

БЕТА-РАСПАД  $^{100}\text{Sn}$

# Discrepancy between experimental and theoretical $\beta$ -decay rates resolved from first principles

P. Gysbers<sup>1,2</sup>, G. Hagen<sup>3,4\*</sup>, J. D. Holt<sup>1</sup>, G. R. Jansen<sup>3,5</sup>, T. D. Morris<sup>3,4,6</sup>, P. Navrátil<sup>1</sup>, T. Papenbrock<sup>3,4</sup>, S. Quaglioni<sup>7</sup>, A. Schwenk<sup>8,9,10</sup>, S. R. Stroberg<sup>1,11,12</sup> and K. A. Wendt<sup>7</sup>

We present state-of-the-art computations of  $\beta$ -decays from light- and medium-mass nuclei to  $^{100}\text{Sn}$  by combining effective field theories of the strong and weak forces with powerful quantum many-body techniques

Впервые получено согласие между теоретической оценкой и “экспериментальным” значением подавления скорости разрешённого бета-распада Гамова Теллера

Экстраполяция эксперимент

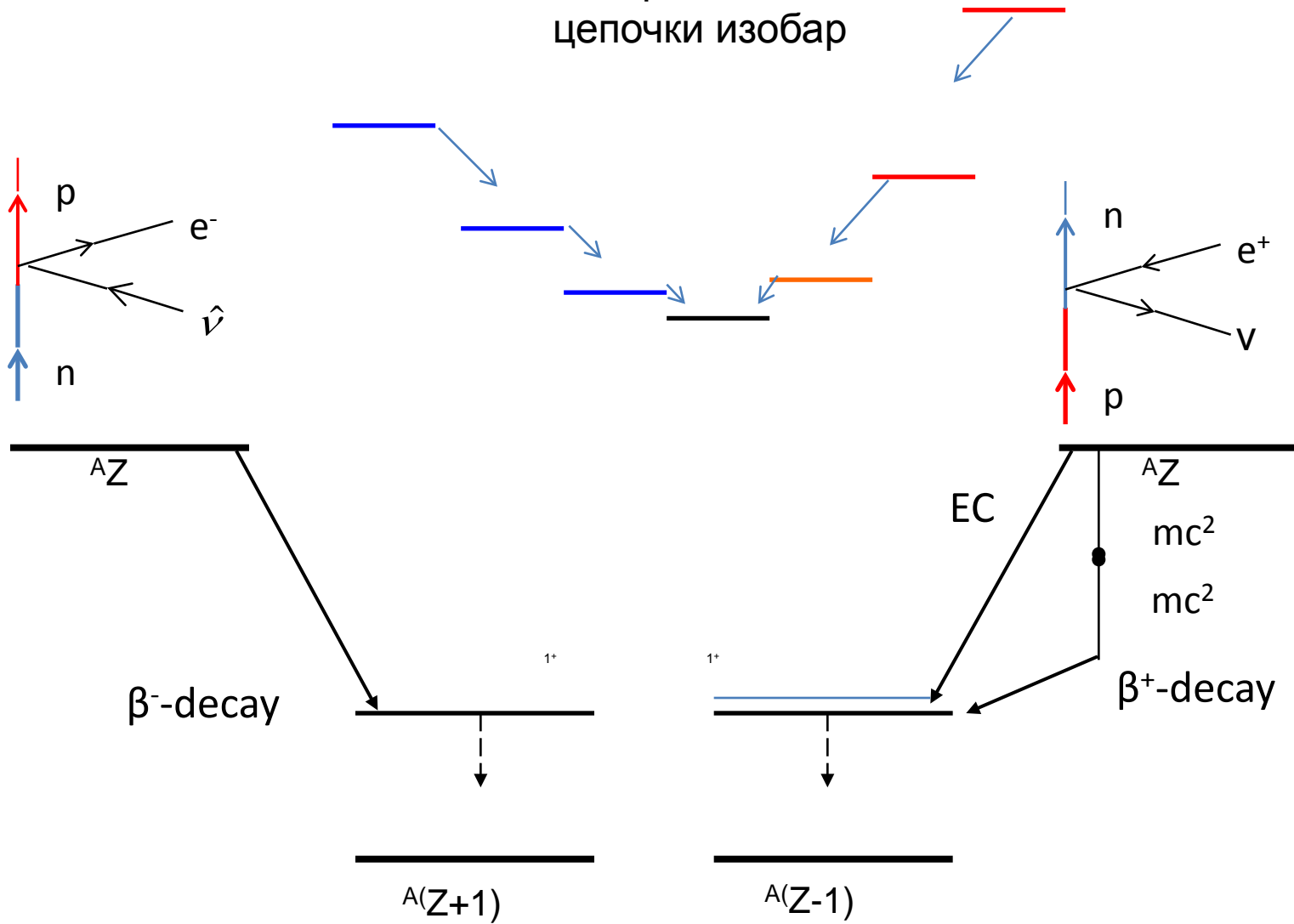
теория

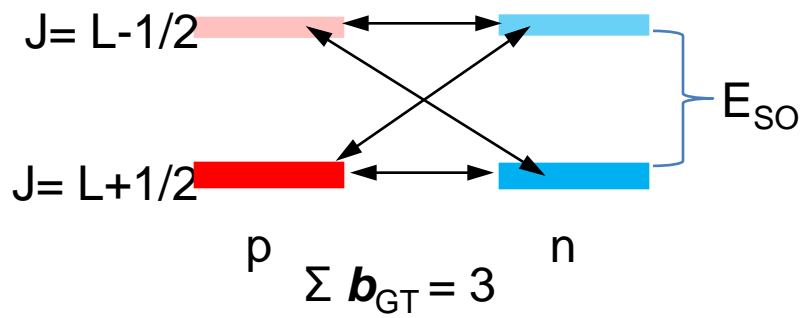
$$B_{\text{GT}} = 5.6(6)$$

$$B_{\text{GT}} = 9.1^{+4.8}_{-2.3}$$

$$5.2(5) < B_{\text{GT}} < 7.0(7)$$

# Бета распады цепочки изобар





$$\mathcal{H}_W = J_L \cdot J_H$$

$$J_n = F + GT + \dots$$

$$\hat{F} = g_V \sum_k^A t_{\pm}^{(k)}$$

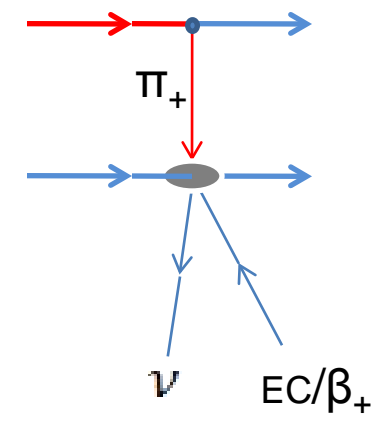
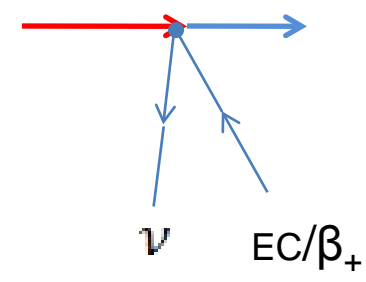
$$\widehat{GT}_{\mu}^{\pm} = g_A \sum_k^A \sigma_{\mu}^{(k)} t_{\pm}^{(k)} + \text{зарядово-обменные ТОКИ}$$

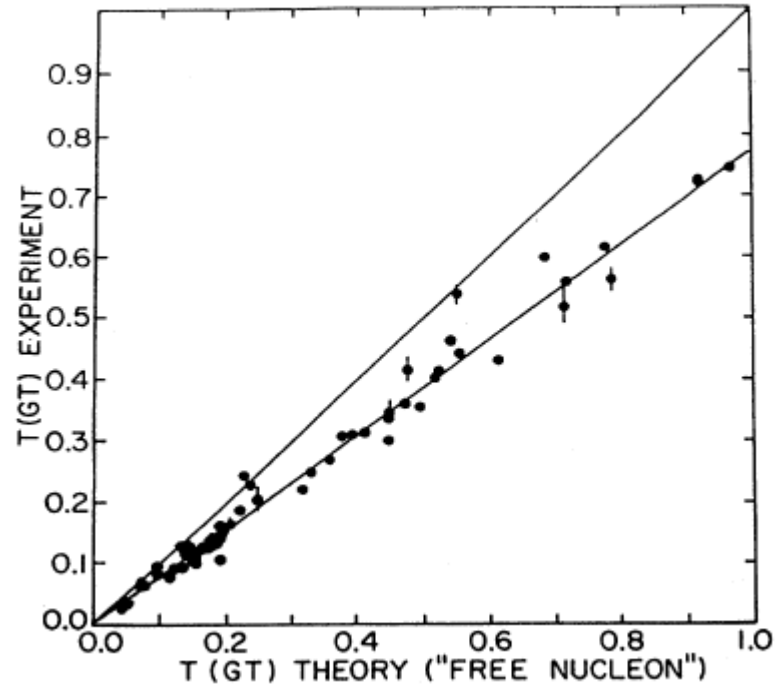
$$B_{GT}^{i,f} = \sum_{M_f, \mu} |\langle If, M_f | GT_{\mu} | I_i, M_i \rangle|^2$$

$$B_{GT}^{i,f} = \frac{3885 b^{i,f}}{f(Z, E_{\beta}) t_{1/2}}$$

$$B_{GT} = S = \sum_f B_{GT}^{i,f}$$

Правило сумм  
 $S^- - S^+ = 3(N - Z)$



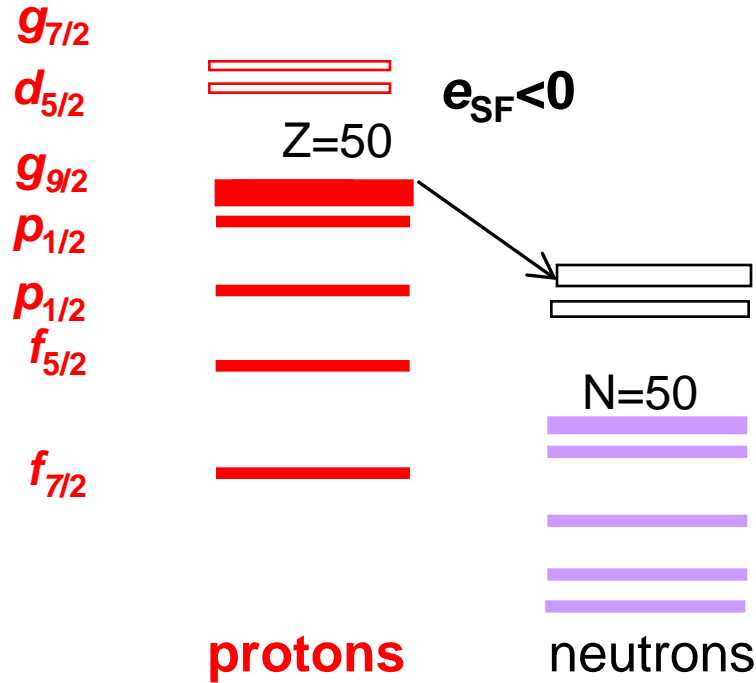


$$q = (B_{GT}^{Exp} / B_{GT}^{Th})^{1/2}$$

$$\langle q \rangle \approx 0.75$$

Brown B.A. and B.H. Wildenthal, 1988, Annu. Rev. Nucl.

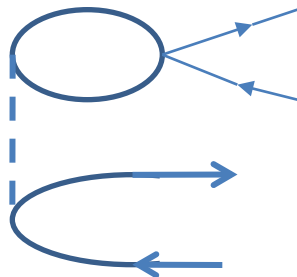
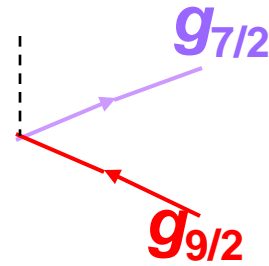
# $^{100}\text{Sn}$



- $g_{7/2}$
- $d_{5/2}$
- $g_{9/2}$
- $p_{1/2}$
- $p_{3/2}$
- $f_{5/2}$
- $f_{7/2}$

$$\Phi = [p_{7/2}, h_{9/2}]_{1+}$$

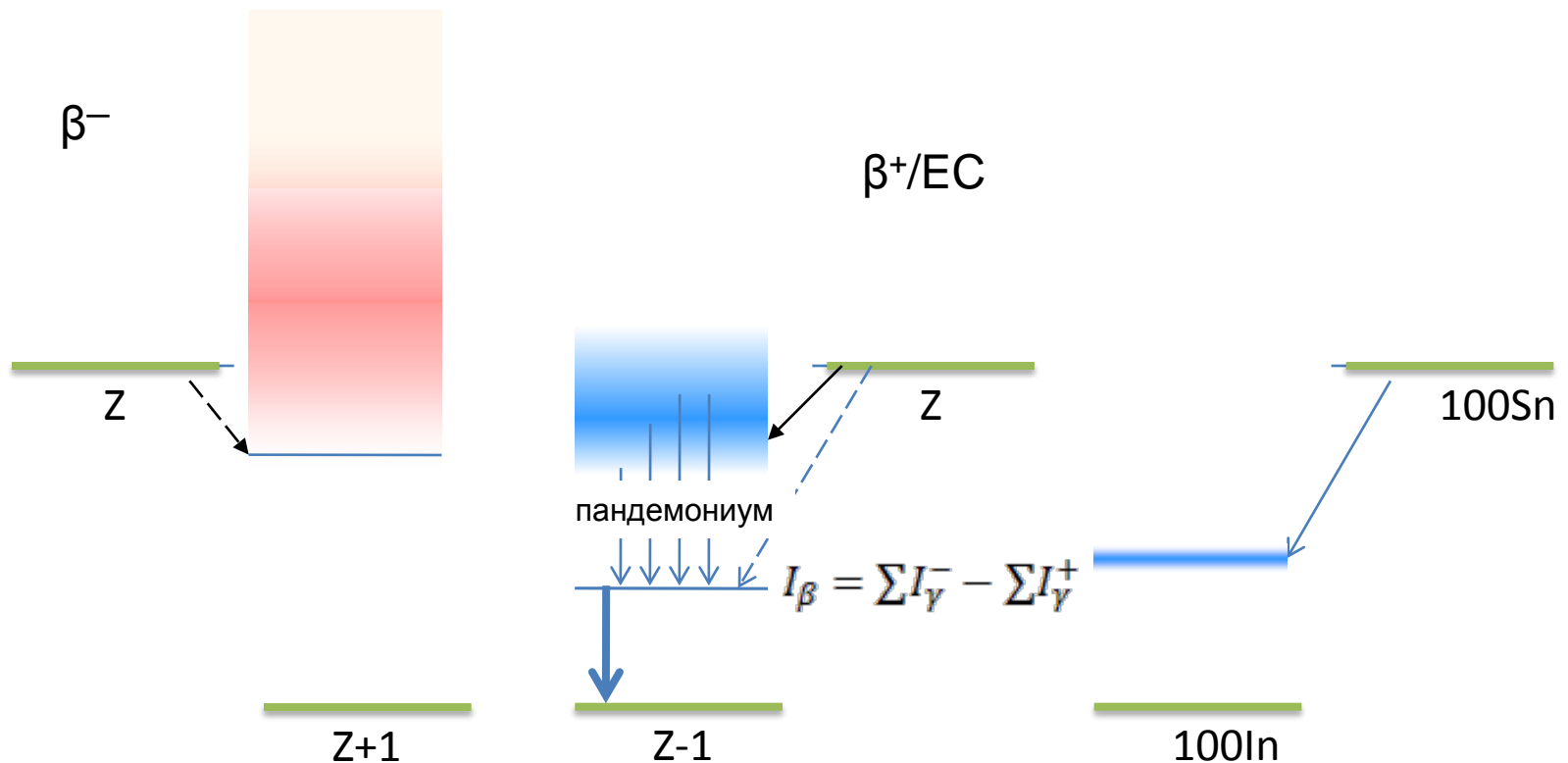
$$S_+ = S_- = b(\text{GT})_{\text{sng}} \cdot (2J+1)$$



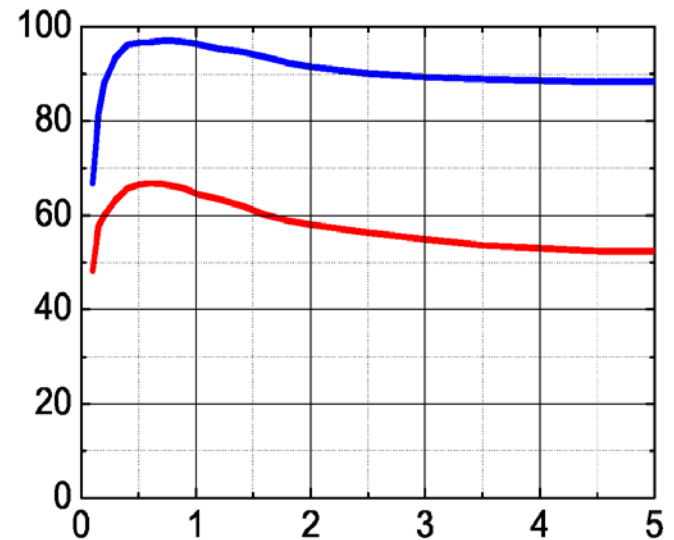
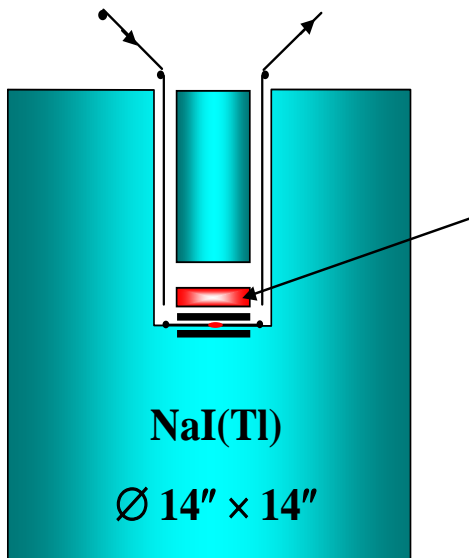
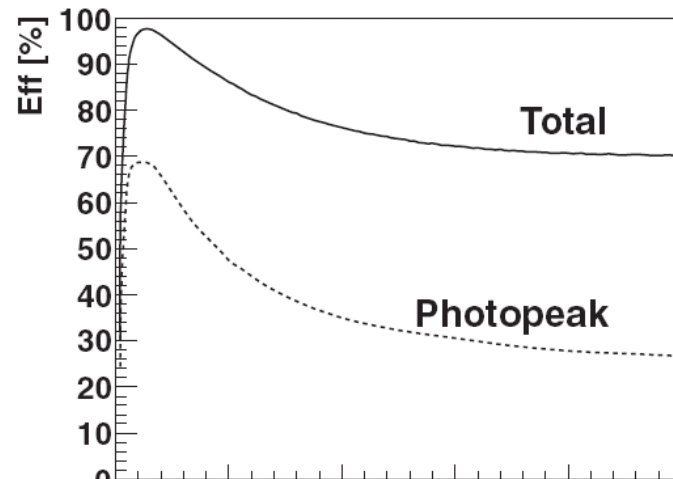
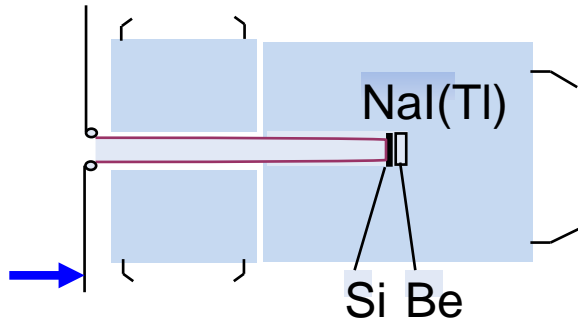
# Метод полного поглощения $\gamma$ -излучения при измерении заселений состояний при бета распаде среднетяжёлых ядер

G.D. Alkhazov, A.A. Bykov, V.D. Wittmann, Yu. V. Naumov and S. Yu. Orlov,  
Proc. 4th Int. Conf. on Nuclei Far From Stability, Helsingor, Denmark, 1981, p. 238.

область  $^{146}\text{Gd}$ ;  $Z=64$   $N=82$

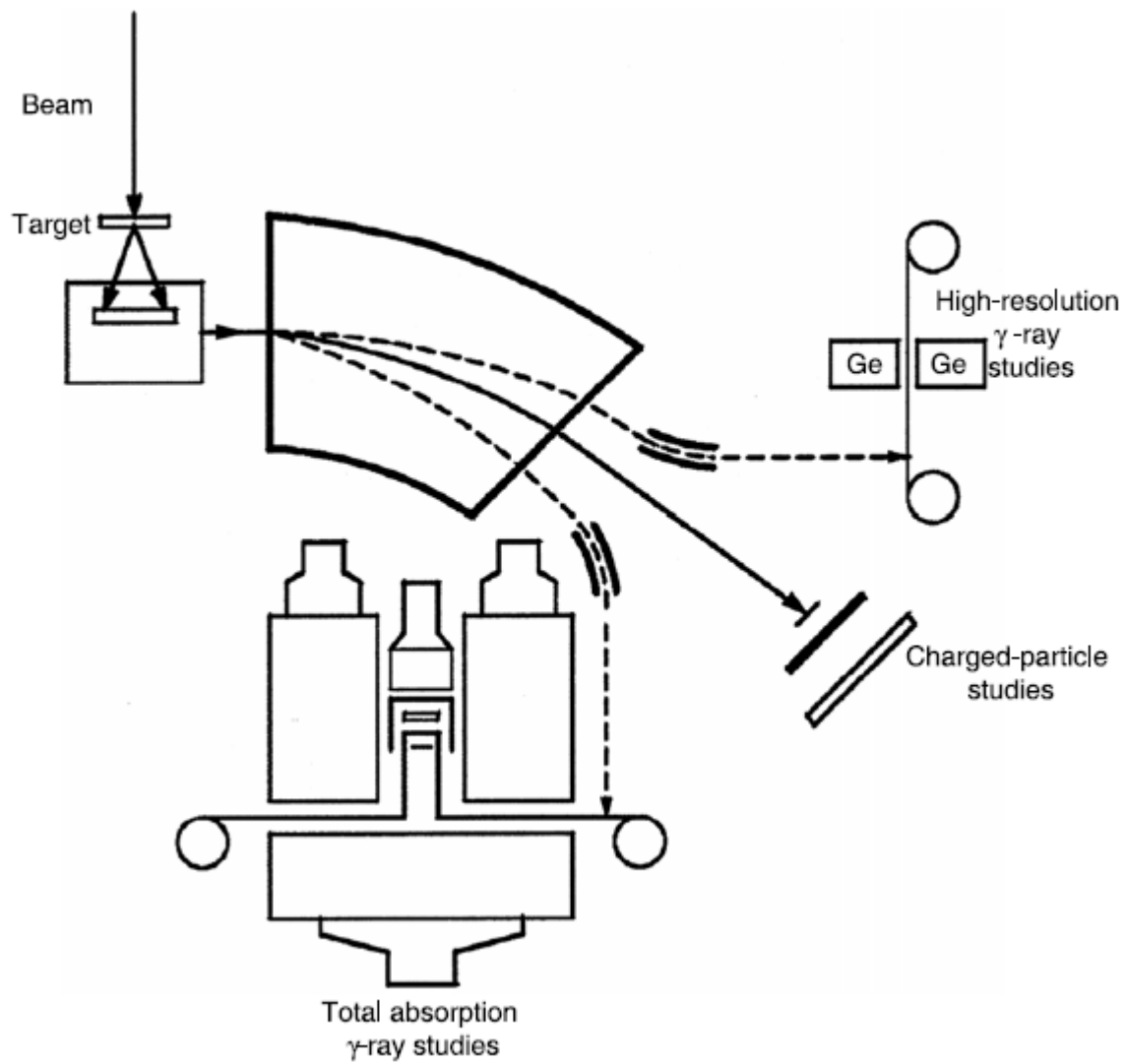


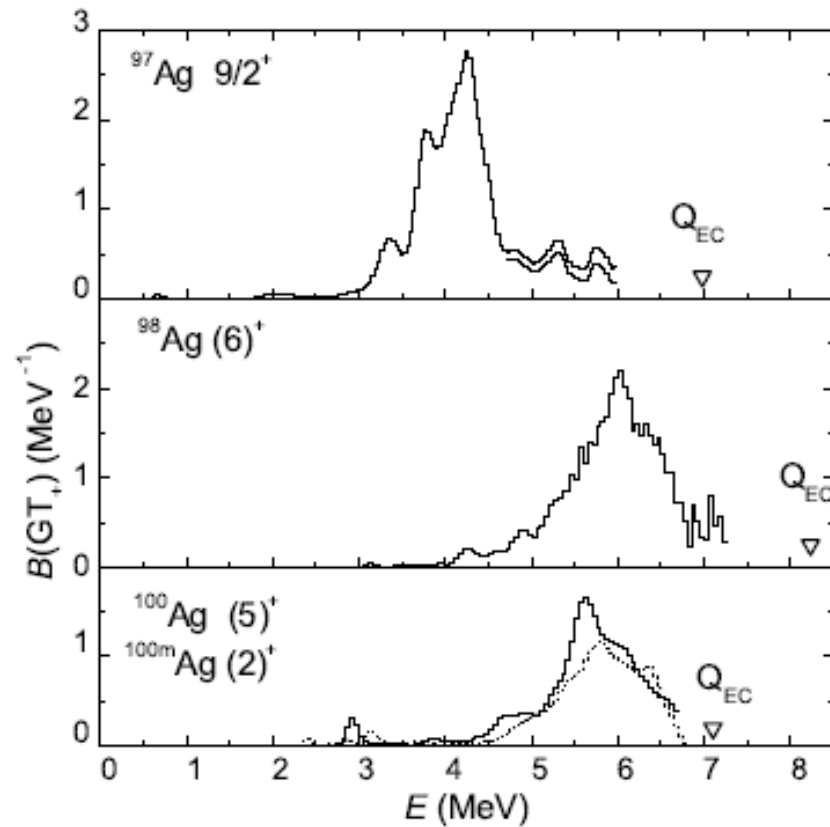
# ГАММА СПЕКТРОМЕТР ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ





# Установка ISOL в GSI





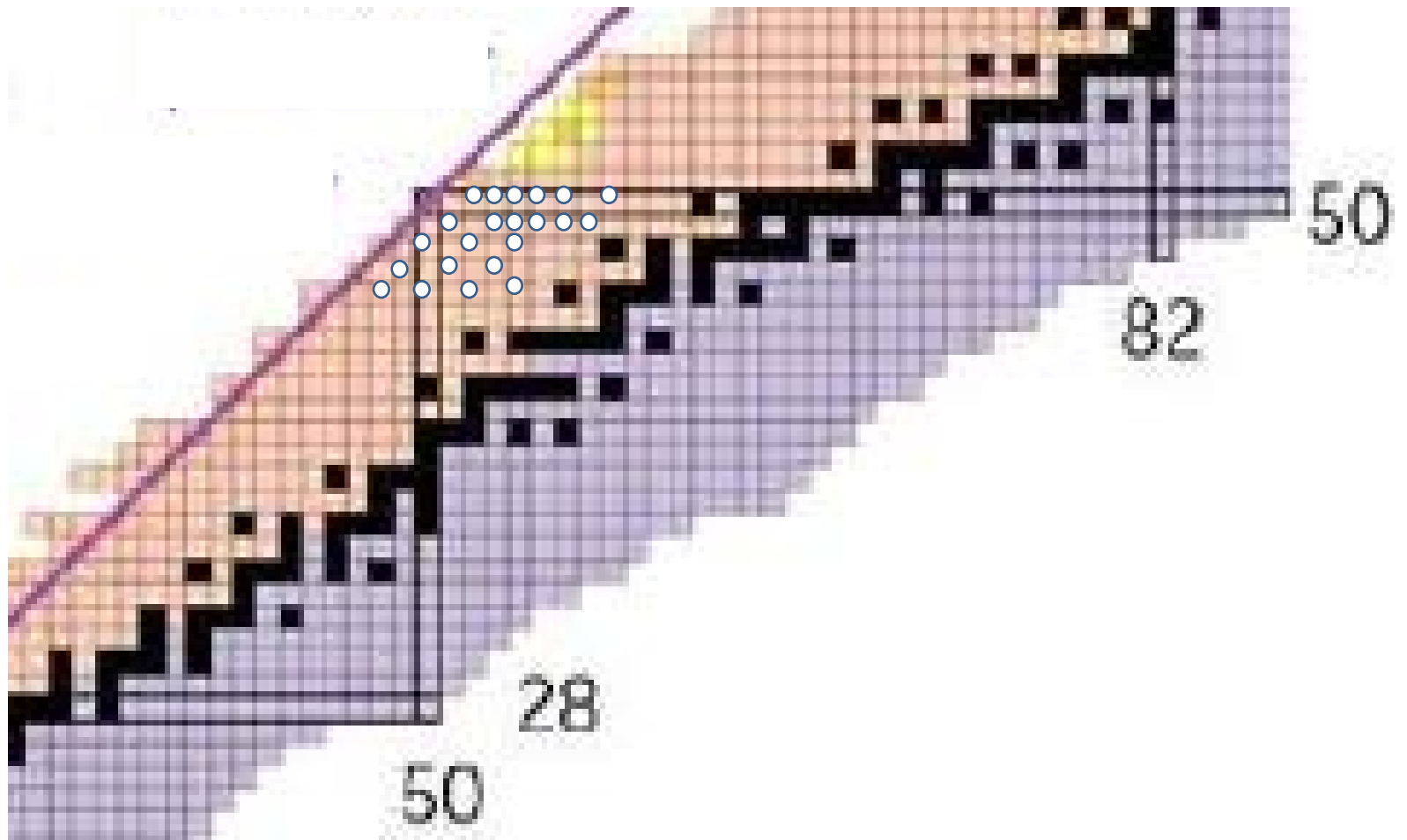
Примеры распределений силы перехода Гамова-Теллера, измеренных  $\gamma$ -спектрометром полного поглощения.

## Характеристики $\beta$ -распада ядер в окрестности $^{100}\text{Sn}$

Nuclide	$B_{GT}$	$E_X$ (MeV)	$E_{GT}$ (MeV)	$Q_{EC}$ (MeV)
$^{108}\text{Sn}$	1.33(5)	0.73	-1.34	2.075(19)
$^{106}\text{Sn}$	2.12(20)	1.12	-2.14	3.256(15) <sup>b</sup>
$^{105}\text{Sn}$	2.63(35)	3.76	-2.54	6.299(19) <sup>b</sup>
$^{104}\text{Sn}$	2.7(3)	1.40	-3.12	4.515(60)
$^{103}\text{Sn}$	3.4(5)	4.11	-3.52	7.635(300)
$^{102}\text{Sn}$	4.2(8)	1.78	-4.00	5.780(70)
$^{106}\text{In}$	1.4(3)	5.43	-1.10	6.526(11)
$^{105}\text{In}$	1.7(2)	3.35	-1.34	4.849(13)
$^{104}\text{In}$	2.1(3)	5.94	-1.84	7.796(8) <sup>b</sup>
$^{103}\text{In}$	2.4(3)	3.81	-2.20	6.014(14) <sup>b</sup>
$^{102}\text{In}$	4.7(10)	6.41	-2.57	8.968(108)
$^{100}\text{In}$	3.9(9)	6.54	-3.44	10.08(23)
$^{102}\text{Cd}$	1.55(16)	0.91	-1.68	2.587(8)
$^{100}\text{Cd}$	2.29(26)	1.23	-2.66	3.890(67)
$^{98}\text{Cd}$	2.90(22)	1.85	-3.58	5.420(40)
$^{100}\text{Ag}$	1.7(2)	5.72	-1.36	7.078(76)
$^{100m}\text{Ag}$	1.35(20)	5.75	-1.34	7.093(76)
$^{98}\text{Ag}$	2.7(4)	6.05	-2.19	8.239(63)
$^{97}\text{Ag}$	2.97(40)	4.21	-2.77	6.980(110)
$^{98}\text{Pd}$	1.22(12)	0.68	-1.20	1.873(24)
$^{96}\text{Pd}$	2.12(16)	1.26	-2.24	3.500(14)
$^{94}\text{Ru}$	1.05(15)	0.74	-0.85	1.586(13)

только Ge-детекторы

# АППРОКСИМАЦИЯ



# АППРОКСИМАЦИЯ

$$B_{GT}^{IP} = \sum_{j_p, j_n} b_{j_p \rightarrow j_n} (2j_p + 1) n_{j_p} (1 - n_{j_n})$$

$n_{j_p, j_n}$  - заселённости (L,j)-состояний

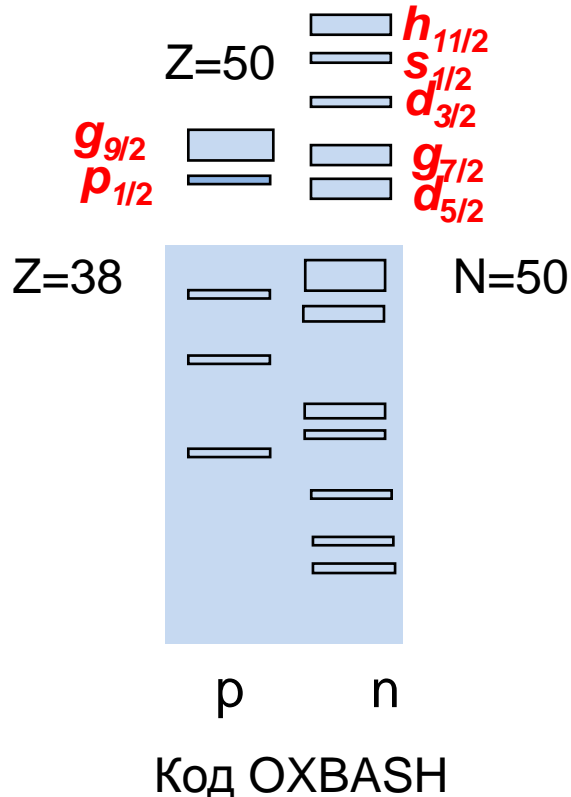
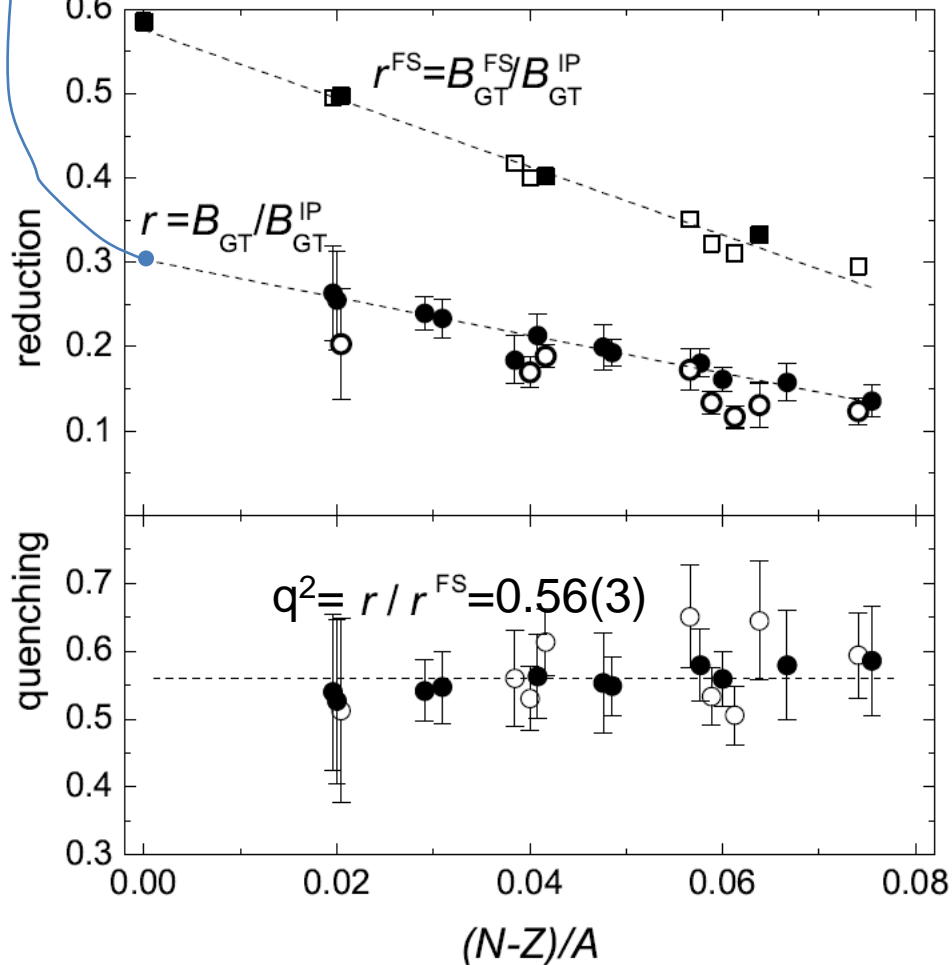
Аппроксимация заселённостей

$$B_{GT}^{IP} \approx \tilde{B}_{GT}^{IP} = \frac{160}{9} \frac{Z - Z_0}{50 - Z_0} \frac{N - N_0}{50 - N_0}$$

$Z_0 = 39.2; N_0 = 69.4$

$B_{GT}^{FS}$  SMMC and/or (qRPA)  $q^2 = B_{GT} / B_{GT}^{FS}$

$$B_{GT}^{100Sn} = (r \cdot B_{GT}^{IP})_{N=Z} = 5.2(6)$$



Экспериментальные характеристики  
бета-распада  $^{100}\text{Sn}$

			# $^{100}\text{Sn}$	$E_{\beta_0}, \text{MeV}$	$B_{\text{GT}}$
эксперимент	GSI FRS	1994	7	$3.4^{+0.7}_{-0.3}$	$11.3^{+6.5}_{-8.3}$
эксперимент	GSI FRS	1997	1+7	$3.8^{+0.7}_{-4.3}$	$5.83^{+5.3}_{-4.1}$
экстраполяция	GSI ISOL	2010		<b>3.84(23)</b>	<b>5.23(60)</b>

Экспериментальные характеристики  
бета-распада  $^{100}\text{Sn}$

			$\#^{100}\text{Sn}$	$E_{\beta_0}, \text{MeV}$	$B_{\text{GT}}$
эксперимент	GSI FRS	1994	7	$3.4^{+0.7}_{-0.3}$	$11.3^{+6.5}_{-8.3}$
эксперимент	GSI FRS	1997	1+7	$3.8^{+0.7}_{-4.3}$	$5.83^{+5.3}_{-4.1}$
экстраполяция	GSI ISOL	2010		<b>3.84(23)</b>	<b>5.23(60)</b>
эксперимент	GSI FRS	2012	259→70	$3.29 \pm 0.2$	$9.1^{+4.8}_{-2.3}$

ARTICLE doi:10.1038/nature11116  
Superaligned Gamow–Teller decay of the doubly magic nucleus  $^{100}\text{Sn}$

Schematic illustration of the Fragment Separator (FRS) at GSI

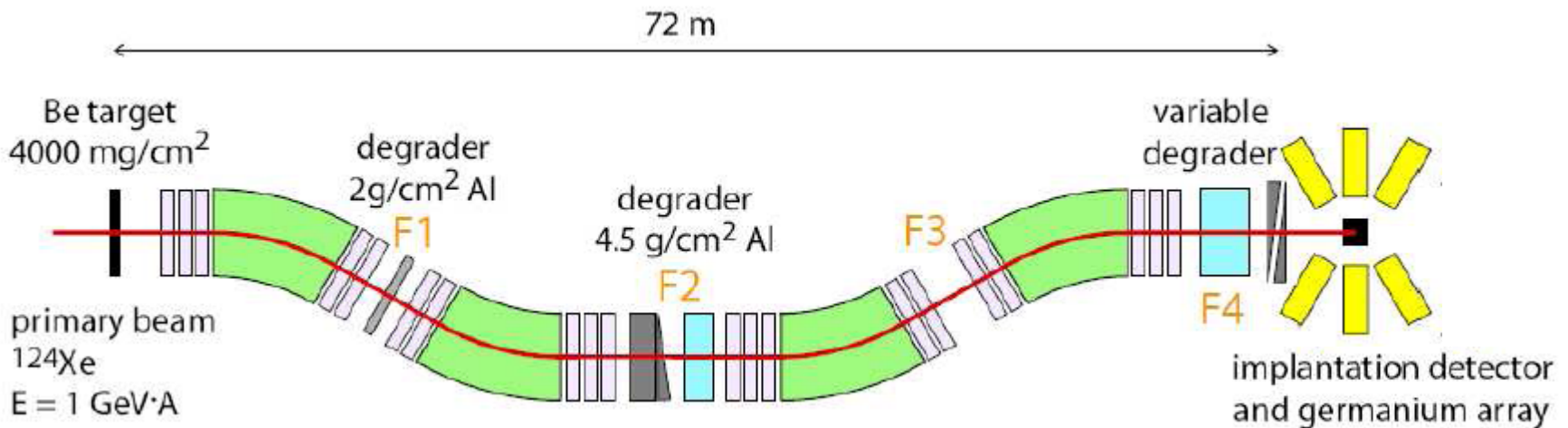


Рисунок скопирован из С.В. Hinke



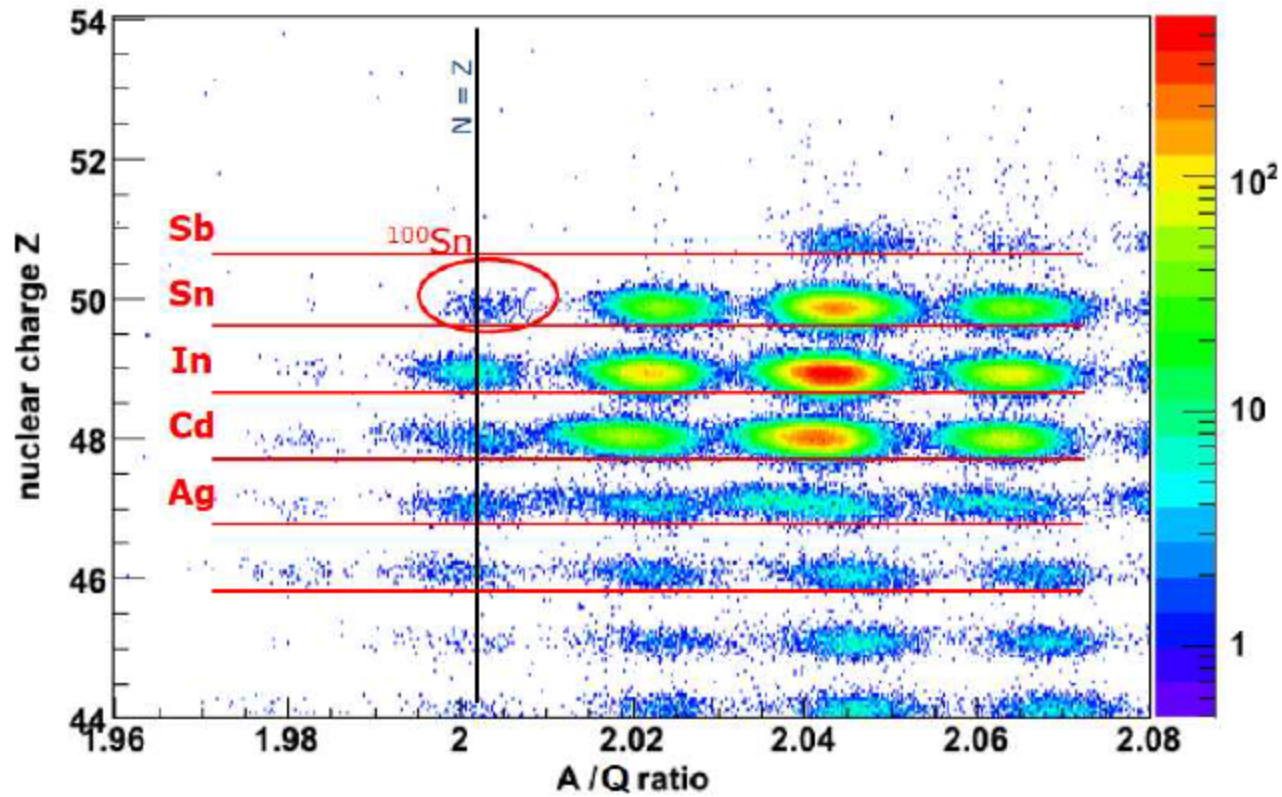
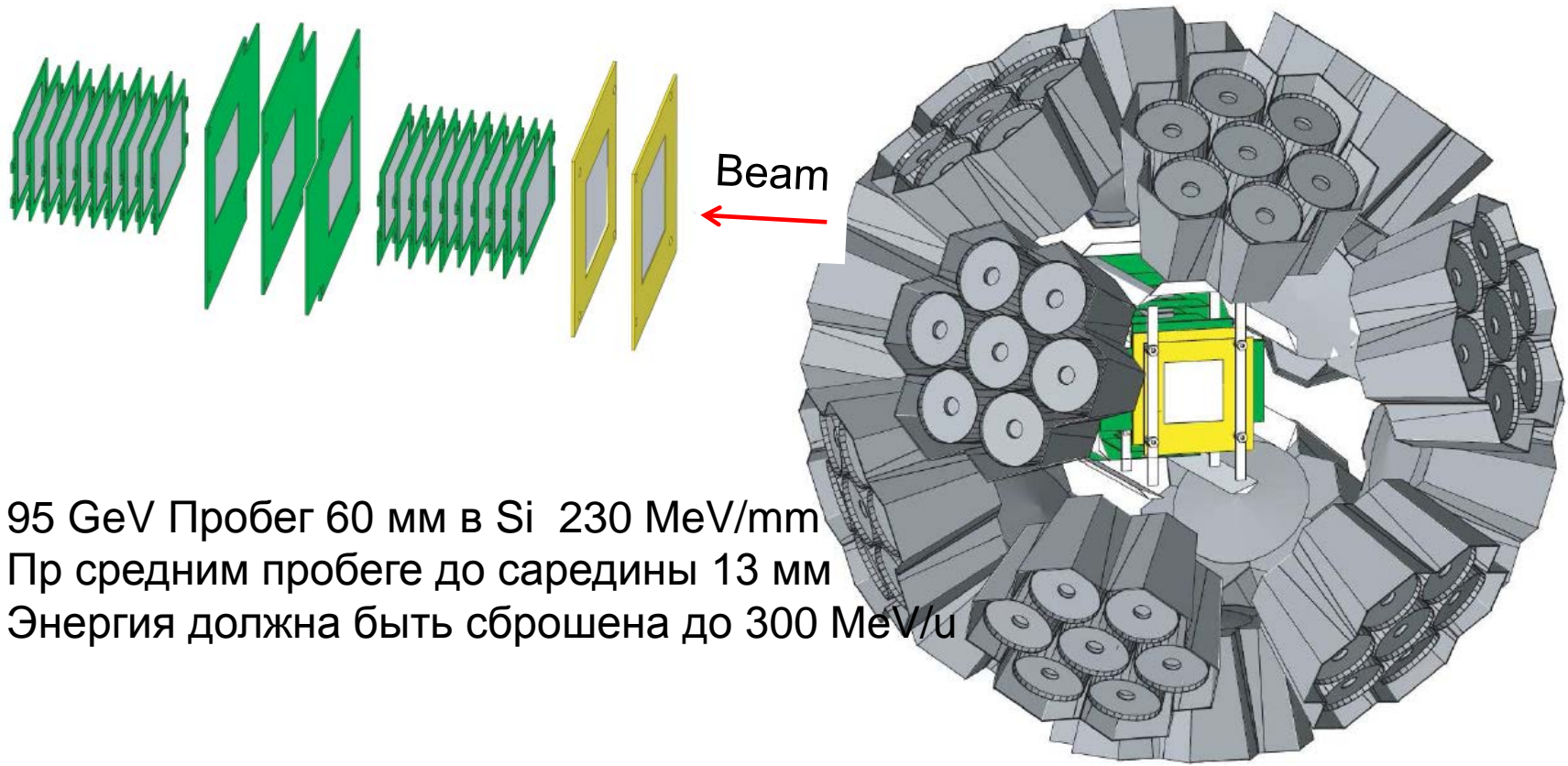


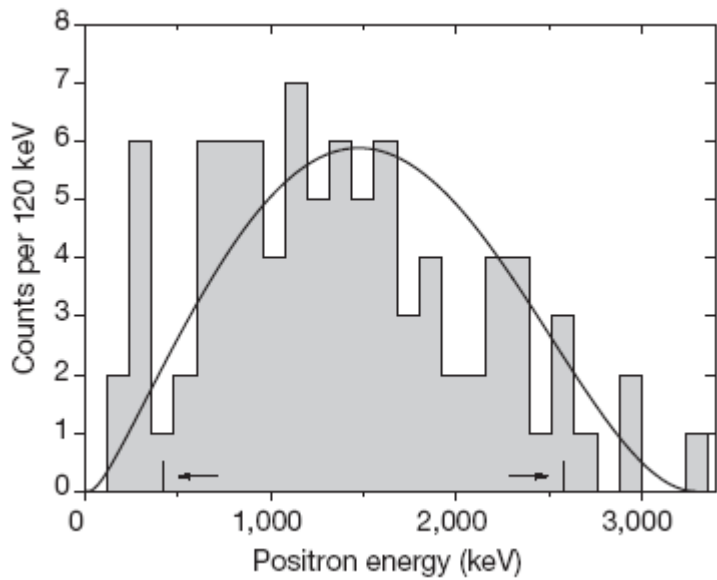
Рисунок скопирован из С.В. Hinke



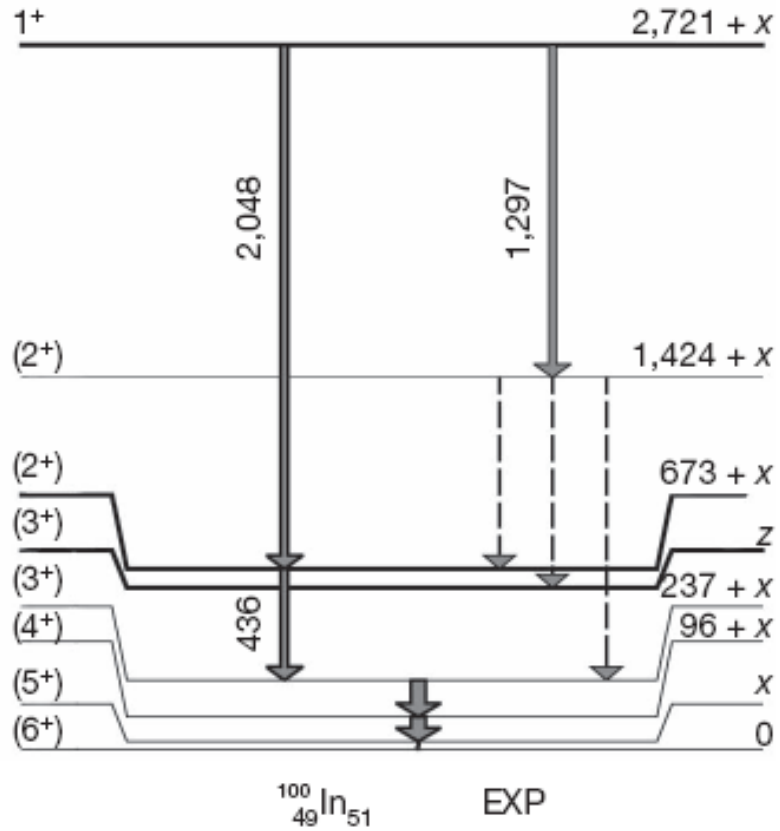
95 GeV Пробег 60 мм в Si 230 MeV/mm  
Пр среднем пробеге до саредины 13 мм  
Энергия должна быть сброшена до 300 MeV/u

SIMBA Si-детектор, окружённый 15x7 Ge-детекторами  
Среднее расстояние от гамма-детектора до оси пучка 22 см.  
Эффективность в фото-пике 15% на линии 661 кэВ; разрешение 3 кэВ

Рисунок скопирован из С.В. Hinke



Distribution of the positron energies emitted in the  $\beta$ -decay of  $^{100}\text{Sn}$ .  $E_{\beta} = 3.29(20)$  MeV.

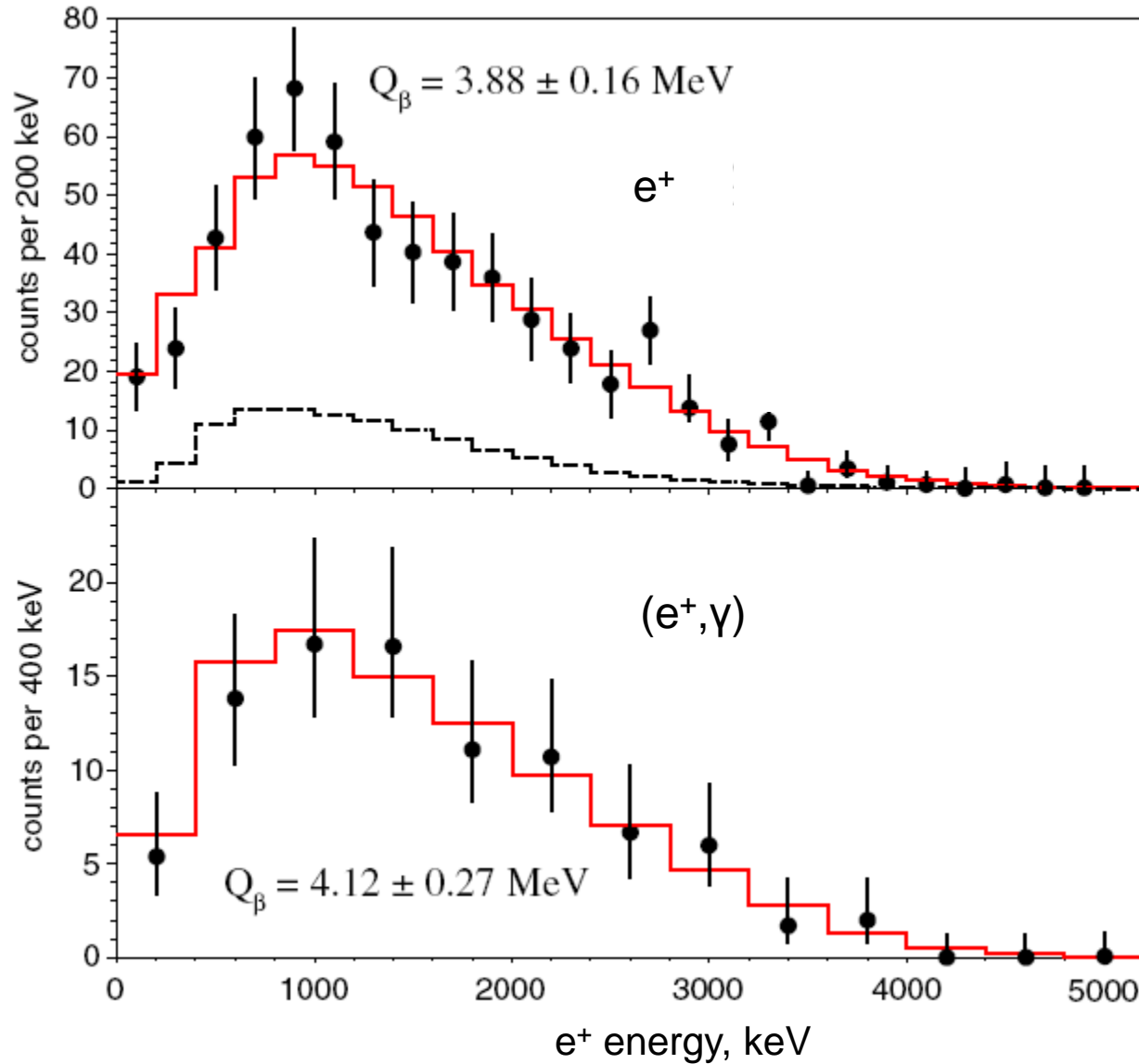


Most likely level scheme for the five observed  $\gamma$ -transitions in  $^{100}\text{In}$

# Improved Value for the Gamow-Teller Strength of the $^{100}\text{Sn}$ Beta Decay

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 222502 (2019)

RIKEN



\* \*

## Экспериментальные характеристики бета-распада $^{100}\text{Sn}$

			# $^{100}\text{Sn}$	$E_{\beta_0}, \text{MeV}$	$B_{GT}$
эксперимент	GSI FRS	1994	7	$3.4^{+0.7}_{-0.3}$	$11.3^{+6.5}_{-8.3} *$
эксперимент	GSI FRS	1997	1+7	$3.8^{+0.7}_{-4.3}$	$5.83^{+5.3}_{-4.1} *$
экстраполяция	GSI ISOL	2010		<b>3.84(23)</b>	<b>5.23(60)</b>
эксперимент	GSI FRS	2012	259→70	$3.29 \pm 0.2$	$9.1^{+4.8}_{-2.3} *$
Эксперимент	RIKEN	2019	5000→600	$3.91 \pm 0.15$	$4.4^{+0.9}_{-0.7} *$

\*

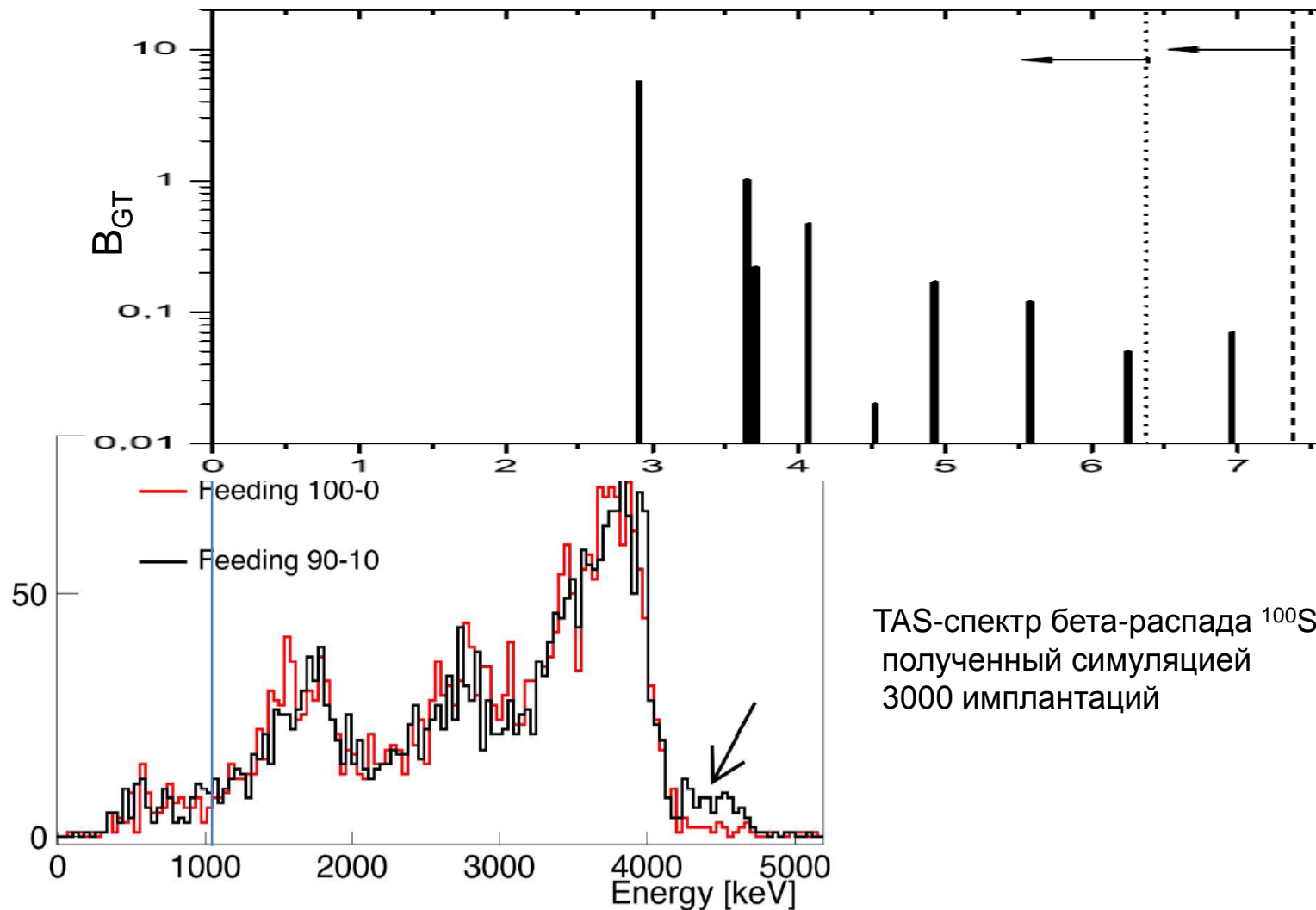
## Экспериментальные характеристики бета-распада $^{100}\text{Sn}$

			# $^{100}\text{Sn}$	$E_{\beta_0}, \text{MeV}$	$B_{GT}$
эксперимент	GSI FRS	1994	7	$3.4^{+0.7}_{-0.3}$	$11.3^{+6.5*}_{-8.3}$
эксперимент	GSI FRS	1997	1+7	$3.8^{+0.7}_{-4.3}$	$5.83^{+5.3*}_{-4.1}$
аппроксимация	GSI ISOL	2010		<b>3.84(23)</b>	<b>5.23(60)</b>
эксперимент	GSI FRS	2012	259→70	$3.29 \pm 0.2$	$9.1^{+4.8*}_{-2.3}$
Эксперимент	RIKEN	2019	5000→600	$3.91 \pm 0.15$	$4.4^{+0.9*}_{-0.7}$
эксперимент	RIKEN TAS	2020			

LSSM предсказывает что ~30%  $B_{GT}$  идут выше первого  $1^+$ уровня. Если это учесть, то величина  $B_{GT}$  на первый  $1^+$  уровень уменьшается, но сумма  $B_{GT}$  несколько увеличивается . Для оценки интенсивности бета-распада выше первого  $1^+$ уровня планируется использовать 4π-γ-детектор (TAS)

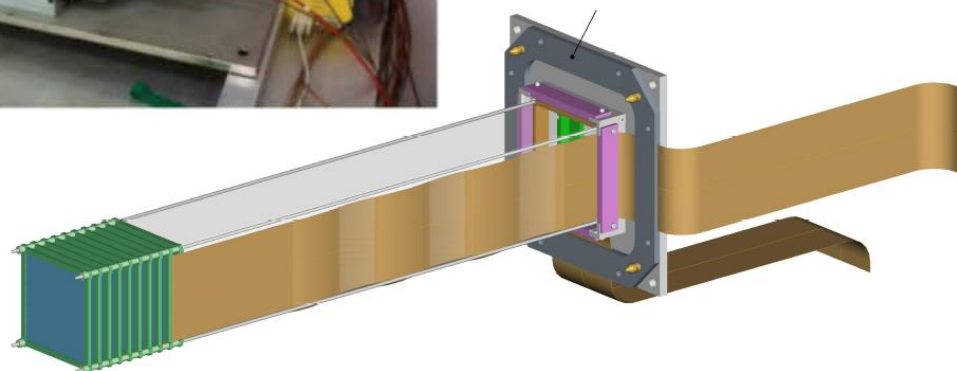
# RIKEN-TAS эксперимент

LSSM-расчёт распределения  $B_{GT}$   
бета-распада  $^{100}\text{Sn}$

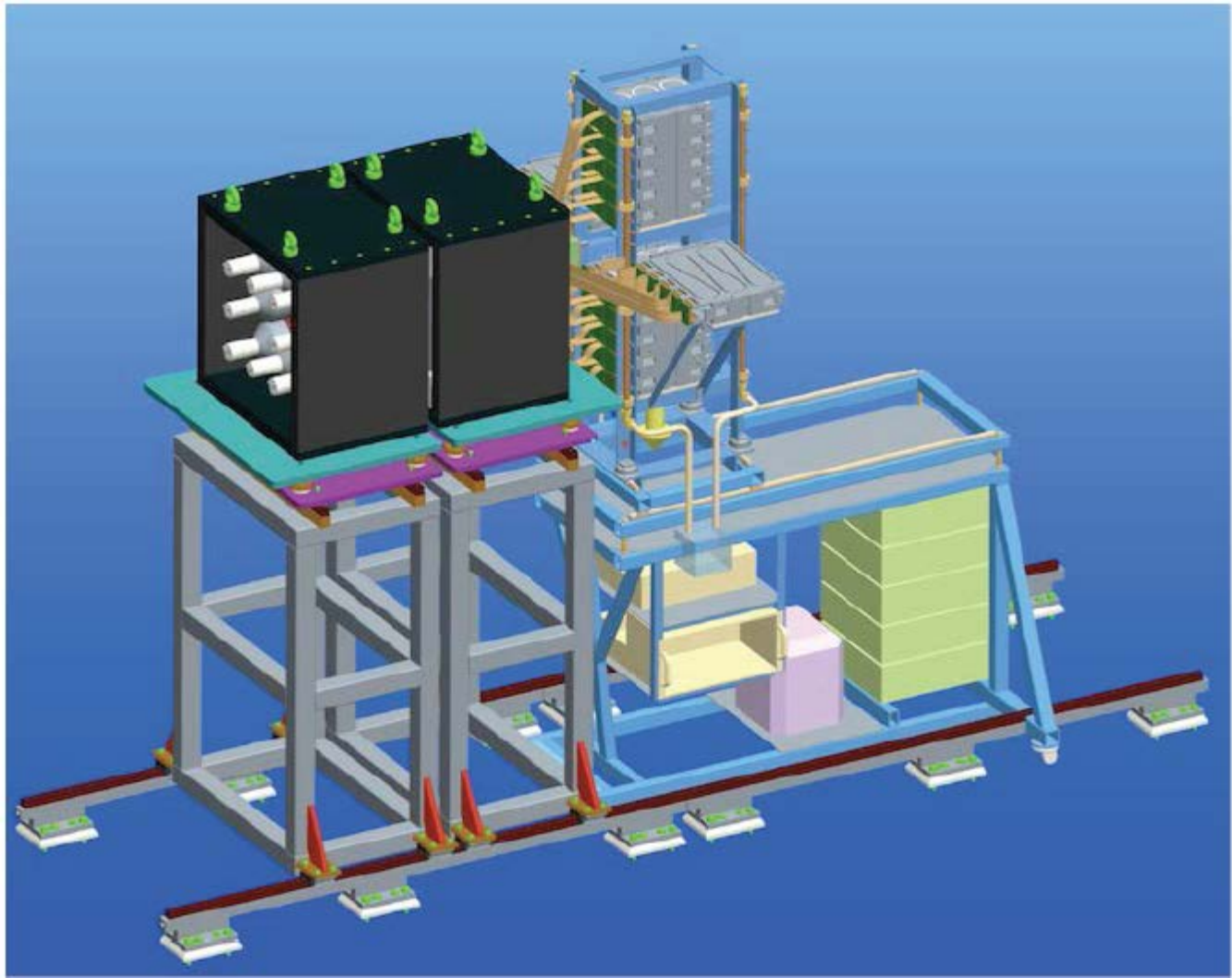


TAS-спектр бета-распада  $^{100}\text{Sn}$ ,  
полученный симуляцией  
3000 имплантаций

# RIKEN-TAS эксперимент





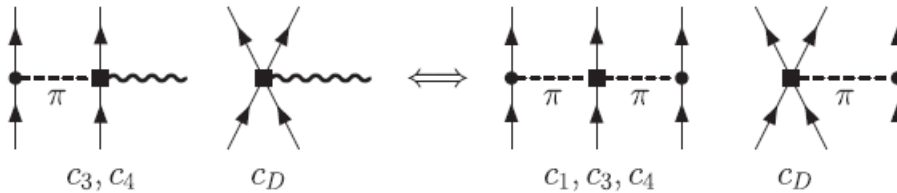


Двух частичный компонент тока слабого взаимодействия  
(Meson-exchange currents)

бета-распад  $^{100}\text{Sn}$

			# $^{100}\text{Sn}$	$E_{\beta_0}, \text{MeV}$	$B_{GT}$
эксперимент	GSI FRS	1994	7	$3.4^{+0.7}_{-0.3}$	$11.3^{+6.5*}_{-8.3}$
эксперимент	GSI FRS	1997	1+7	$3.8^{+0.7}_{-4.3}$	$5.83^{+5.3*}_{-4.1}$
аппроксимация	GSI ISOL	2010		<b>3.84(23)</b>	<b>5.23(60)</b>
эксперимент	GSI FRS	2012	259→70	$3.29 \pm 0.2$	$9.1^{+4.8*}_{-2.3}$
Эксперимент	RIKEN	2019	5000→600	$3.91 \pm 0.15$	$4.4^{+0.9*}_{-0.7}$
Эксперимент	RIKEN TAS	2020			
<b>Теория : Coupled Cluster Model s +Two-particle weak current</b>				<b><math>B_{GT}</math></b>	<b>5.2(5) -----7.0(7)</b>
				<b>q</b>	<b>0.73 ----- 0.85</b>

## Двух частичный компонент тока слабого взаимодействия (Meson-exchange currents)



$$\begin{aligned}
 \mathbf{J}_{i,2b}^{\text{eff}} &= -g_A \boldsymbol{\sigma}_i \tau_i^- \frac{\rho}{F_\pi^2} \left[ \frac{c_D}{g_A \Lambda_\chi} + \frac{2}{3} c_3 \frac{\mathbf{p}^2}{4m_\pi^2 + \mathbf{p}^2} \right. \\
 &\quad \left. + I(\rho, P) \left( \frac{1}{3} (2c_4 - c_3) + \frac{1}{6m} \right) \right], \\
 I(\rho, P) &= 1 - \frac{3m_\pi^2}{2k_F^2} + \frac{3m_\pi^3}{2k_F^3} \operatorname{arccot} \left[ \frac{m_\pi^2 + P^2/4 - k_F^2}{2m_\pi k_F} \right] \\
 &\quad + \frac{3m_\pi^2}{4k_F^3 P} \left( k_F^2 + m_\pi^2 - \frac{P^2}{4} \right) \log \left[ \frac{m_\pi^2 + (k_F - P/2)^2}{m_\pi^2 + (k_F + P/2)^2} \right].
 \end{aligned}$$

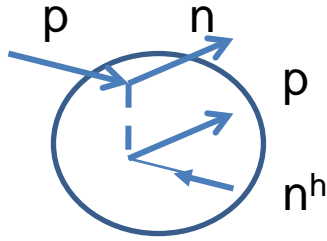
$m_\pi=138 \text{ MeV}$ ;  $F_\pi=92.4 \text{ MeV}$ ;  $\Lambda=700 \text{ MeV}$ ;  $\rho=3k_F^3/(3\pi^2)=0.1 - 0.12 \text{ fm}^{-3}$ ;  $g_A=1.27$

$I(\rho, P) = 0.58; \dots; 0.60$

$c_D$  is short range constant  $|c_D| < 1$ ;  $c_3 \approx -3 \text{ GeV}^{-1}$   $2c_4 - c_3 \approx 10 \text{ GeV}^{-1}$

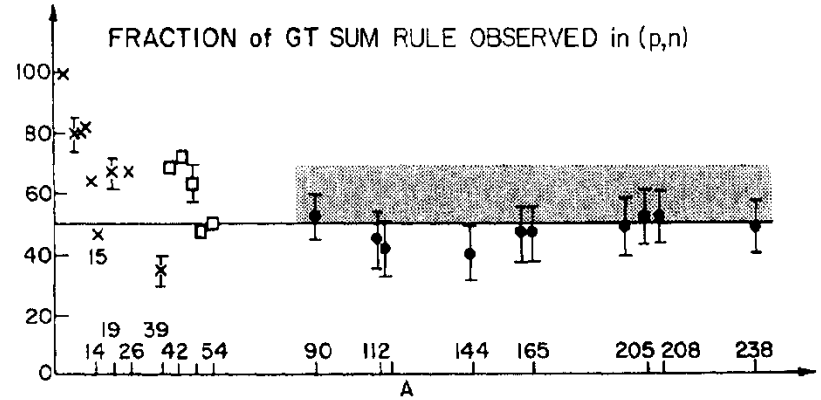
$d_1 + 2d_2 = c_D/(g_A \Lambda_\chi)$

# Возбуждение резонанса Гамов Теллера в зарядово обменной реакции

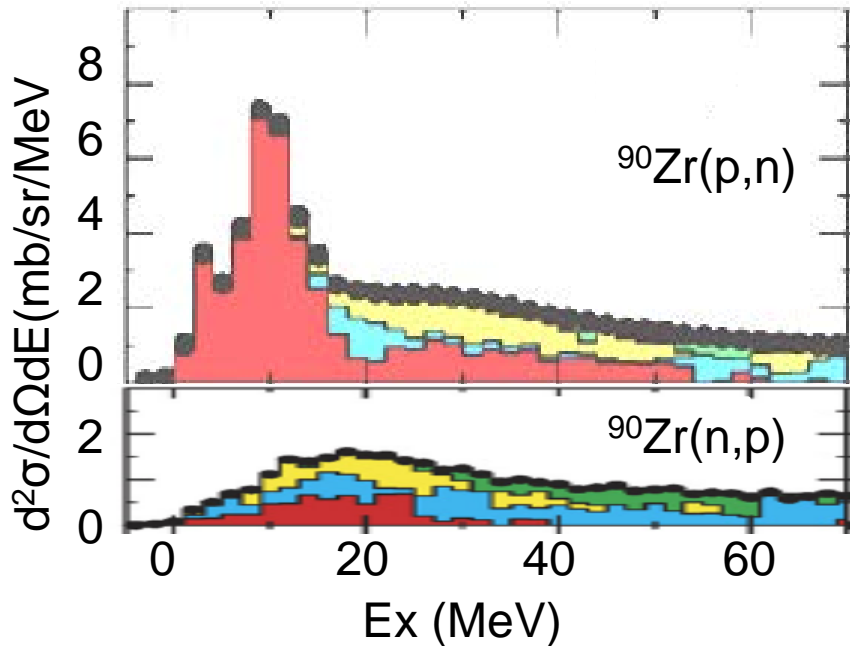


$$\frac{d^2\sigma(q, \omega)}{d\Omega dE} = \hat{\sigma}_{GT} F(q, \omega) B_{GT}^{\pm}$$

Правило сумм для  $S^{\pm} = \int B_{GT}^{\pm} dE$   
 $S^{-} - S^{+} = 3(N - Z)$



K. Yako et al, arXiv:nucl-ex/0411011v3 (2005)



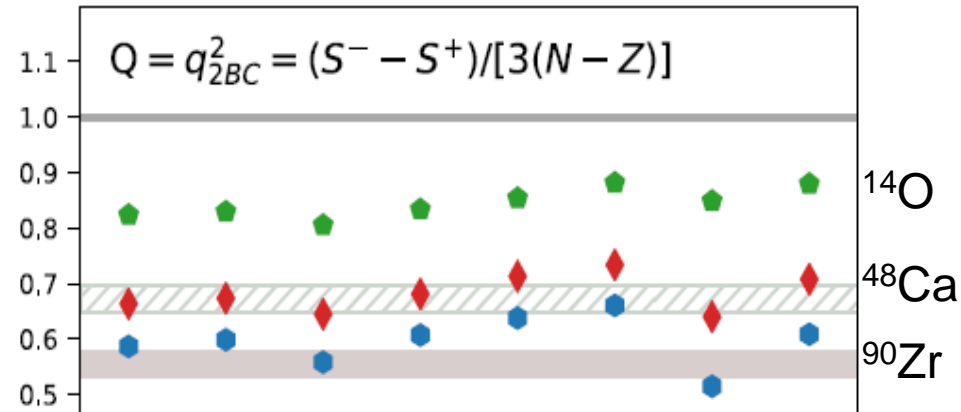
**■** GT+IVSM;  $\sum \sigma_T + \sum r^2 \sigma_T$ ;  $L=0, J^{\pi}=1^{+}$

$$\text{IVSM: } (S^{-} - S^{+}) = 3(N \cdot \bar{r}_n^4 - Z \cdot \bar{r}_p^4)$$

**90Zr**

$$\text{GT: } (S^{-} - S^{+}) = 0.88(6) \cdot 3(N - Z)$$

$$(S^{-} - S^{+})_{\text{res}} \approx 0.55 \cdot 3(N - Z)$$



Можно ожидать, что в следующем году в результате эксперимента  
RIKEN-TAS  
приведённая вероятность бета-распада ядра  $^{100}\text{Sn}$  будет измерена.

**СПАСИБО!**

Model	Ref	unquenched	quenched	quenching factor
ESPM	[30]	17.78	10.00	0.75
MCSM	[8]	10.3	6.5	0.79
QRPA	[9]	8.95		
FFS	[9]	7.63		
extrapol.	[10]	9.8	5.2	0.75
SM+corr.	[7]	14.2		
LSSM	this work	$\sim 13.90$	$\sim 7.82$	0.75
LSSM (only $1_1^+$ )	this work	10.10	5.68	0.75

Model	Ref	unquenched	quenched	quenchingfactor
ESPM[30]		17.78	10.00	0.75
MCSM[1996]		10.3	6.5	0.79
QRPA[2000]		8.95		
FFS[2000]		7.63		
extrapol.[2010]		<b>9.8</b>	<b>5.2</b>	0.75
SM+corr.[1994]		14.2		
LSSM this work (2012)		<b>13.90</b>	<b>7.82</b>	0.75
LSSM( $1^+_{11}$ ) this work		<b>10.10</b>	<b>5.68</b>	0.75

## сравнению подавления силы GT-перехода $\beta$ распаде и зарядово обменных реакций

В рамках киральной теории возмущений малым параметром является отношение  $m_\pi/m_\rho$ . В экспериментах по перезаряде энергия пучка 300 МэВ. Энергия при столкновении нуклонов в ядре  $\approx 100$  МэВ, но в экспериментах по перезаряде энергия пучка 300 МэВ. Поэтому корректно теория возмущений не может использоваться. Тем не менее, казалось бы как то оценить эффект

Из данных по з-о реакциям  $90\text{Zr}(p,n)$  [ $90\text{Zr}(n,p)$ ??] следует что  $q^2=(S^- - S^+)/3/(N-Z)=0.88(6)$  т.е.  $q=0.94(4)$ . что не согласуется с  $q \approx 0.75$  из  $\beta$  распада. Однако обращает на себя внимание тот факт, что сила перехода в области резонанса составляет примерно половину правила сумм  $S^- - S^+ \approx 0.5 \cdot 3(N - Z)$ . Если забыть про успешное объяснение природы добавочного 30% подавления, то можно было бы сказать, что мы просто не можем увидеть возбуждение в широкой области энергий возбуждения. Приближение случайной фазы и не обязано описывать нерезонансные возбуждения. Но мы не можем увидеть эту область и в расчёте. Поэтому возникает подозрение, что подход киральной теории возмущения действительно успешно объясняет добавочное подавление при низких энергиях. Но остаётся проблема с описанием силы перехода выше энергии.