



Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН
«Физика фундаментальных взаимодействий»,
посвящённая 70-летию В.А. Рубакова

Москва, 18 февраля 2025

Неожиданное проявление конфаймента: водородоподобная симметрия в спектрах лёгких мезонов

Сергей Афонин

Санкт-Петербургский государственный
университет



НИЦ Курчатовский институт:
Петербургский институт ядерной физики



Лёгкие нестранные мезоны в Particle Data

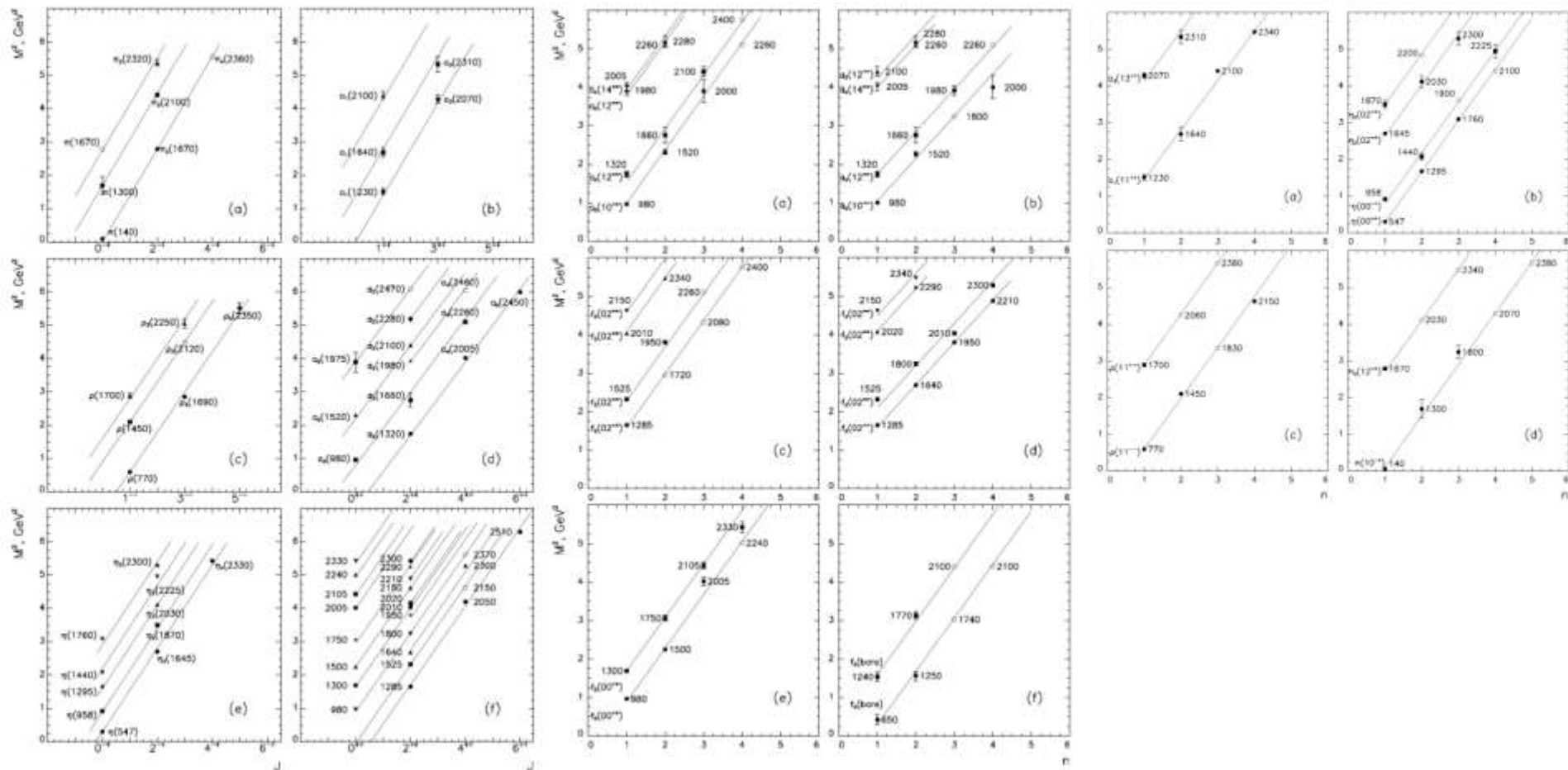
CRYSTAL BARREL (1.9-2.4 ГэВ)

A.V. Anisovich, V.V. Anisovich and A.V. Sarantsev, PRD (2000)

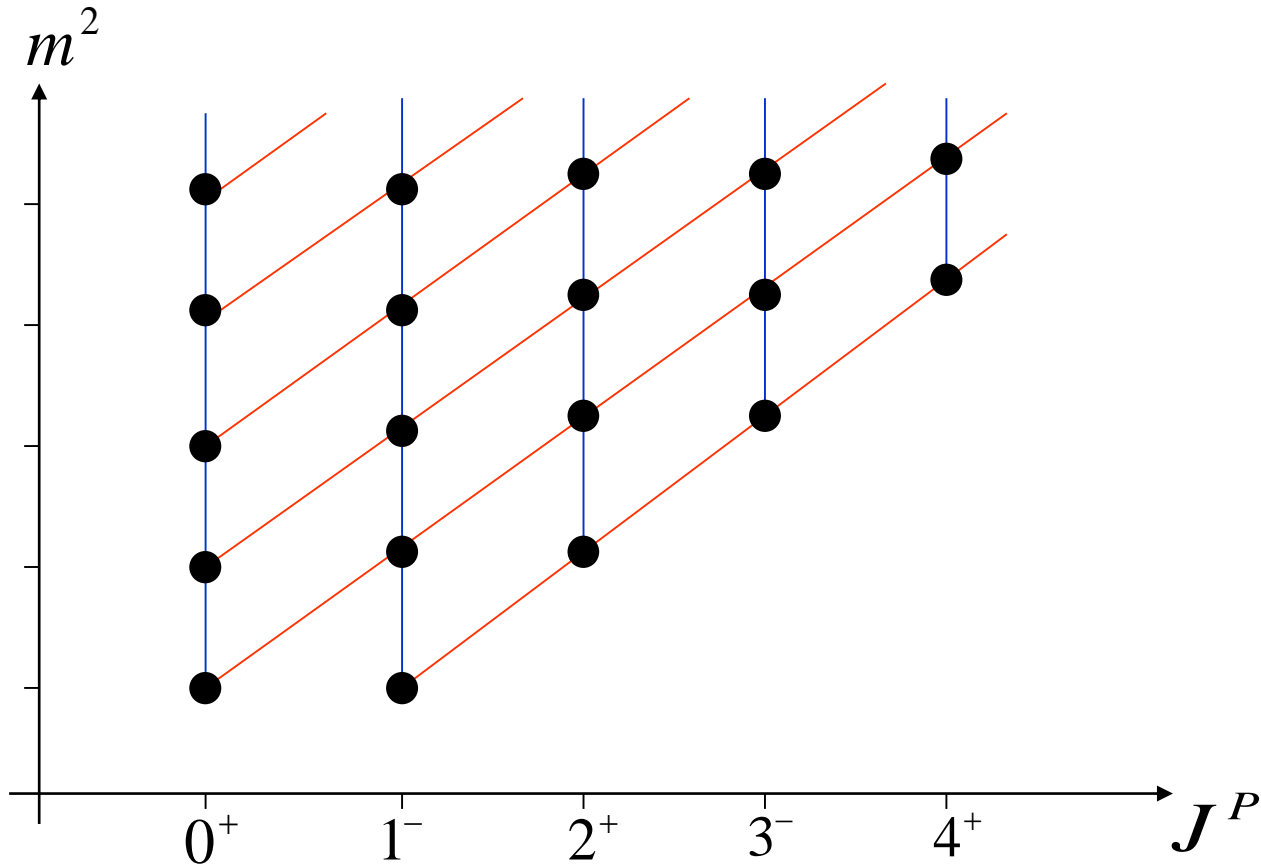
V.V. Anisovich, Phys. Usp. 47 (2004) 45

D.V. Bugg, Phys. Rept. (2004)

Реджевское поведение!



Линейные траектории: реджевские и радиальные

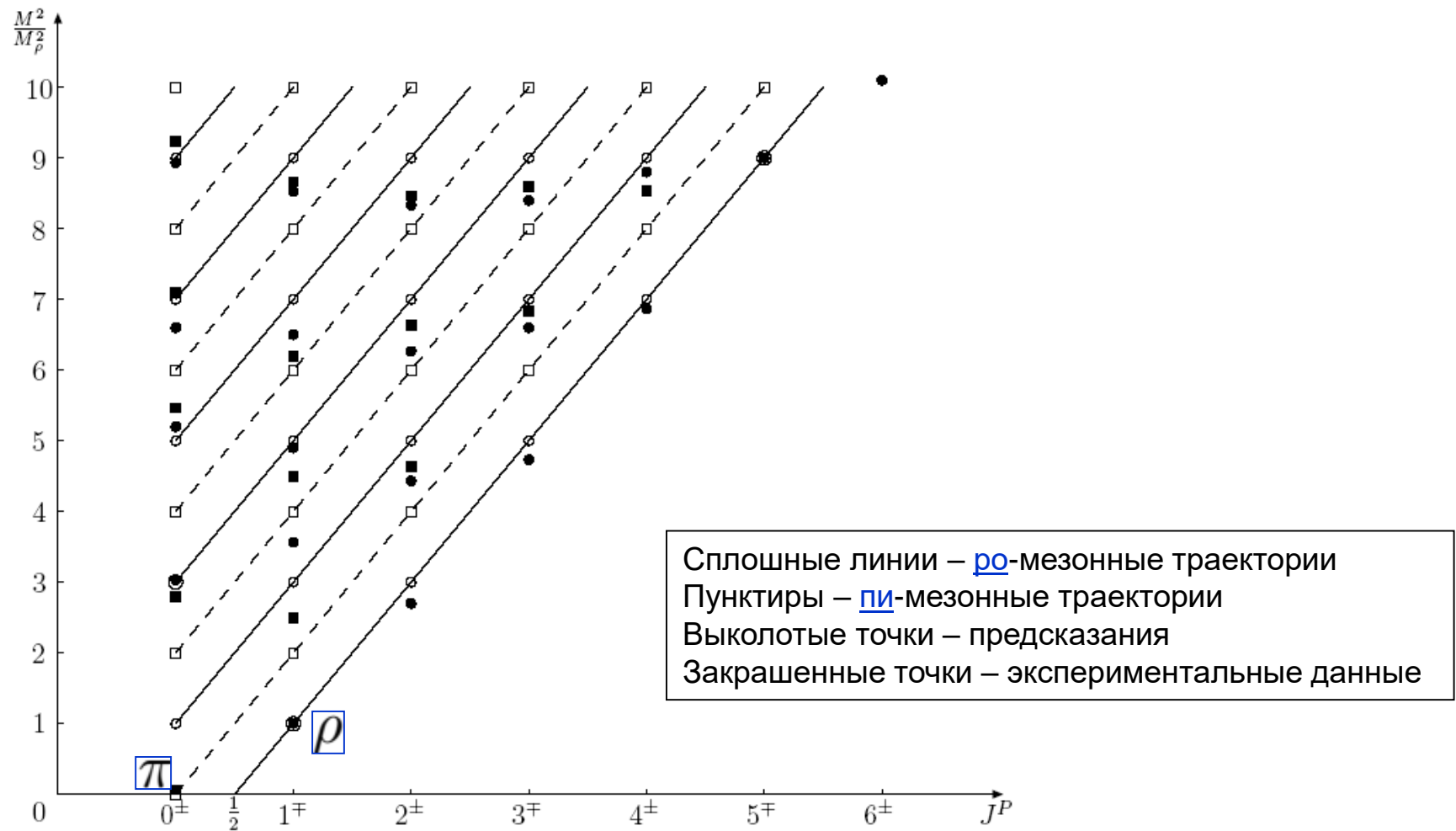


$m^2(J) = m_0^2 + \alpha' J$ — Траектории Редже (линейные)

$m^2(n) = \mu_0^2 + \alpha n$ — Радиальные траектории Редже

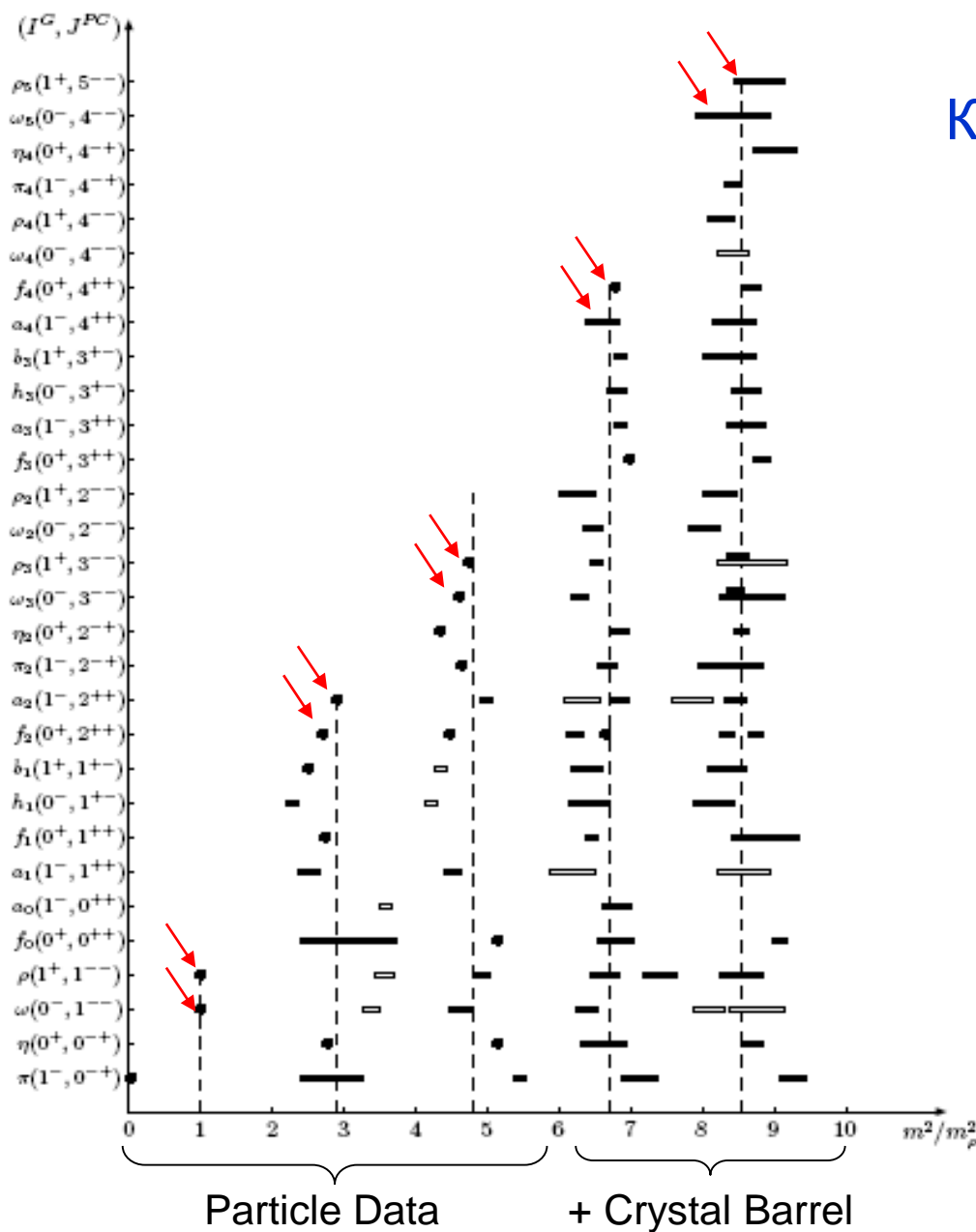
На сколько экспериментальные данные соответствуют предсказаниям этой картины, типично даваемой дуальными амплитудами типа Венециано и моделями адронных струн?

Спектр амплитуды Адемолло-Венециано-Вайнберга и экспериментальные данные



S. S. Afonin, *Experimental indication on chiral symmetry restoration in meson spectrum*, Phys. Lett. B **639** (2006), 258-262, [hep-ph/0603166]

Кластеризация лёгких мезонов



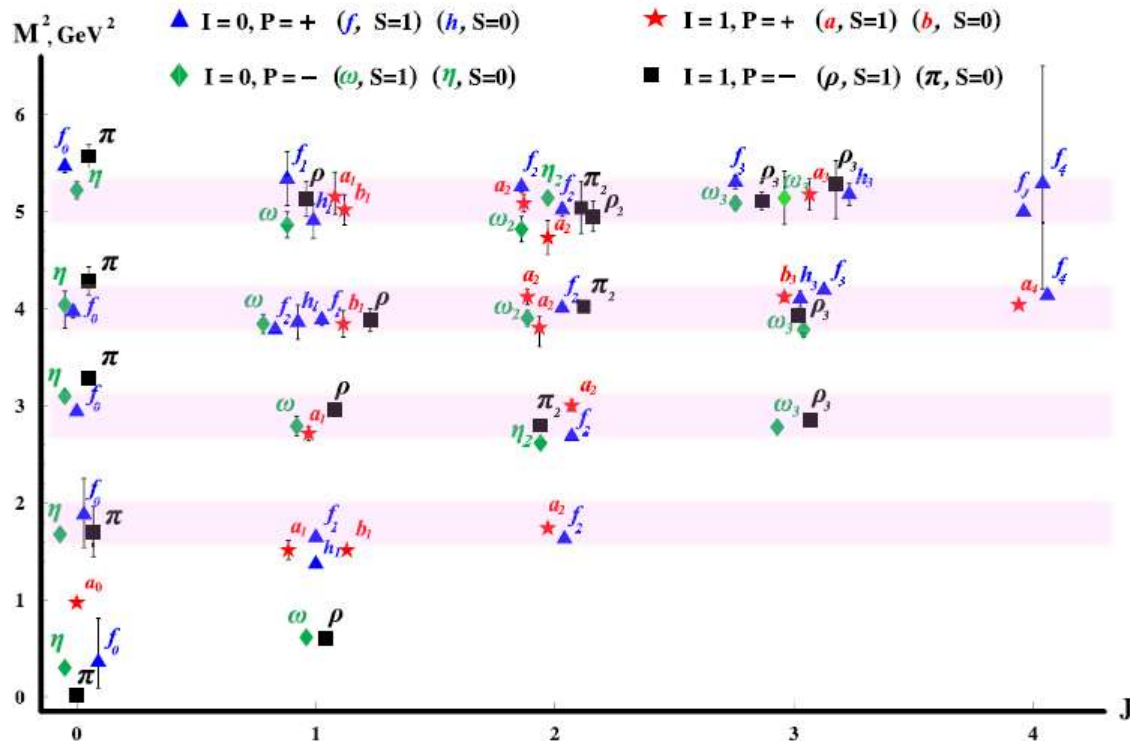
Особенности:

1. Вырожденность по спину
2. Систематическое появление резонансов без вырожденных партнёров по чётности
3. Соотношение $M^2(J, n) \sim J + n$ не описывает спектр
4. В спектре нет асимптотического восстановления киральной симметрии

$$SU(2)_L \times SU(2)_R$$

Highly excited mesons, linear Regge trajectories, and the pattern of the chiral symmetry realization

M. Shifman and A. Vainshtein

William I. Fine Theoretical Physics Institute, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455, USA

10 Conclusions

This article grew as a continuation of the ongoing heated debate in the literature regarding asymptotic symmetries of the meson spectrum in QCD [2, 5–8, 25, 33, 37, 46, 47], and numerous discussions of this issue at various conferences. At an early stage we believed that χ SR could be natural in QCD. Further more careful studies made us change our minds.

Классификация лёгких нестранных мезонов по квантовым числам (L, n)

$L \backslash n$	0	1	2	3	4
0	$\pi(140)$ $\eta(548)(?)$ $\rho(770)$ $\omega(782)$	$\pi(1300)$ $\eta(1295)(??)$ $\rho(1450)$ $\omega(1420)$	$\pi(1800)$ $\eta(1760)$ $\rho(?)$ $\omega(?)$	$\pi(2070)$ $\eta(2010)$ $\rho(1900)$ $\omega(?)$	$\pi(2360)$ $\eta(2285)$ $\rho(2150)$ $\omega(2205)(?)$
1	$f_0(1370)$ $a_0(1450)(??)$ $a_1(1260)$ $f_1(1285)$ $b_1(1230)$ $h_1(1170)$ $a_2(1320)$ $f_2(1275)$	$f_0(1770)$ $a_0(?)$ $a_1(1640)$ $f_1(?)$ $b_1(1620)(?)$ $h_1(1595)(?)$ $a_2(1680)$ $f_2(1640)$	$f_0(2020)$ $a_0(2025)$ $a_1(1930)(?)$ $f_1(1971)$ $b_1(1960)$ $h_1(1965)$ $a_2(1950)(?)$ $f_2(1934)$	$f_0(2337)$ $a_0(?)$ $a_1(2270)(?)$ $f_1(2310)$ $b_1(2240)$ $h_1(2215)$ $a_2(2175)(?)$ $f_2(2240)$	
2	$\rho(1700)$ $\omega(1650)$ $\pi_2(1670)$ $\eta_2(1645)$ $\rho_2(?)$ $\omega_2(?)$ $\rho_3(1690)$ $\omega_3(1670)$	$\rho(2000)$ $\omega(1960)$ $\pi_2(2005)$ $\eta_2(2030)$ $\rho_2(1940)$ $\omega_2(1975)$ $\rho_3(1982)$ $\omega_3(1945)$	$\rho(2265)$ $\omega(2295)(?)$ $\pi_2(2245)$ $\eta_2(2267)$ $\rho_2(2225)$ $\omega_2(2195)$ $\rho_3(2300)(?)$ $\omega_3(2285)$		
3	$f_2(2001)$ $a_2(2030)$ $f_3(2048)$ $a_3(2031)$ $b_3(2032)$ $h_3(2025)$ $f_4(2018)$ $a_4(2005)$	$f_2(2293)$ $a_2(2255)$ $f_3(2303)$ $a_3(2275)$ $b_3(2245)$ $h_3(2275)$ $f_4(2283)$ $a_4(2255)$			
4	$\rho_3(2260)$ $\omega_3(2255)$ $\rho_4(2230)$ $\omega_4(2250)(?)$ $\pi_4(2250)$ $\eta_4(2328)$ $\rho_5(2300)$ $\omega_5(2250)$				

S. S. Afonin, *Towards understanding spectral degeneracies in nonstrange hadrons. Part I. Mesons as hadron strings versus phenomenology*, Mod. Phys. Lett. A **22** (2007), 1359-1372, [hep-ph/0701089]

Классификация, согласно современным данным

L \ n	0	1	2	3	4
0	-	$\pi(1300)$ $\rho(1450)$ $\omega(1420)$ $\eta(1295)$	$\pi(1800)$ $\eta(1760)$	$\pi(2070)$ $\eta(2010)$ $\rho(1900)$	$\pi(2360)$ $\omega(2205)$ $\rho(2150)$ $\rho(2270)$ $\eta(2100)$ $\eta(2285)$
1	$f_0(1370)$ $h_1(1170)$ $a_2(1320)$ $b_1(1230)$ $b_1(1235)$ $f_2(1275)$ $f_2(1270)$ $a_0(1450)$ $a_1(1260)$ $f_1(1285)$	$a_0(1710)$ $f_0(1770)$ $a_1(1640)$ $b_1(1620)$ $h_1(1595)$ $f_2(1640)$ $a_2(1680)$ $a_2(1700)$	$f_0(2020)$ $b_1(1960)$ $h_1(1965)$ $a_2(1950)$ $f_2(1934)$ $f_2(2010)$ $a_1(1930)$ $f_1(1970)$ $a_0(2025)$	$f_0(2337)$ $b_1(2240)$ $h_1(2215)$ $f_2(2240)$ $a_2(2175)$ $a_2(2255)$ $a_1(2270)$ $f_1(2310)$	
2	$\pi_2(1670)$ $\eta_2(1645)$ $\rho_3(1690)$ $\omega_3(1670)$ $\rho(1700)$ $\omega(1650)$	$\rho(2000)$ $\omega_3(1945)$ $\eta_2(2030)$ $\pi_2(2005)$ $\pi_2(1880)$ $\rho_2(1940)$ $\omega_2(1975)$ $\omega(1960)$ $\rho_2(1982)$	$\omega_3(2285)$ $\pi_2(2245)$ $\pi_2(2285)$ $\eta_2(2267)$ $\eta_2(2250)$ $\rho(2270)$ $\omega(2290)$ $\rho_2(2225)$ $\omega_2(2195)$ $\rho_2(2300)$		
3	$h_3(2025)$ $b_3(2032)$ $b_3(2030)$ $f_4(2018)$ $f_4(2050)$ $a_4(2005)$ $a_4(1970)$ $f_2(2010)$ $a_2(2030)$ $f_3(2048)$ $a_3(2030)$	$b_3(2245)$ $h_3(2275)$ $a_4(2255)$ $f_2(2293)$ $a_2(2255)$ $f_3(2303)$ $a_3(2275)$ $f_4(2283)$			
4	$\rho_3(2260)$ $\pi_4(2250)$ $\omega_5(2250)$ $\eta_4(2328)$ $\eta_4(2330)$ $\omega_3(2255)$ $\omega(2285)$ $\rho_4(2230)$ $\omega_4(2250)$ $\rho_5(2300)$				

$a_0(1710)$

$$1^G(J^{PC}) = 1^-(0^{++})$$

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

Evidence for this state is also inferred from the interference of the $K^+ K^-$ and $K_S^0 K_S^0$ decays of the $f_0(1710)$ in $D_s^+ \rightarrow f_0(1710)\pi^+$, leading to a relative branching ratio an order of magnitude larger than expected from isospin symmetry (ABLIKIM 22F). See also the review on "Spectroscopy of Light Meson Resonances."

 $a_0(1710)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
1713 ± 19 OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 3.8. See the ideogram below.		
$1736 \pm 10 \pm 12$	¹ AAIJ	23AH LHCb	$B^+ \rightarrow K^+(K_S^0 K \pi)$
$1817 \pm 8 \pm 20$	² ABLIKIM	22AH BES3	$D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$
$1704 \pm 5 \pm 2$	LEES	21A BABR	$\eta_c(1S) \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$

¹ From Dalitz plot analyses of $\eta_c(1S, 2S) \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^- + \text{c.c.}$

² Observed to decay into $K_S^0 K^+$ in a Breit-Wigner amplitude analysis involving D_s^+ decays into $\bar{K}^*(892)^0 K^+$, $\bar{K}^*(892)^+ K_S^0$, $\bar{K}^*(1410)^0 K^+$, $a_0(980)^+ \pi^0$, and $a_0(1817)^+ \pi^0$.

В среднем (в ГэВ^2): $\bar{M}^2(L, n) \approx 1.1L + 1.1n + 0.7$

\Rightarrow Работает закон $M^2(L, n) \sim L + n$

В нерелятивистском атоме водорода:

$E \sim \frac{1}{N^2}$, $N = L + n + 1$ - главное квантовое число

В спектре лёгких мезонов имеется главное квантовое число

Существование состояний, не имеющих вырожденных партнёров по чётности, следует из определения самой чётности,

$$P = (-1)^{L+1}$$

Мезоны на главной траектории имеют $n=0$, поэтому таких партнёров быть не может.

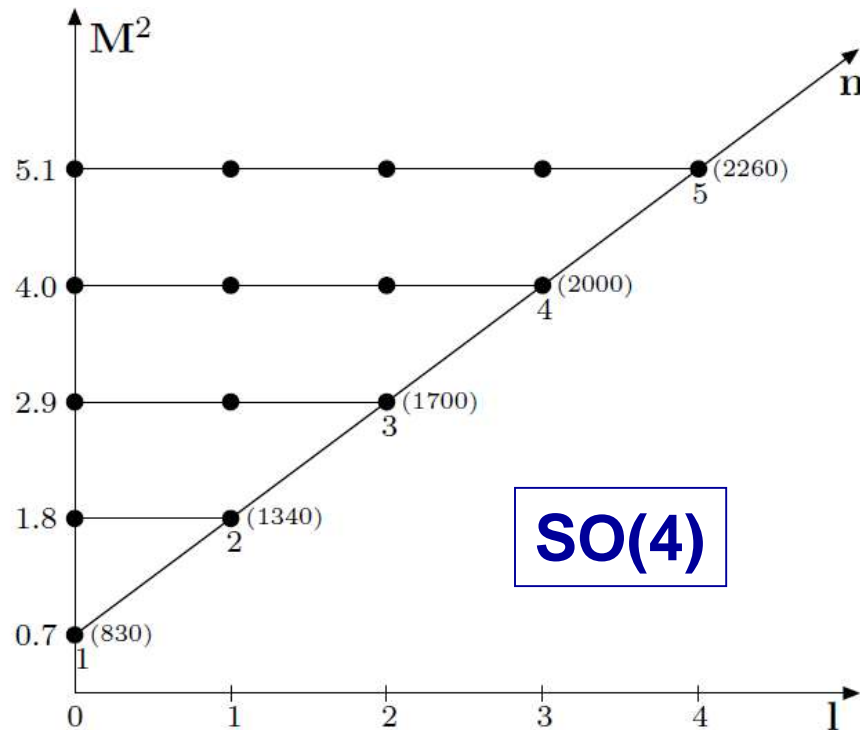
Например: ρ -мезон, $(L, n) = (0, 0)$, a_1 -мезон, $(L, n) = (1, 0)$, вырожден с ρ' , $(0, 1)$.

Потенциальные модели не могут объяснить наличие наблюдаемого вырождения.

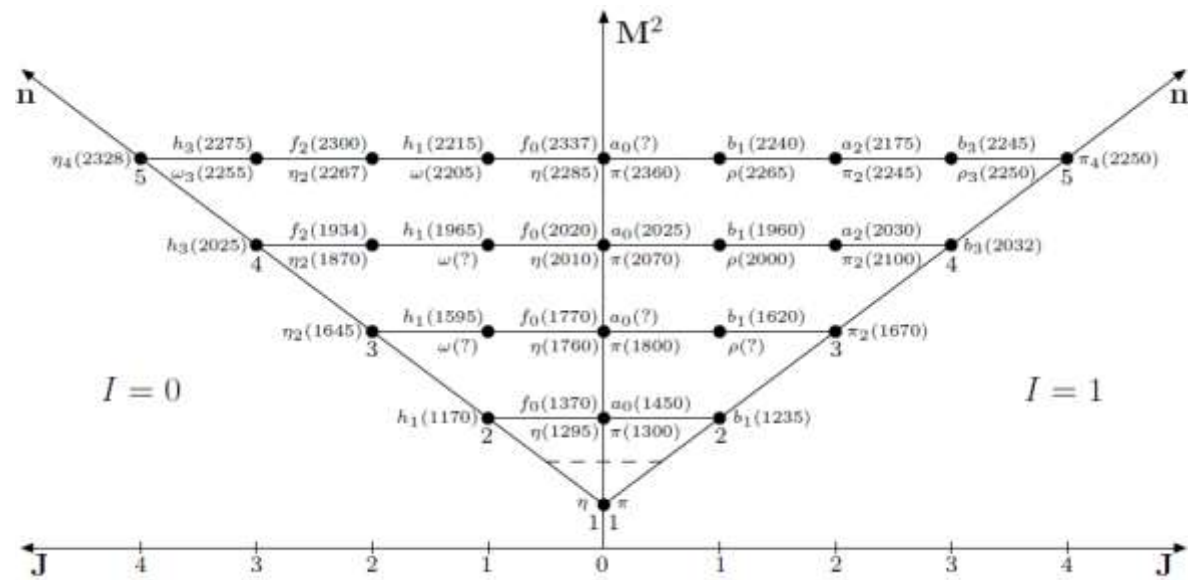
ДИНАМИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ АТОМА ВОДОРОДА

$$E(L, n) \sim \frac{1}{N^2}, \quad N = L + n + 1$$

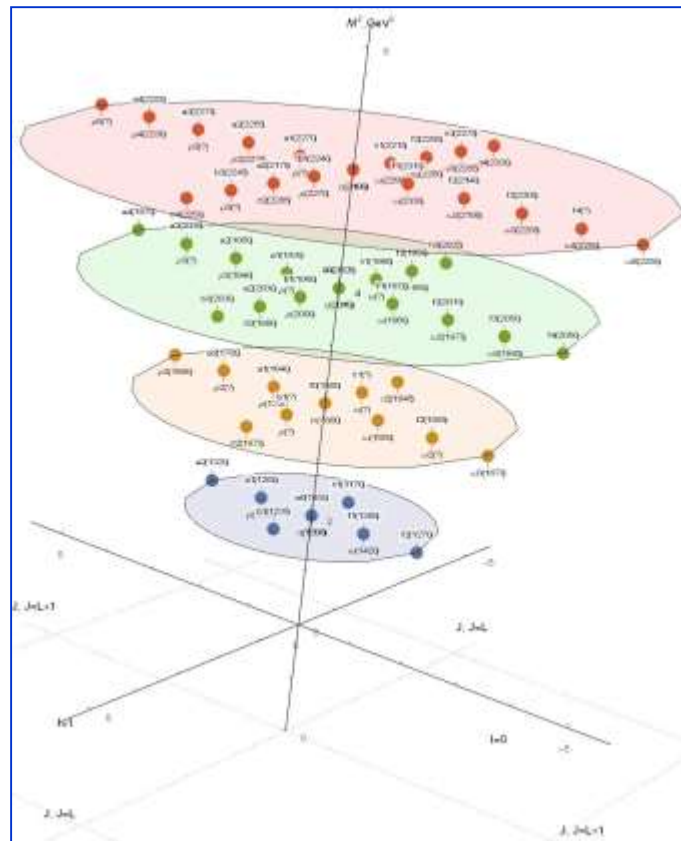
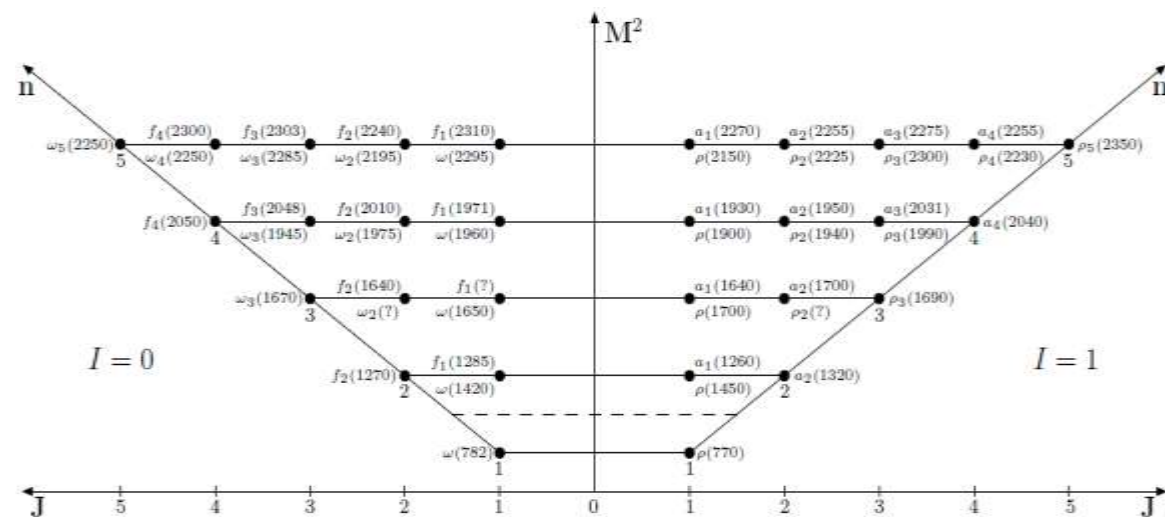
Фок: имеет место более сильная симметрия, чем $SO(3)$.
Это **$SO(4)$** симметрия в импульсном пространстве.
(V.A. Fock, Z. Phys. 98 (1935) 145)



$$J = L$$



$$J = L + 1$$



Вариант “Таблицы Менделеева” для лёгких мезонов (без странного кварка)

L	S	J	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
0	0	0	π η	$\pi(1300)$ $\eta(1295)$	$\pi(1800)$ $\eta(1760)$	$\pi(2070)$ $\eta(2010)$	$\pi(2360)$ $\eta(2320)$
	1	1	ρ ω	$\rho(1450)$ $\omega(1420)$	$\rho(1700)$ $\omega(1650)$	$\rho(2000)$ $\omega(1960)$	$\rho(2270)$ $\omega(2290)$
1	0	1	$b_1(1235)$ $h_1(1170)$	$b_1?$ $h_1(1595)$	$b_1(1960)$ $h_1(1965)$	$b_1(2240)$ $h_1(2215)$	
		0	$a_0(1450)$ $f_0(1370)$	$a_0(1710)$ $f_0(1770)$	$a_0(2020)$ $f_0(2020)$	$a_0?$ $f_0(2200)$	
	1	1	$a_1(1260)$ $f_1(1285)$	$a_1(1640)$ $f_1?$	$a_1(1930)$ $f_1(1970)$	$a_1(2270)$ $f_1(2310)$	
		2	$a_2(1320)$ $f_2(1270)$	$a_2(1700)$ $f_2(1750)$	$a_2(2030)$ $f_2(1950)$	$a_2(2255)$ $f_2(2300)$	
2	0	2	$\pi_2(1670)$ $\eta_2(1645)$	$\pi_2(2005)$ $\eta_2(2030)$	$\pi_2(2285)$ $\eta_2(2250)$		
		1	$\rho?$ $\omega?$	$\rho?$ $\omega?$	$\rho?$ $\omega(2220)$		
	1	2	$\rho_2?$ $\omega_2?$	$\rho_2(1940)$ $\omega_2(1975)$	$\rho_2(2225)$ $\omega_2(2195)$		
		3	$\rho_3(1690)$ $\omega_3(1670)$	$\rho_3(1990)$ $\omega_3(1945)$	$\rho_3(2250)$ $\omega_3(2255)$		
3	0	3	$b_3(2030)$ $h_3(2025)$	$b_3(2245)$ $h_3(2275)$			
		2	$a_2(1990)$ $f_2(2010)$	$a_2?$ $f_2?$			
	1	3	$a_3(2030)$ $f_3(2050)$	$a_3(2275)$ $f_3(2300)$			
		4	$a_4(1970)$ $f_4(2050)$	$a_4(2255)$ $f_4?$			
4	0	4	$\pi_4(2250)$ $\eta_4(2330)$				
		3	$\rho_3?$ $\omega_3(2285)$				
	1	4	$\rho_4(2230)$ $\omega_4(2250)$				
		5	$\rho_5(2350)$ $\omega_5(2250)$				

N = 0
N = 1
N = 2
N = 3
N = 4

I = 1
I = 0

N = n + L

Бледный фон – резонансы,
требующие подтверждения

Для каждого лёгкого мезона из Particle Data заново выполнен анализ на предмет включения в класс лёгких нестранных кварк-антикварковых состояний и уровень надёжности экспериментальных данных, выполнены фиты с новыми данными для реджевского соотношения

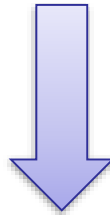
$$M^2 = al + bn_r + c$$

I	Weight	a	b	c	χ^2/DoF
1	none	1.08 ± 0.03	1.13 ± 0.03	0.69 ± 0.09	0.0052
	$1/(\Delta M_{\text{exp}}^2)^2$	1.10 ± 0.03	1.16 ± 0.03	0.63 ± 0.03	0.0050
	$1/(\Delta M^2)^2$	1.113 ± 0.005	1.126 ± 0.005	0.62 ± 0.01	0.0051
	$\exp\left(-A\frac{\Delta M_{\text{exp}}^2}{M^2}\right), A = 7$	1.08 ± 0.03	1.13 ± 0.03	0.69 ± 0.09	0.0051
0 and 1	none	1.13 ± 0.20	1.15 ± 0.04	0.58 ± 0.03	0.0045
	$1/(\Delta M_{\text{exp}}^2)^2$	1.14 ± 0.03	1.13 ± 0.04	0.51 ± 0.03	0.0057
	$1/(\Delta M^2)^2$	1.12 ± 0.11	1.16 ± 0.09	0.52 ± 0.03	0.0051
	$\exp\left(-A\frac{\Delta M_{\text{exp}}^2}{M^2}\right), A = 7$	1.13 ± 0.08	1.15 ± 0.03	0.56 ± 0.08	0.0045

Основной итог

$$M^2 \approx 1.14 \cdot N + 0.5 \quad \text{GeV}^2$$

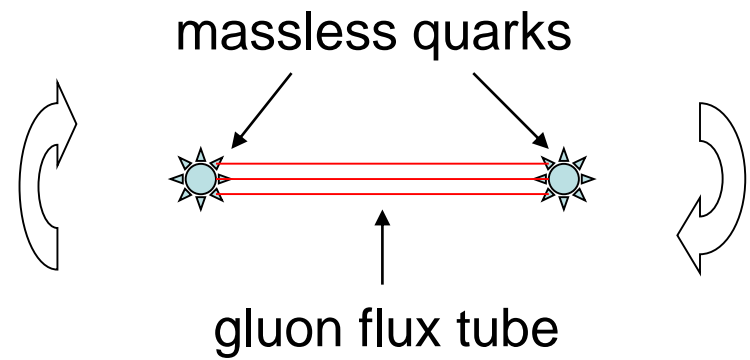
$$N \equiv l + n_r$$



Современные данные хорошо согласуются с $SO(4)$ -вырождением в спектре лёгких мезонов

A simple hadron string

Hadron string picture for mesons:



Rotating string with relativistic massless quarks at the ends

$$M^2 = 2\pi\sigma L$$

σ - string tension, L - angular momentum ($J = L, L \pm 1$)

Bohr-Sommerfeld quantization $\int p(r) dr = 2\pi \left(n + \frac{1}{2} \right)$

n - radial quantum number, $p(r)$ and r are relative momentum and distance related in the simplest case by $M = 2p + \sigma r$

Taking into account $M = l\sigma$ where l is the string length

the result is

$$M^2 = 4\pi\sigma \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

Для фермионов!

Вариант “Таблицы Менделеева” для лёгких мезонов (без странного кварка)

Бледный фон – резонансы,
требующие подтверждения

L	S	J	$n_r = 0$	$n_r = 1$	$n_r = 2$	$n_r = 3$	$n_r = 4$
0	0	0	π η	$\pi(1300)$ $\eta(1295)$	$\pi(1800)$ $\eta(1760)$	$\pi(2070)$ $\eta(2010)$	$\pi(2360)$ $\eta(2320)$
	1	1	ρ ω	$\rho(1450)$ $\omega(1420)$	$\rho(1700)$ $\omega(1650)$	$\rho(2000)$ $\omega(1960)$	$\rho(2270)$ $\omega(2290)$
1	0	1	$b_1(1235)$ $h_1(1170)$	$b_1?$ $h_1(1595)$	$b_1(1960)$ $h_1(1965)$	$b_1(2240)$ $h_1(2215)$	
	1	0	$a_0(1450)$ $f_0(1370)$	$a_0(1710)$ $f_0(1770)$	$a_0(2020)$ $f_0(2020)$	$a_0?$ $f_0(2200)$	
		1	$a_1(1260)$ $f_1(1285)$	$a_1(1640)$ $f_1?$	$a_1(1930)$ $f_1(1970)$	$a_1(2270)$ $f_1(2310)$	
		2	$a_2(1320)$ $f_2(1270)$	$a_2(1700)$ $f_2(1750)$	$a_2(2030)$ $f_2(1950)$	$a_2(2255)$ $f_2(2300)$	
2	0	2	$\pi_2(1670)$ $\eta_2(1645)$	$\pi_2(2005)$ $\eta_2(2030)$	$\pi_2(2285)$ $\eta_2(2250)$		
	1	1	$\rho?$ $\omega?$	$\rho?$ $\omega?$	$\rho?$ $\omega(2220)$		
		2	$\rho_2?$ $\omega_2?$	$\rho_2(1940)$ $\omega_2(1975)$	$\rho_2(2225)$ $\omega_2(2195)$		
		3	$\rho_3(1690)$ $\omega_3(1670)$	$\rho_3(1990)$ $\omega_3(1945)$	$\rho_3(2250)$ $\omega_3(2255)$		
3	0	3	$b_3(2030)$ $h_3(2025)$	$b_3(2245)$ $h_3(2275)$			
	1	2	$a_2(1990)$ $f_2(2010)$	$a_2?$ $f_2?$			
		3	$a_3(2030)$ $f_3(2050)$	$a_3(2275)$ $f_3(2300)$			
		4	$a_4(1970)$ $f_4(2050)$	$a_4(2255)$ $f_4?$			
4	0	4	$\pi_4(2250)$ $\eta_4(2330)$				
	1	3	$\rho_3?$ $\omega_3(2285)$				
		4	$\rho_4(2230)$ $\omega_4(2250)$				
		5	$\rho_5(2350)$ $\omega_5(2250)$				

$N = 0$
$N = 1$
$N = 2$
$N = 3$
$N = 4$

$I = 1$ $I = 0$	$N = n_r + L$
--------------------	---------------