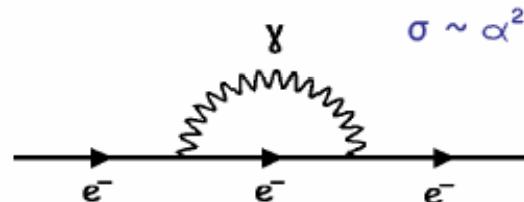
- Η κβαντική θεωρία πεδίου που χρησιμοποιούμε για να κάνουμε υπολογισμούς ονομάζεται Κβαντική Ελεκτροδυναμική (QED)



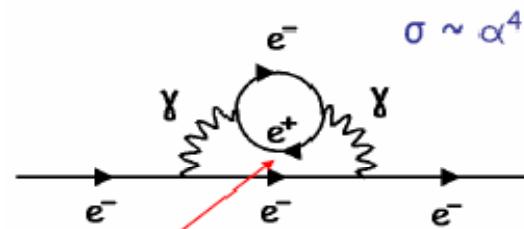
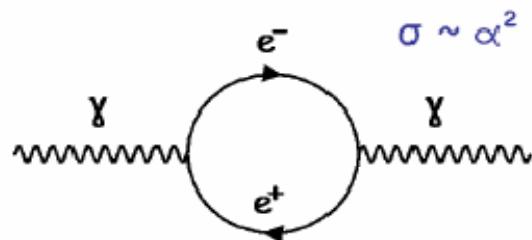
Γ. Τσιπολίτης

"Self Energy Corrections"

- Έστω ότι έχουμε ένα ηλεκτρόνιο
- Το ηλεκτρόνιο μπορεί να εκπέμψει ένα φωτόνιο το οποίο μπορεί να το ξανα-απορροφήσει



- Το φωτόνιο μπορεί να μετατραπεί σε ένα ζεύγος e^-e^+



εδώ η μάζα και το φορτίο φαίνονται διαφορετικά (το e^+ προτιμά να είναι κοντύτερα στο ηλεκτρόνιο)

- Αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα άπειρες συνεισφορές στο φορτίο και στη μάζα!

Γ. Τσιπολίτης

Επανακανονικοποίηση

- Το πρόβλημα των απειρισμών λύνεται με την τεχνική της επανακανονικοποίησης (renormalization)
- όταν κανουμε τους υπολογισμούς εμφανίζονται όροι $\int \frac{1}{q^4} q^3 dq = \ln q \Big|^\infty = \infty$
- όχι και τόσο εύκολο → λύση από τους Dirac, Pauli, Kramers, Weisskopf, Bethe, Tomonaga, Schwinger, Feynman
- Στην επανακανονικοποίηση επαναπροσδιορίζουμε τη μάζα και το φορτίο στις φυσικές τους τιμές και αποφεύγουμε τους απειρισμούς.
- εισάγουμε ένα όρο $-M^2/(q^2 - M^2)$ και ολοκληρώνουμε μεχρι το M που μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ότι μας απομένουν μόνο ορισμένα (finite) μέρη που εξαρτώνται από το M και μάλιστα παρουσιάζονται σαν επιπλέον όροι στις μάζες και τις σταθερές σύζευξης.
- μας μένουν όροι της μορφής :

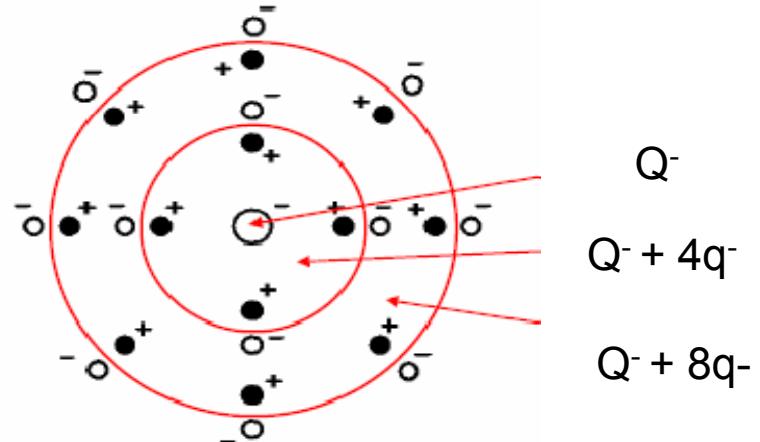
$$m_{\text{physical}} = m_{\text{bare}} + \delta m$$
$$e_{\text{physical}} = e_{\text{bare}} + \delta e$$

μπορεί να είναι ∞

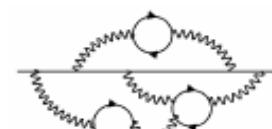
Το αποτέλεσμα είναι ότι έχουμε "running" μάζες και "running" σταθερές σύζευξης που εξαρτώνται από την ενέργεια

“running” φορτίο (α)

- Η ισχύς της σταθεράς σύζευξης εξαρτάται από το ηλεκτρικό φορτίο
- Σε μεγάλες αποστάσεις το ηλεκτρόνιο
έχει φορτίο $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$
- Αν κοιτάζουμε πιο κοντά βλέπουμε ένα νέφος από δυνητικά e^+e^- με τα e^+ κοντύτερα στο αρχικό ηλεκτρόνιο.
- Αυτό λέγεται “πόλωση του κενού”
(vacuum polarization) και είναι όπως ένα διηλεκτρικό που πολώνεται και κρύβει το φορτίο.
- Το φορτίο φαίνεται να ελαττώνεται
καθώς αυξάνει η απόσταση (χαμηλή
ενέργεια)



Κλασσική εικόνα



QED

“running” φορτίο (α)

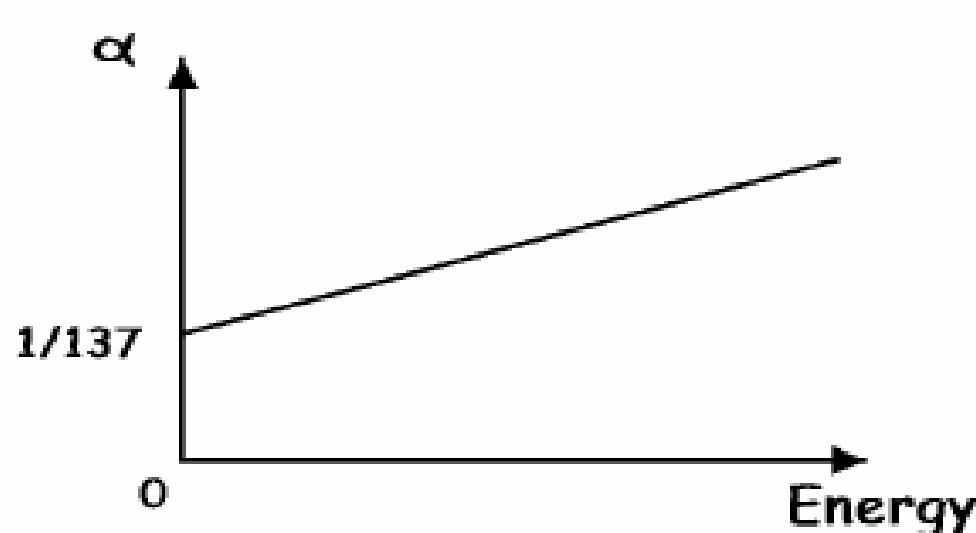
- Συνήθως (χαμηλή ενέργεια - μεγάλη απόσταση)

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

- στο Z^0 (μεγάλη ενέργεια - μικρότερη απόσταση)

$$\alpha \sim \frac{1}{128}$$

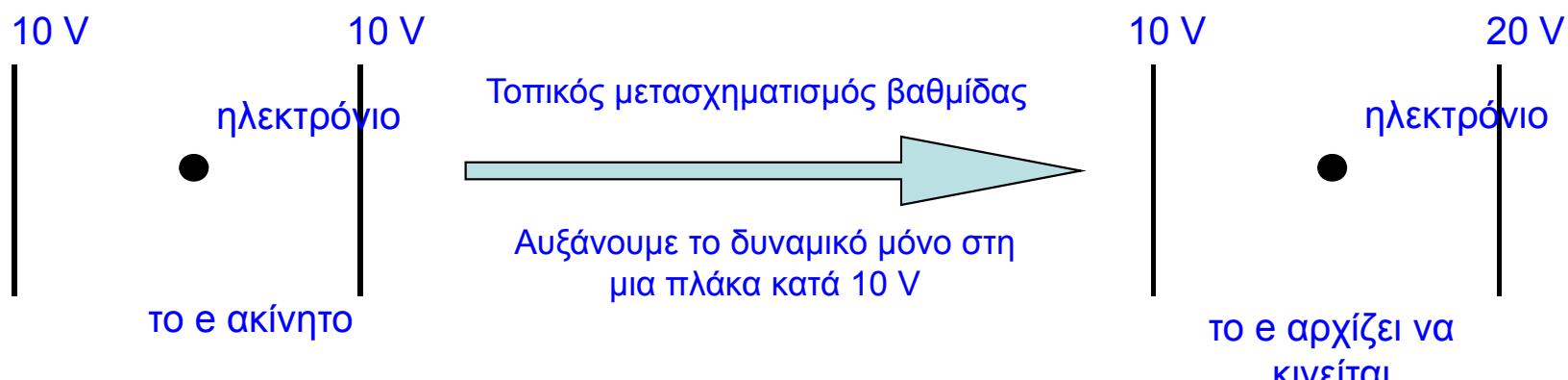
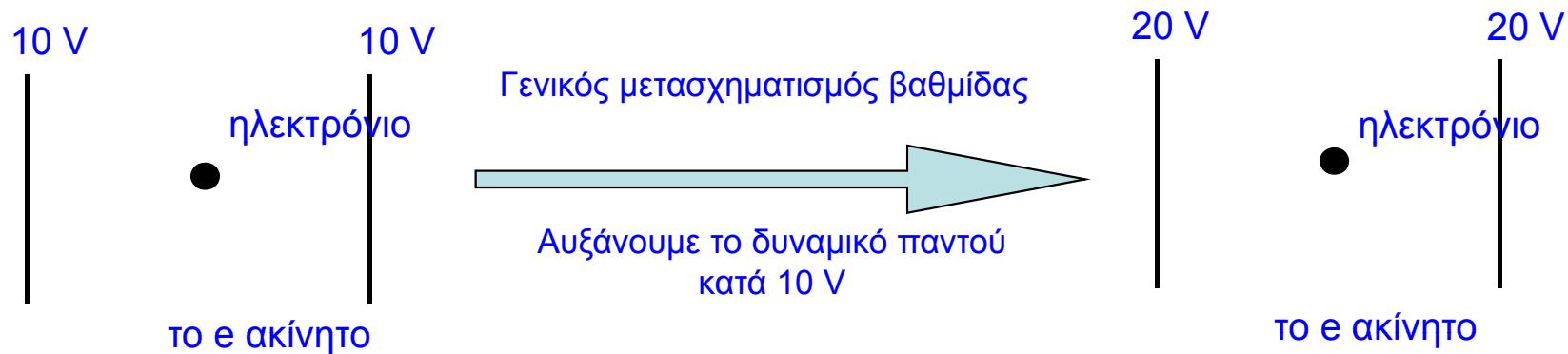
“running” α



Γ. Τσιπολίτης

Αναλλοίωτο Βαθμίδας - Gauge Invariance

- Η QED έχει και "αναλλοίωτο βαθμίδας" → η θεωρία είναι ανεξάρτητη από απόλυτη βάθμιση (scale)



Γ. Τσιπολίτης

Αναλλοίωτο Βαθμίδας - Gauge Invariance

- Αλλάζοντας το δυναμικό με διαφορετικό τρόπο σε διαφορετικές θέσεις αλλάζει το ηλεκτρικό πεδίο
- Το φορτισμένο ηλεκτρόνιο κινείται \rightarrow δημιουργείται μαγνητικό πεδίο
- αλλαγή ηλεκτρικού & μαγνητικού πεδίου \rightarrow φωτόνια
- Μαθηματικά επιτρέπουμε στη φάση του ηλεκτρονίου να μεταβάλλεται σε κάθε σημείο του χωροχρόνου
 $\Psi(x,t) \rightarrow e^{-if(x,t)} \Psi(x,t)$ όπου $f(x,t)$ κάποια τυχαία συνάρτηση
- Τοπικοί μετασχηματισμοί βαθμίδας \rightarrow δυνάμεις & κβάντα του πεδίου

Γ. Τσιπολίτης

QED

- Η ποσότητα που έχει υπολογισθεί με τη μεγαλύτερη ακρίβεια στη σωματιδιακή φυσική είναι η μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου. Εφ' όσον το ηλεκτρόνιο είναι φορτισμένο σωματίδιο με spin έχει μαγνητική ροπή. Γενικά η μαγνητική ροπή ενός σωματιδίου δίνεται από τη σχέση

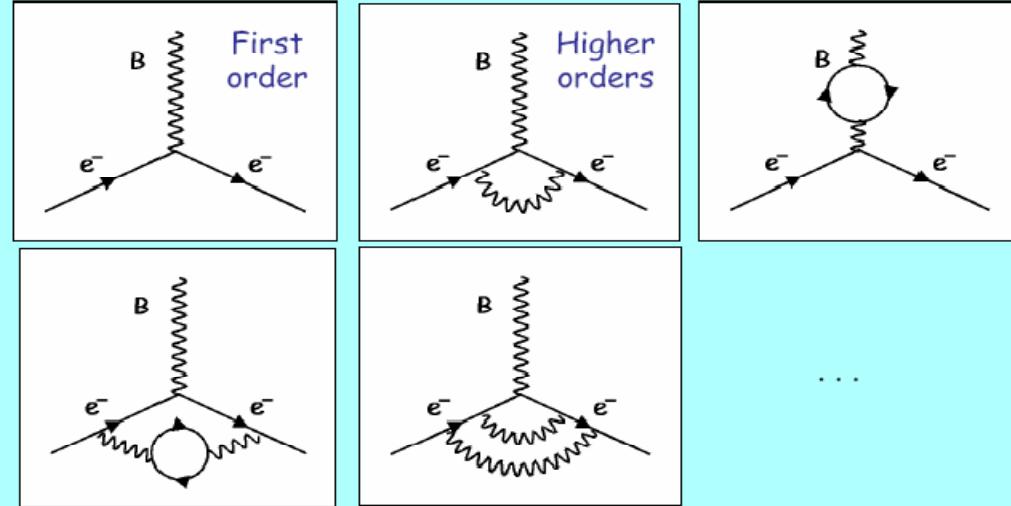
$$\mu = g \frac{e}{2m} S$$

όπου S το spin του σωματιδίου και g ένας παράγοντας που εξαρτάται από το spin. Για σωματίδια με spin $\frac{1}{2}$, $g=2 \Rightarrow \mu=e/2m$.

- Όμως, υπολογισμοί που λαμβάνουν υπ' όψη μεγαλύτερες τάξεις μεγέθους αλλάζουν αυτό το αποτέλεσμα.
- Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί είναι γνωστές σαν "g-2" μιας και έχουν να κάνουν με μικρές αποκλίσεις από το 2.
- συνήθως το αποτέλεσμα παρουσιάζεται σαν:

$$\sigma = \frac{g - 2}{2}$$

QED υπολογισμοί



- από τη θεωρία έχουμε:

$$0,5(\alpha/\pi) - 0,328478966(\alpha/\pi)^2 + 1,1765(\alpha/\pi)^3 - 0,8(\alpha/\pi)^4 + \dots$$

$$\alpha = 0,001\ 159\ 652\ 307 \pm 0,000\ 000\ 000\ 110$$

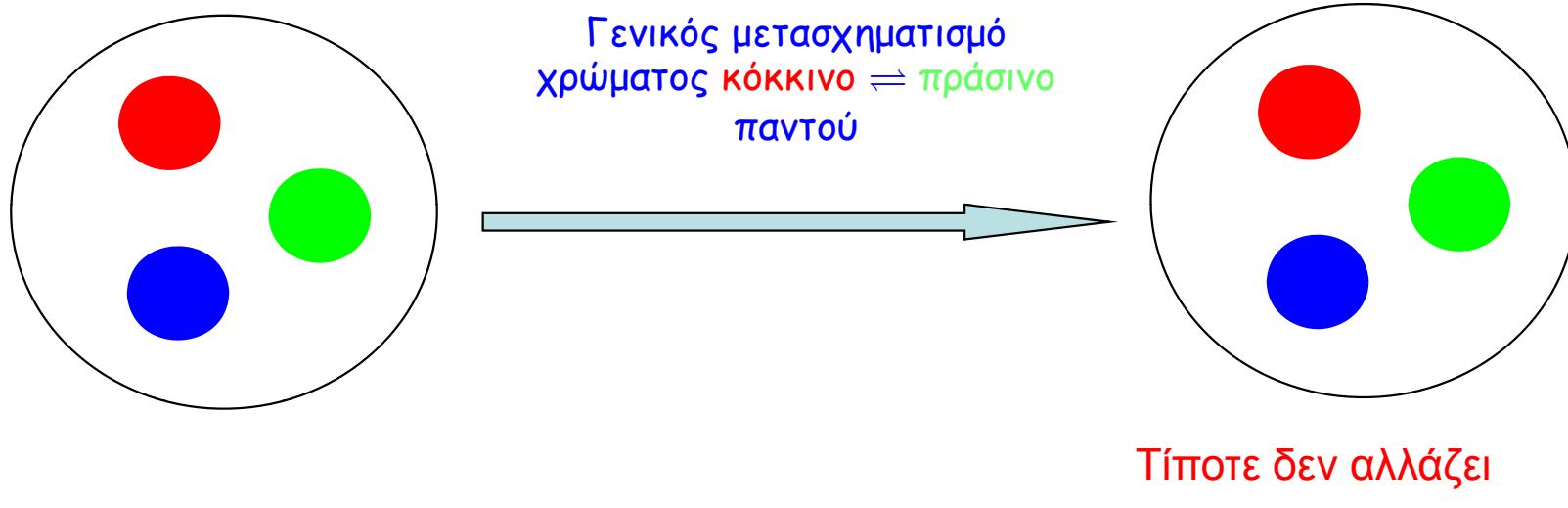
πείραμα:

$$\alpha = 0,001\ 159\ 652\ 193 \pm 0,000\ 000\ 000\ 010$$

Γ. Τσιπολίτης

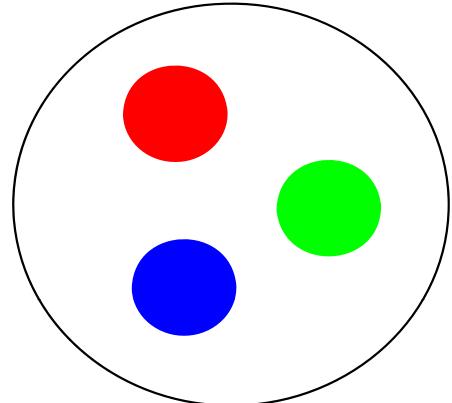
Μετασχηματισμοί χρώματος QCD

- Η QCD είναι επίσης θεωρία βαθμίδος
- Ας θεωρήσουμε το πρωτόνιο το οποίο αποτελείται από ένα κόκκινο, ένα πράσινο και ένα μπλε κουαρκ.

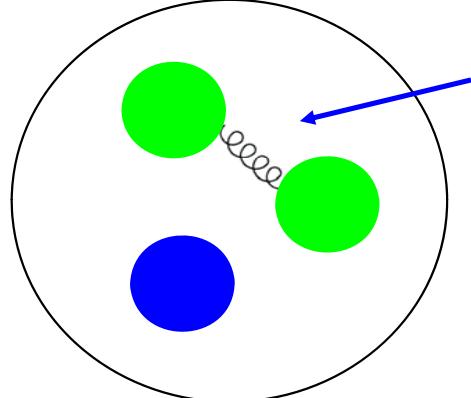
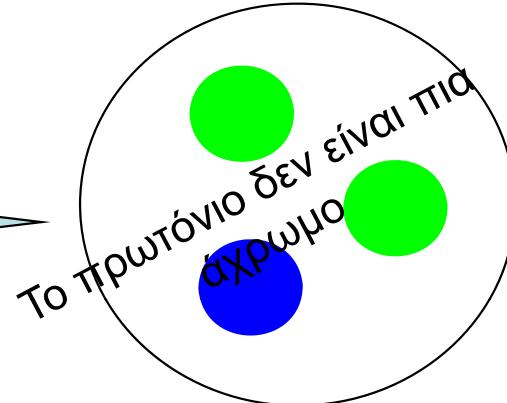


Γ. Τσιπολίτης

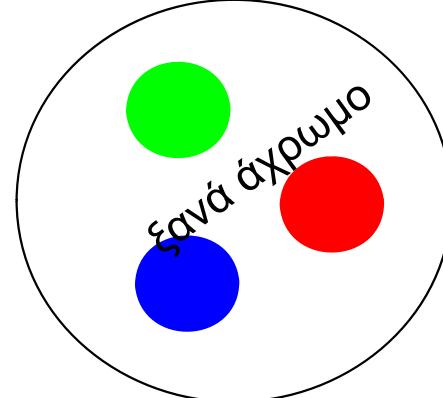
Μετασχηματισμοί χρώματος QCD



Τοπικός μετασχηματισμός
χρώματος κόκκινο \rightleftharpoons πράσινο



ανταλλαγή γκλουονίου
μετατρέπει το πράσινο
σε κόκκινο κουαρκ

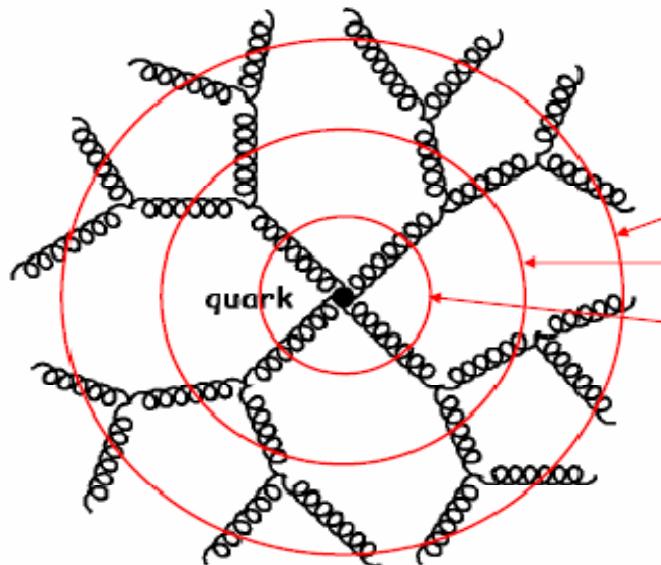


Τοπικοί μετασχηματισμοί χρώματος \rightarrow ανταλλαγή γκλουονίων \rightarrow δύναμη

Γ. Τσιπολίτης

Ιδιο-αλληλεπιδράσεις (self interactions)

- Τα γκλουόνια έχουν φορτίο χρώματος άρα μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους



16 γκλουόνια

8 γκλουόνια

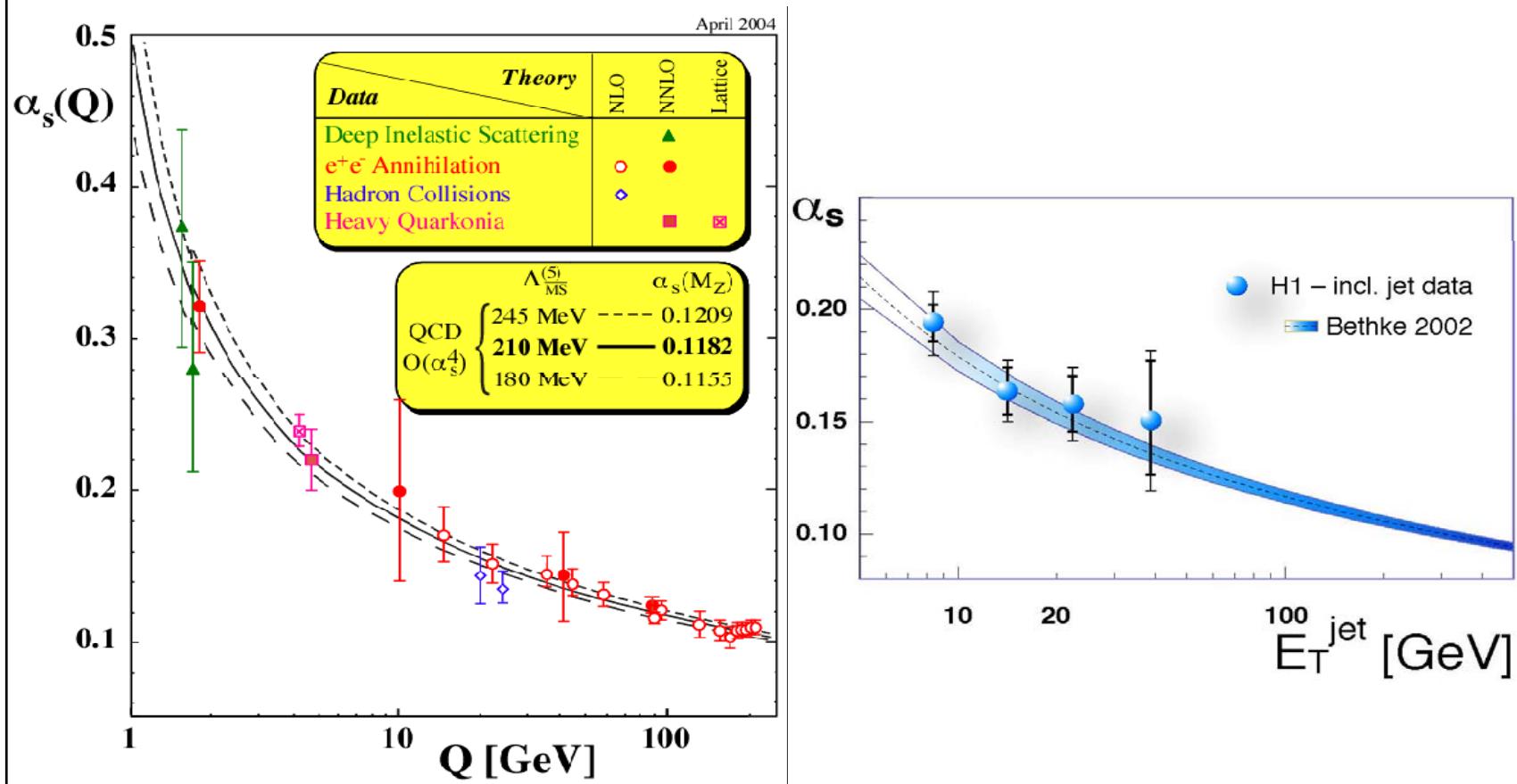
4 γκλουόνια

όσο πλησιάζουμε στο κουάρκ η ισχύς
του χρώματος ελαττώνεται

μικρή απόσταση → μεγάλη ενέργεια



Ισχύς του Φορτίου Χρώματος

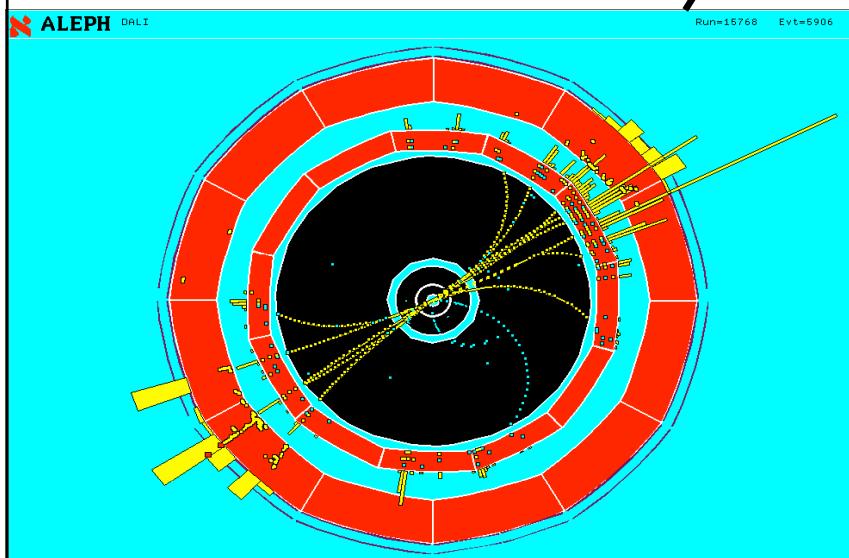
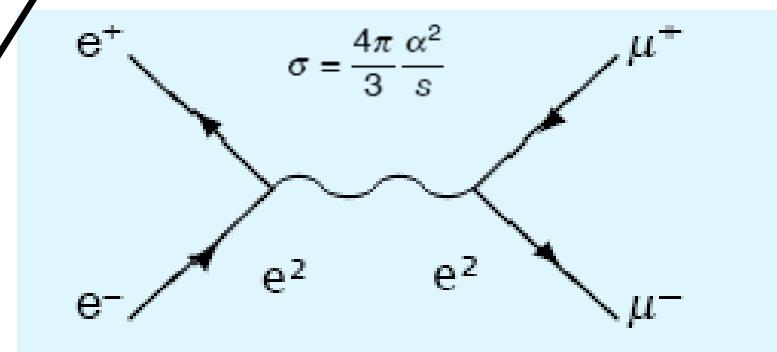
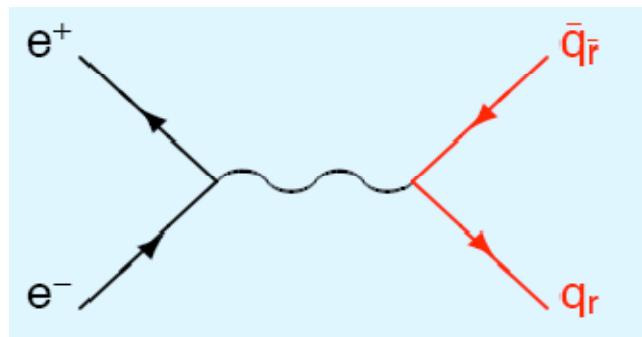


Γ. Τσιπολίτης

Χρόνος ζωής του π^0

- Το μεσόνιο π^0 διασπάται σε 2γ $(\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma)$
- Πειραματικός χρόνος ζωής 0.83×10^{-16}
- Θεωρητικοί υπολογισμοί με το πρότυπο των κουάρκ (χωρίς χρώμα) 7.5×10^{-16}
- Με την εισαγωγή του φορτίου χρώματος, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι όσα περισσότερα χρώματα υπάρχουν, τόσο γρηγορότερα διασπάται (τετραγωνική εξάρτηση). Άρα αν υπάρχουν τρία χρώματα, τότε ο χρόνος ελαττώνεται κατά παράγοντα
$$3^2 = 9$$
- \Rightarrow η θεωρητική πρόβλεψη συμφωνεί με την πειραματική τιμή

$e^+e^- \rightarrow \text{αδρόνια} / e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



τα δύο διαγράμματα είναι τα ίδια

Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις αντιδράσεις για να πάρουμε πληροφορίες για το φορτίο των κουαρκ & χρώμα

Γ. Τσιπολίτης

$e^+e^- \rightarrow \text{αδρόνια} / e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

	d	u	s	c	b	t
q	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
q^2	$\frac{1}{9}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{4}{9}$

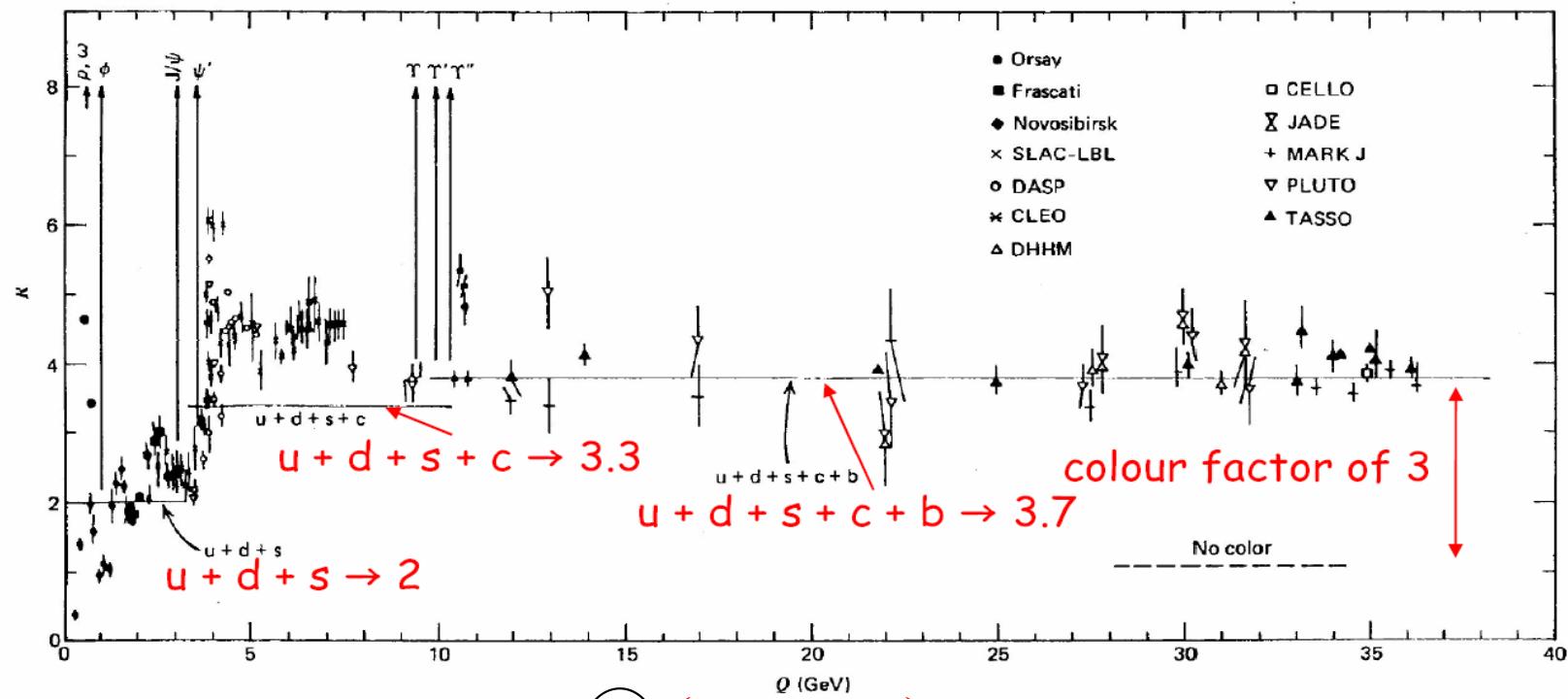
• Μέχρι τα 3 GeV παράγονται μόνο τα u, d, s άρα περιμένουμε

$$R = \left(\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} \right) = \frac{2}{3}$$

• Μέχρι τα 11 GeV παράγονται τα u, d, s, c άρα περιμένουμε

$$R = \left(\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} \right) = \frac{10}{9}$$

$e^+e^- \rightarrow \text{αδρόνια} / e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



$$R = 3 \times \left(\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} \right) = 2$$

3 διαφορετικά χρώματα

Γ. Τσιπολίτης

Ελεύθερα κουαρκ

- έρευνα για σταθερά σωματίδια με κλασματικό φορτίο → εξωτικά άτομα : σε βράχια από τη σελήνη, σε λάσπη από τα βάθη των ωκεανών
- έρευνα για κλασματικά φορτία σε πειράματα αλα Millikan
- έρευνα στις κοσμικές ακτίνες και στους επιταχυντές για σωματίδια που έχουν $1/9$ ή $4/9$ της ιονιστικής ικανότητας των κανονικών σωματιδίων

Δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα !

Γιατί:

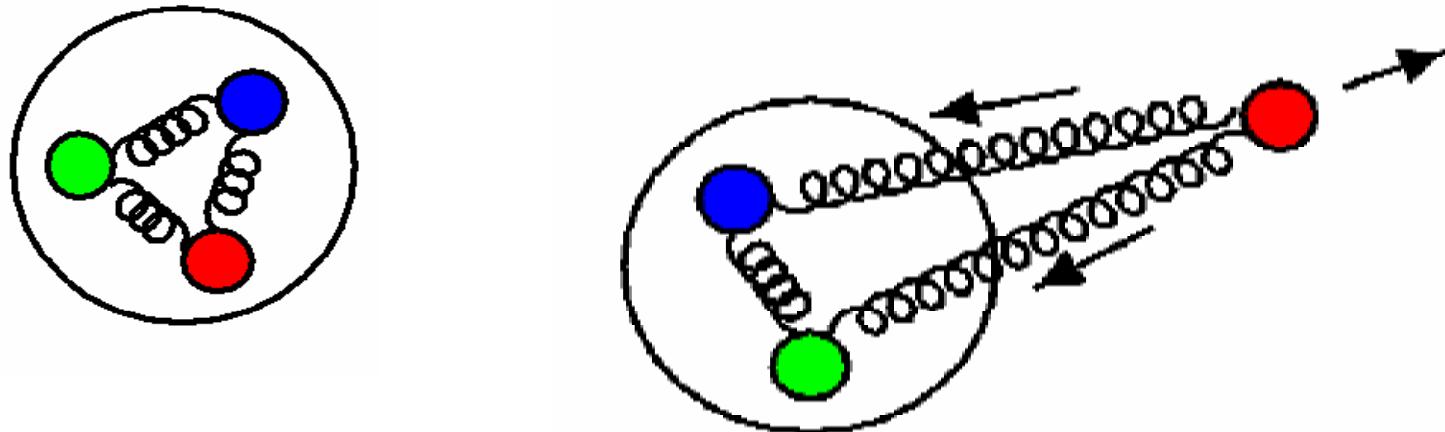
“Περιορισμός” των κουαρκ - confinement

- Ο λόγος που τα κουαρκ δεν είναι ελεύθερα και συναντούνται μόνο σε δέσμιες καταστάσεις $q\bar{q}$ και $\bar{q}q$ έχει να κάνει με το γεγονός ότι η ισχύς της σταθεράς σύζευξης a_s μειώνεται με αυξανόμενη την ενέργεια και αυξάνεται με αυξανόμενη την απόσταση

σε μικρές αποστάσεις μέσα στο πρωτόνιο το a_s είναι μικρό και τα κουαρκ είναι σχεδόν ελεύθερα

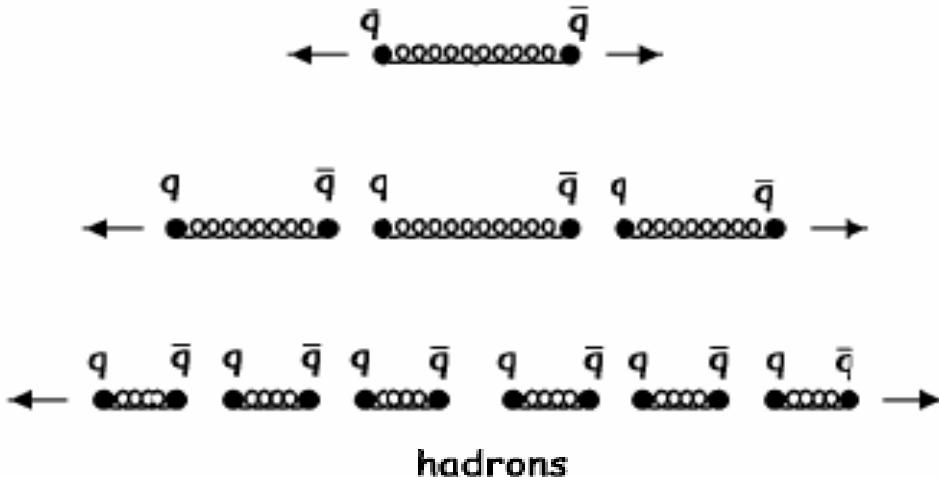
“asymptotic freedom”

όταν προσπαθούμε να τραβήξουμε ένα έξω τότε το a_s αυξάνεται και οι δυνάμεις προσπαθούν να το κρατήσουν.



Γ. Τσιπολίτης

Αδρονοποίηση

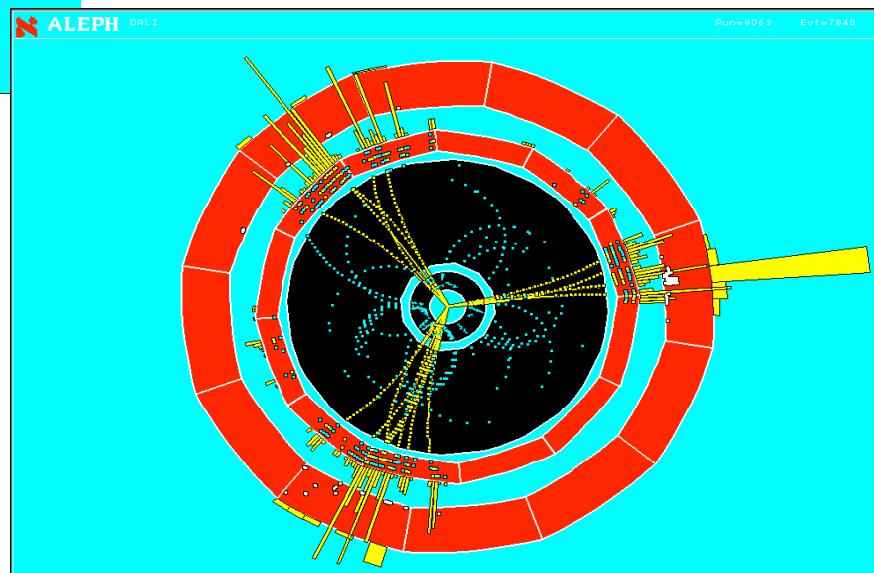
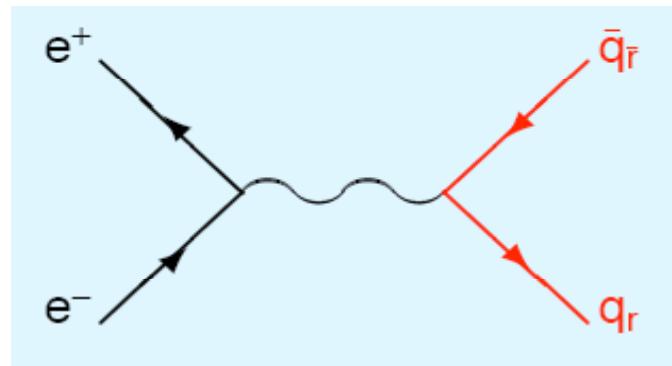
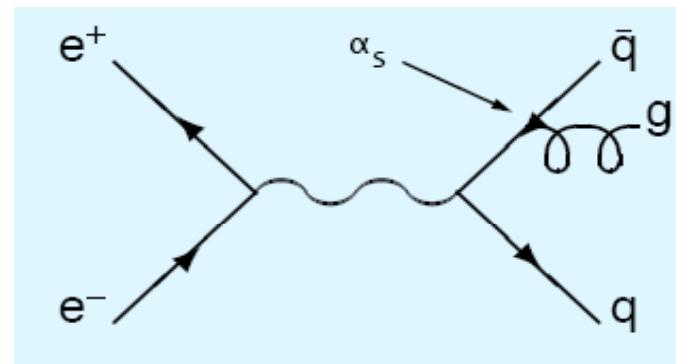
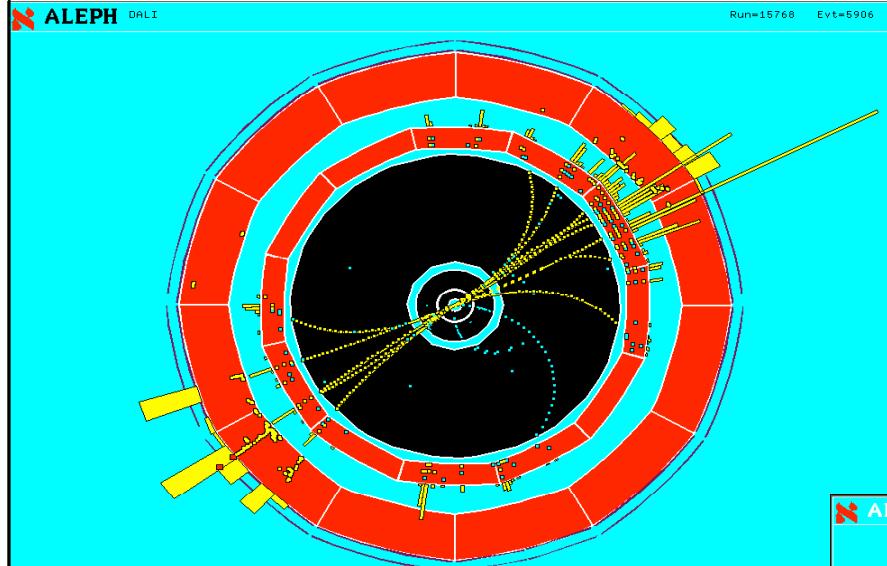


Τα γκλουόνια είναι σαν λάστιχα που έχουν κουαρκ στα άκρα τους (δεν υπάρχουν ελεύθερες άκρες). Άμα τραβήξουμε με μεγάλη δύναμη μπορούμε να σπάσουμε αυτά τα λάστιχα αλλά πάλι δεν θα έχουμε ελεύθερες άκρες



Γ. Τσιπολίτης

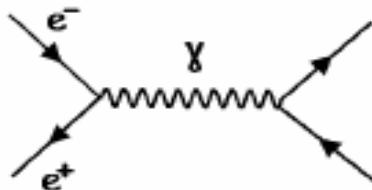
πίδακες (jets)



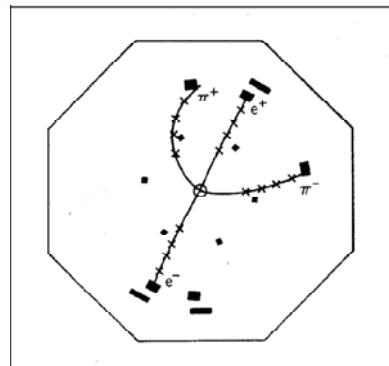
Γ. Τσιπολίτης

Charm

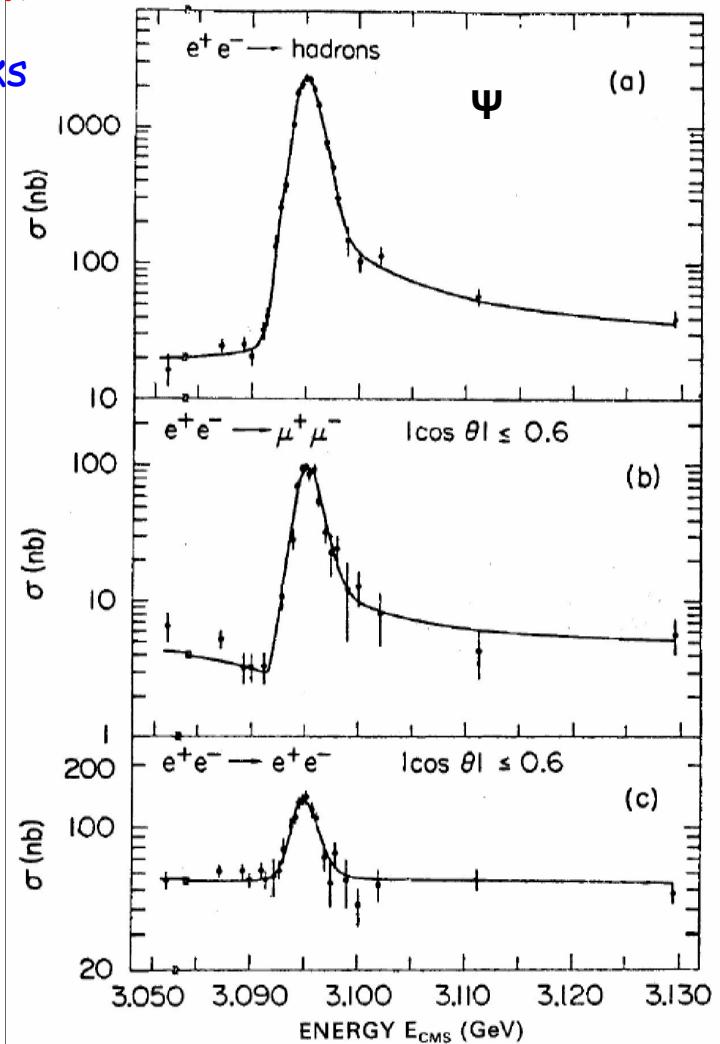
- Μέχρι το 1974 είχαμε μόνο τα u, d, s quarks
- Στο SLAC μελετώντας
 $e^+e^- \rightarrow \text{αδρόνια}$
 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



παρατηρήθηκε ένας λεπτός συντονισμός με μεγάλη μάζα 3,1 GeV



Γ. Τσιπολίτης

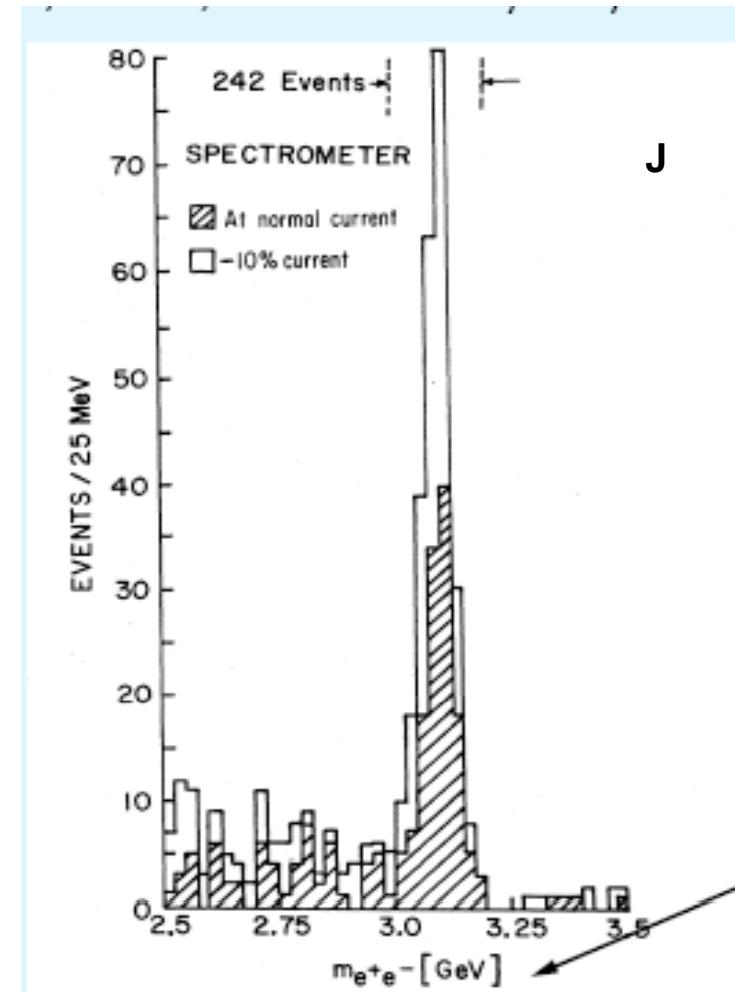


Charm

- Συγχρόνως στο BNL μελετώντας



βρήκε ένα λεπτό συντονισμό με μάζα
3,1 GeV



Γ. Τσιπολίτης

ΤΟ ΠΛÁΤΟΣ ΤΟΥ J/ψ

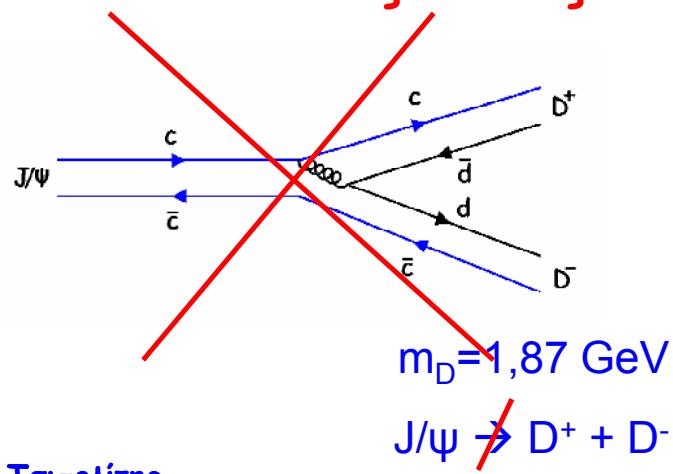
- Το πλάτος του J/ψ είναι μικρότερο από το μετρούμενο (διακριτική ικανότητα ανιχνευτή). Το πραγματικό πλάτος είναι

$$\Gamma \sim 0,067 \text{ MeV}$$

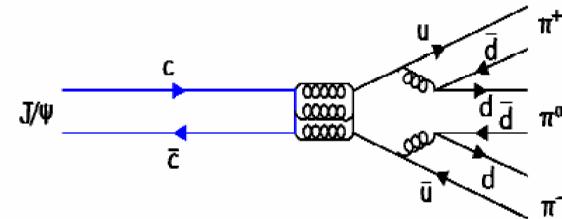
$$\text{πλάτος } \Gamma \times \text{χρόνος ζωής } \tau \sim \hbar \\ \Rightarrow \text{μεγάλος χρόνος ζωής}$$

Γενικά θα περιμέναμε ένα τόσο βαρύ σωματίδιο να διασπάται σε πιόνια μέσω ισχυρών αλληλεπιδράσεων πολύ γρήγορα.

νέος τύπος κουάρκ - c , $m_c \sim 1,5 \text{ GeV}$



Γ. Τσιπολίτης

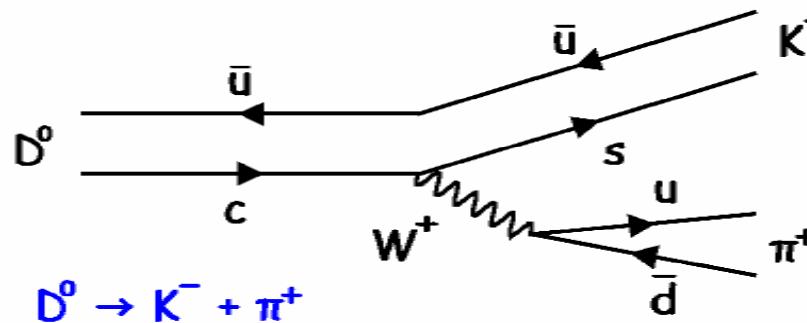


C και P χρειάζεται μονο αριθμό γκλουονίων $\rightarrow \alpha_s^3$
κανόνας του Zweig

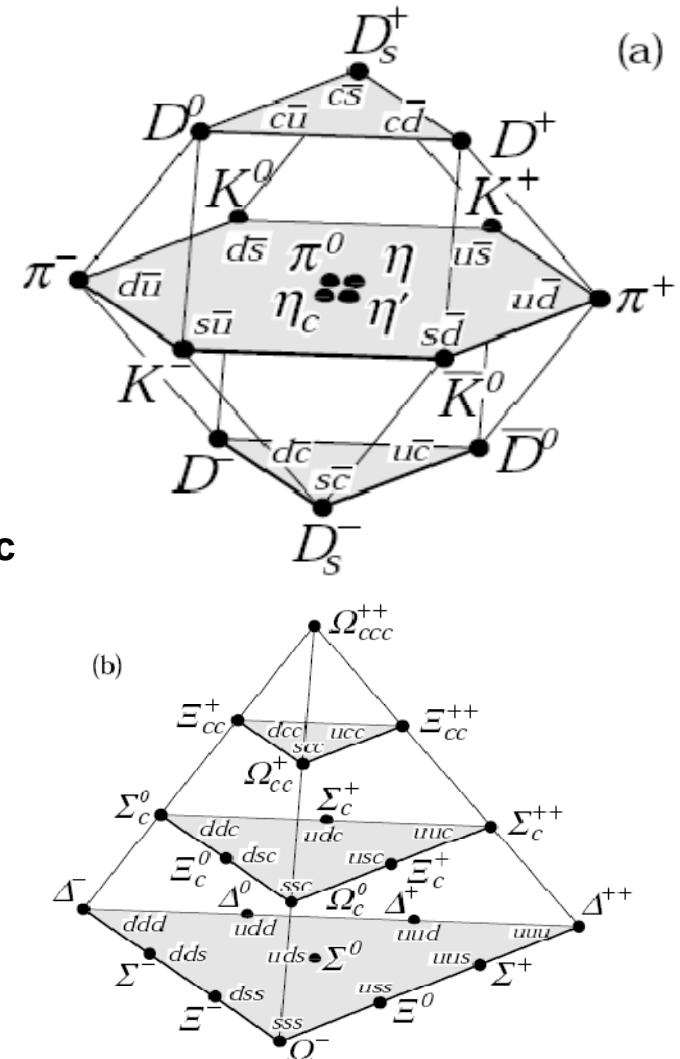
Αδρόνια με charm

Ο κβαντικός αριθμός του "charm" διατηρείται στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις

άρα έχουμε διασπάσεις κυρίως μέσω ασθενών
αλληλεπιδράσεων

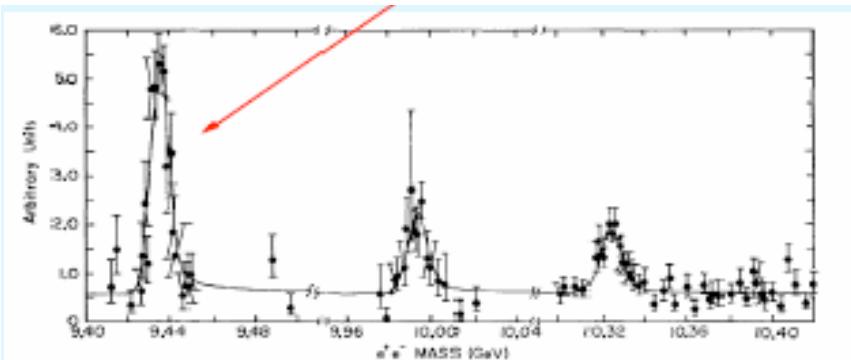


Γ. Τσιπολίτης

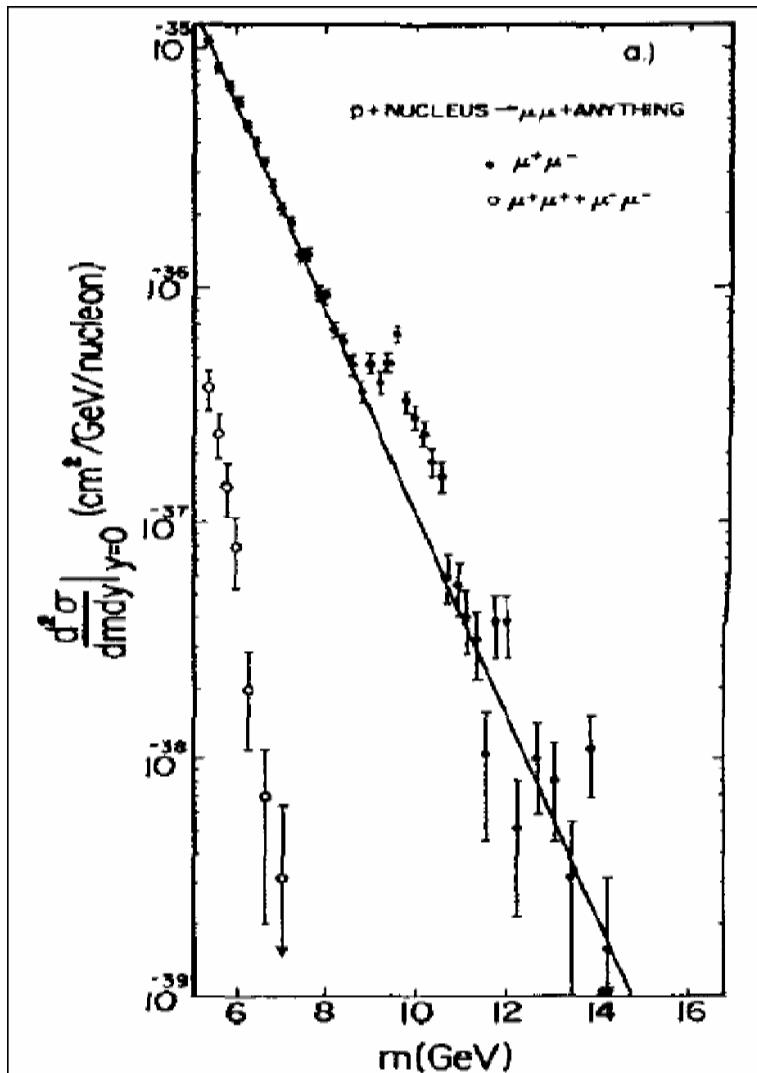


b κουαρκ

- Στο Fermilab το 1977 σε αλληλεπιδράσεις
 $p + \text{nucleus} \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \text{Αδρόνια}$
 παρατηρήθηκε ο συντονισμός Υ στα
 10 GeV
 b κουαρκ $m_b \sim 5 \text{ GeV}$



Γ. Τσιπολίτης

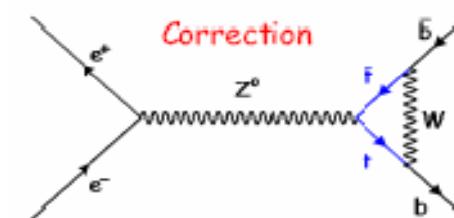
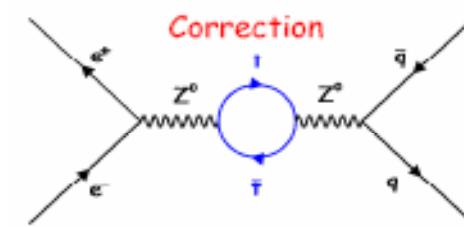
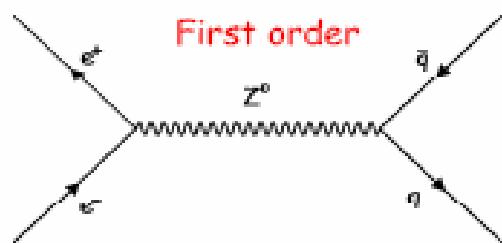


t quark

- Μετά το 1977 είχαμε:

Κουάρκ	u	c	?
	d	s	b
Λεπτόνια	e	μ	T
	ν_e	ν_μ	ν_T

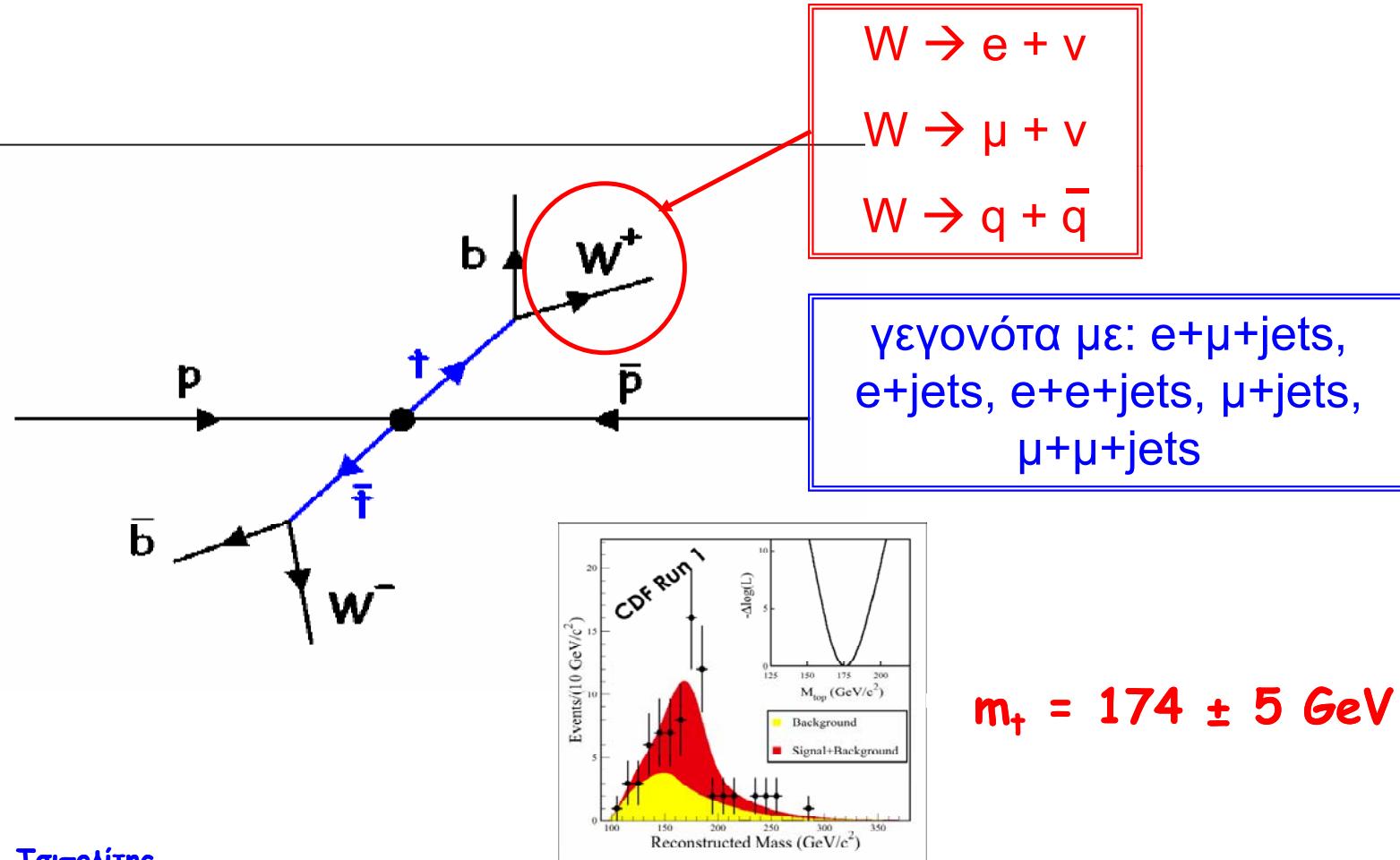
- στις αρχές του '90 από τις ακριβείς μετρήσεις των διασπάσεων του Z^0 στο LEP είχαμε ενδείξεις ότι $m_t \sim 170 \text{ GeV}$



Γ. Τσιπολίτης

Ανακάλυψη του τ

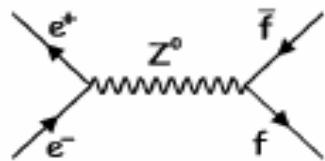
- το 1995 τα πειράματα CDF και D0 παρατήρησαν για πρώτη φορά το τ quark



Γ. Τσιπολίτης

περισσότερα κουαρκ :

- έχουμε 3 οικογένειες αν και στον κόσμο όπως τον γνωρίζουμε χρειαζόμαστε μόνο μια (u,d,e,ν_e). Γιατί όμως 3 ;
- δεν υπάρχει κάποιος θεωρητικός λόγος. Πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι είναι 3.

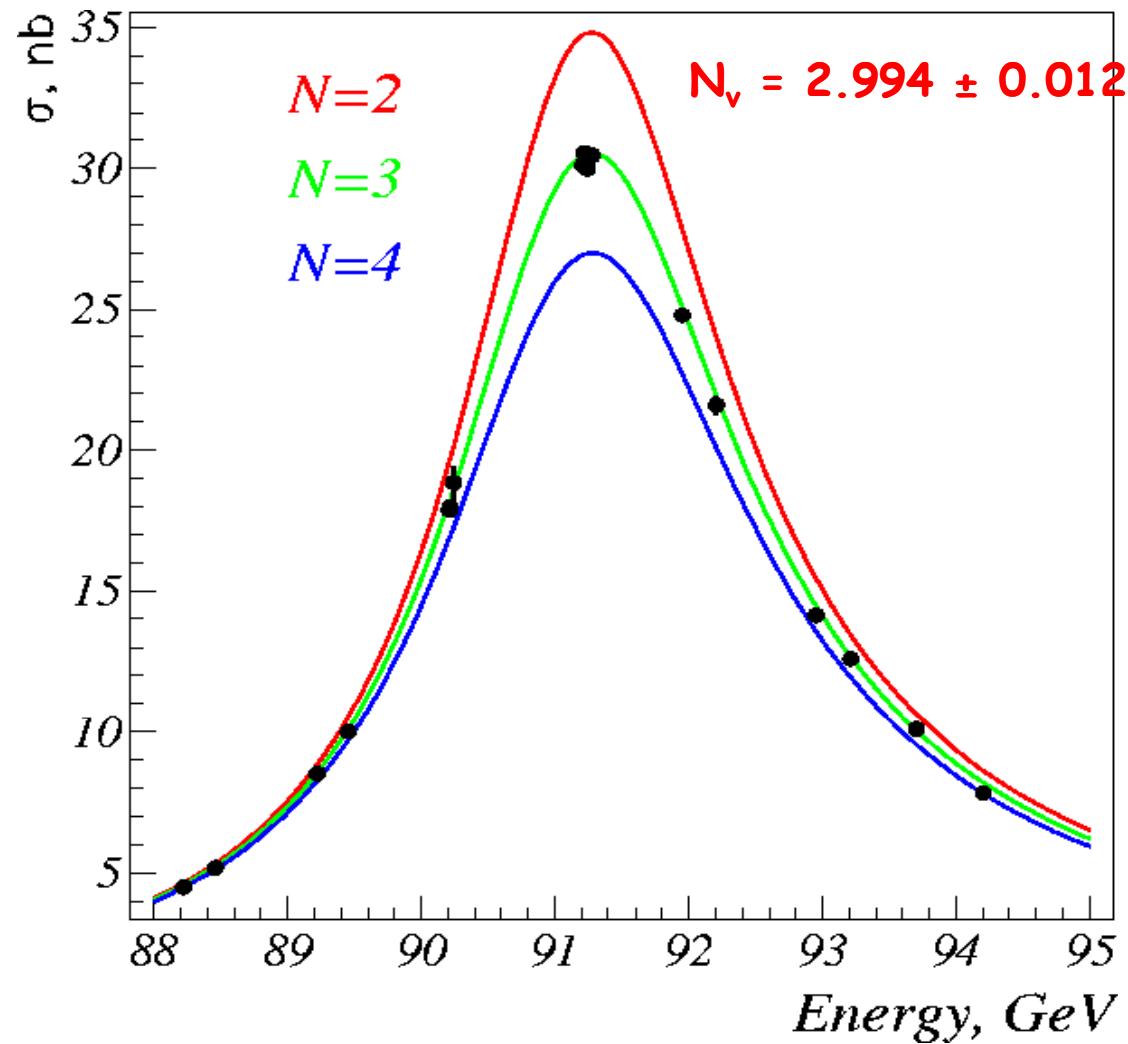


όσο περισσότερους τρόπους για διάσπαση έχουμε για το Z^0 τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ζωής του και τόσο μεγαλύτερο το πλάτος του Γ ($\Gamma \sim \hbar$)

$$f=u,d,s,c,b,e,\mu,\tau,\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{Z^0} = & \Gamma_{u\bar{u}} + \Gamma_{d\bar{d}} + \Gamma_{s\bar{s}} + \Gamma_{c\bar{c}} + \Gamma_{b\bar{b}} \\ & + \Gamma_{e^+e^-} + \Gamma_{\mu^+\mu^-} + \Gamma_{\tau^+\tau^-} + N_V \Gamma_{V\bar{V}} \end{aligned}$$

Μόνο 3 οικογένειες



Γ. Τσιπολίτης