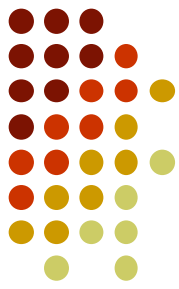


On warm dense matter generation and DD synthesis at vacuum discharge with deuterium-loaded Pd anode.



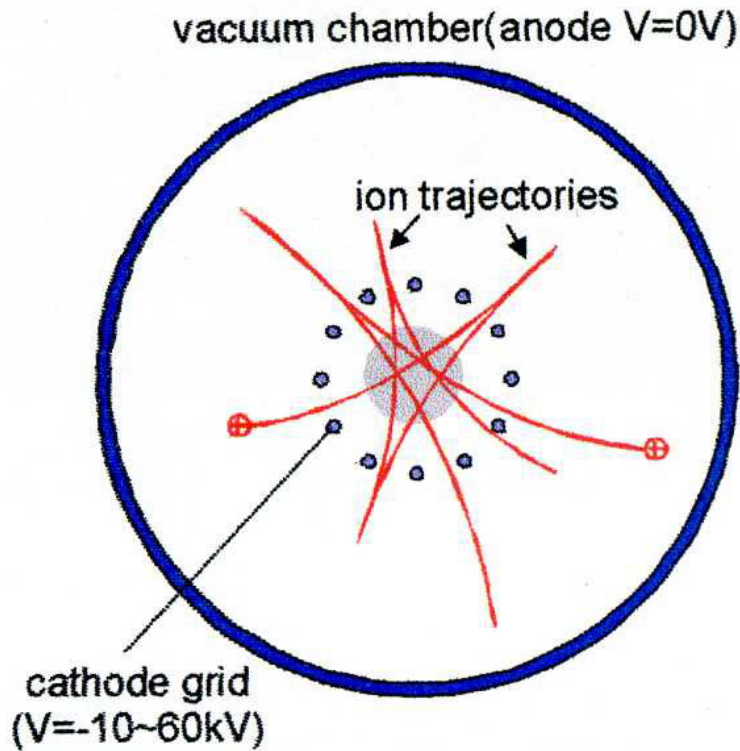
Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P , Gus'kov S.Yu.¹

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow.

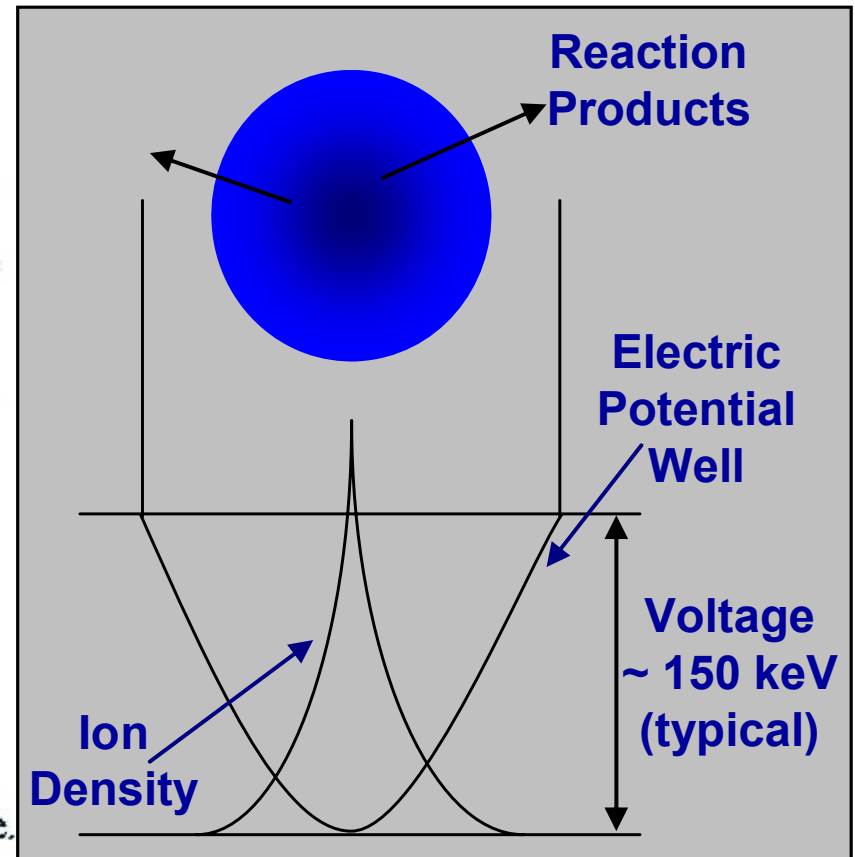
¹Lebedev Physics Institute, 119991 Moscow, Russia

We study the generation of energetic ions and neutrons from nuclear DD synthesis at nanosecond vacuum discharge. The principal role of *virtual cathode* (VC) and correspondent *potential wells* formations at interelectrode space are recognised from PIC simulations earlier. Presented work on *miniature neutron source* extends available activity on inertial electrostatic confinement fusion (IECF). Favourable *scaling of fusion power density* under lowering of IECF set-up size is demonstrated. Initial stage of discharge, when electron beam from cathode interacts with Pd anode tubes loaded by deuterium, is accompanied sometimes by neutron yield also that a subject of further study.

Inertial electrostatic confinement fusion (IECF) general scheme



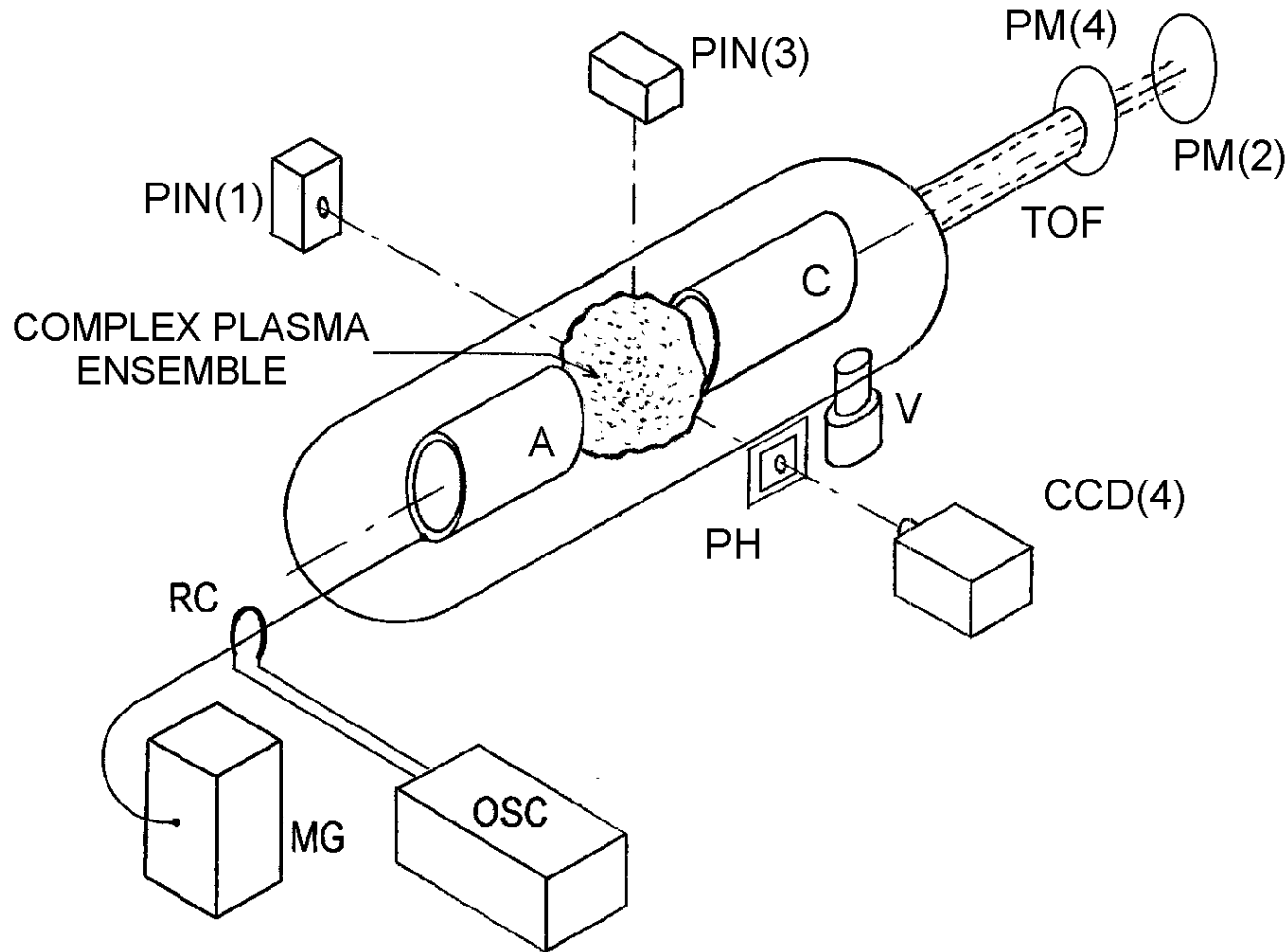
1. An IECF configuration with a gridded cathode.





Scheme of experiment for DD nuclear synthesis

M.Skowronek and Yu.K.Kurilenkov 2003, 2006

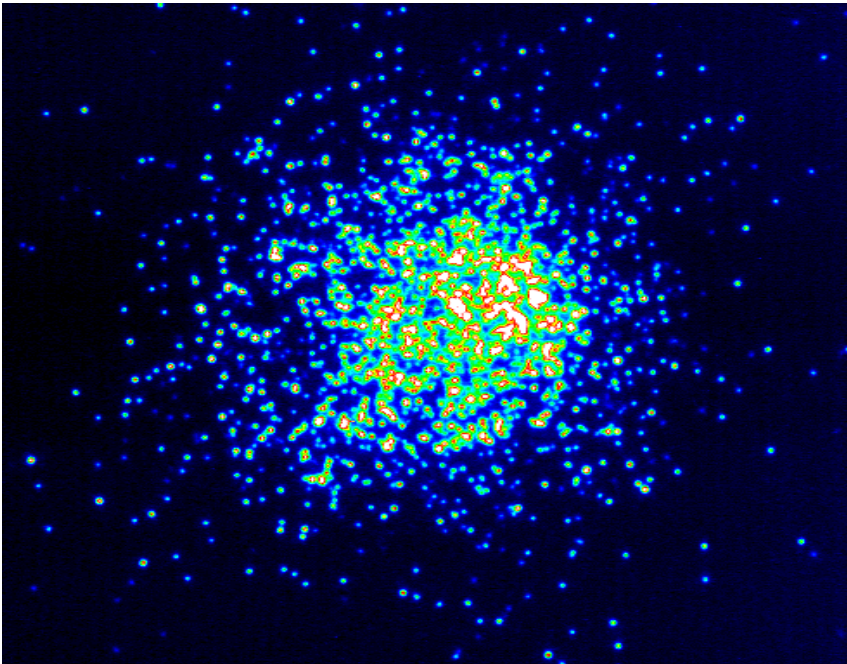


- Parameters of discharge: ≈ 1 J of total energy, $U=70$ kV, $t=50$ nsec, $I_{\max}=1$ kA, $TOF = 30-90$ cm, $P_{\min} \approx 10^{-7}$ mbar.

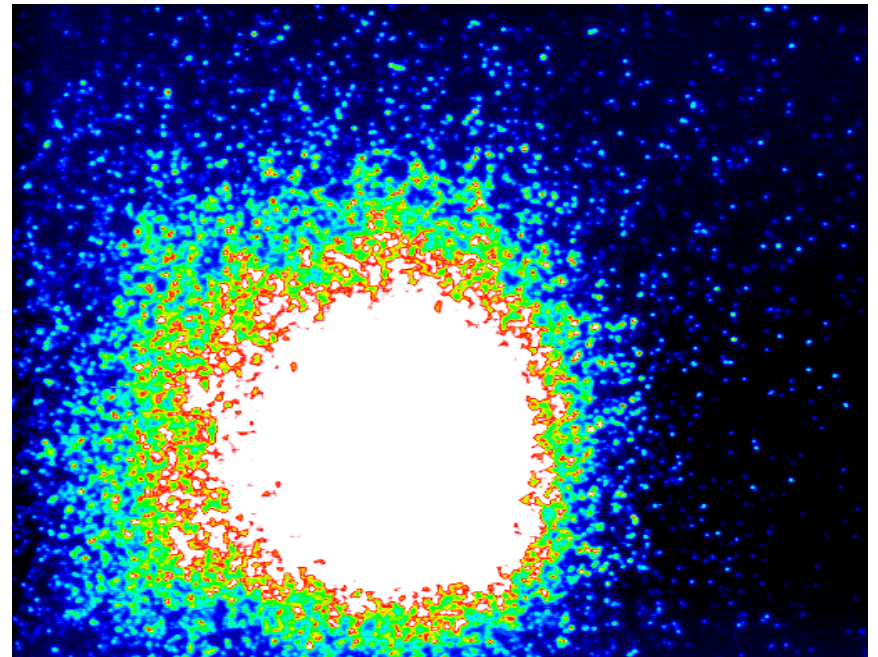
переход от базового “прозрачного” ансамбля к плотному или самоорганизованному

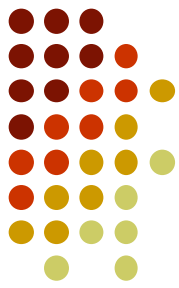


basic ensemble



partial trapping of x-rays
and total one for fast ions





Продукты DD синтеза

$D + D = T$ (tritium 1.01 MeV) + P (3.02MeV)

$D + D = He3$ (.82 MeV) + N (2.45 MeV)

neutrons signature - 46, 6 nsec/m TOF delayed
signal

T – 13.8%

P - 41.4%

He3 – 11.2%

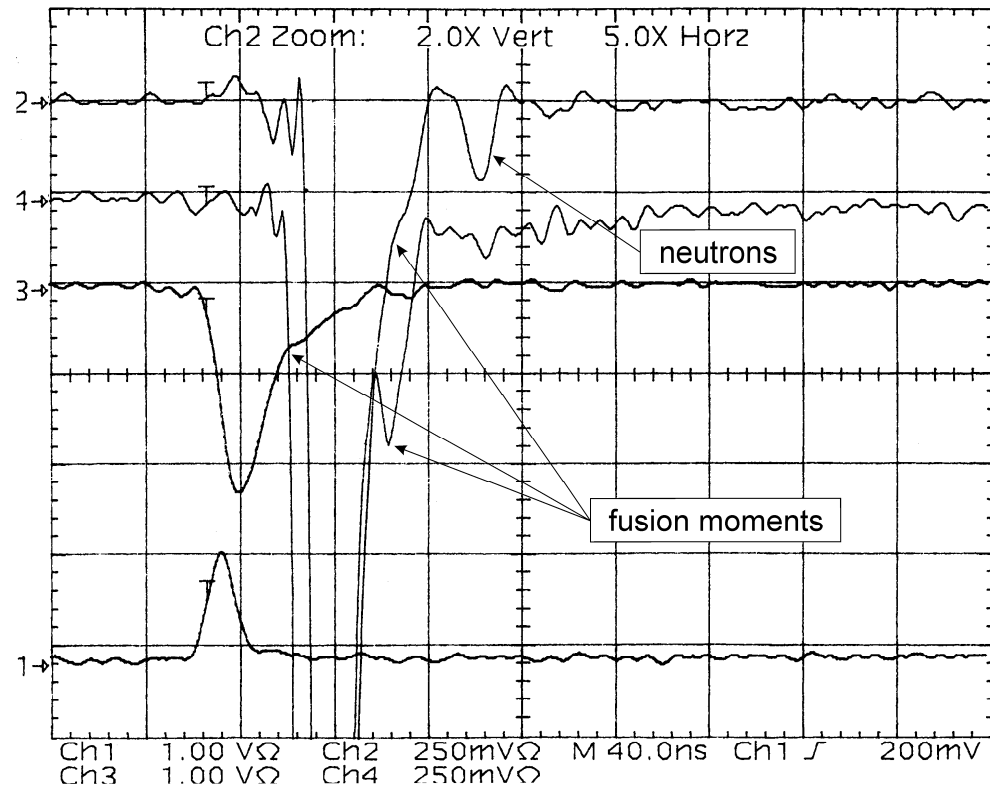
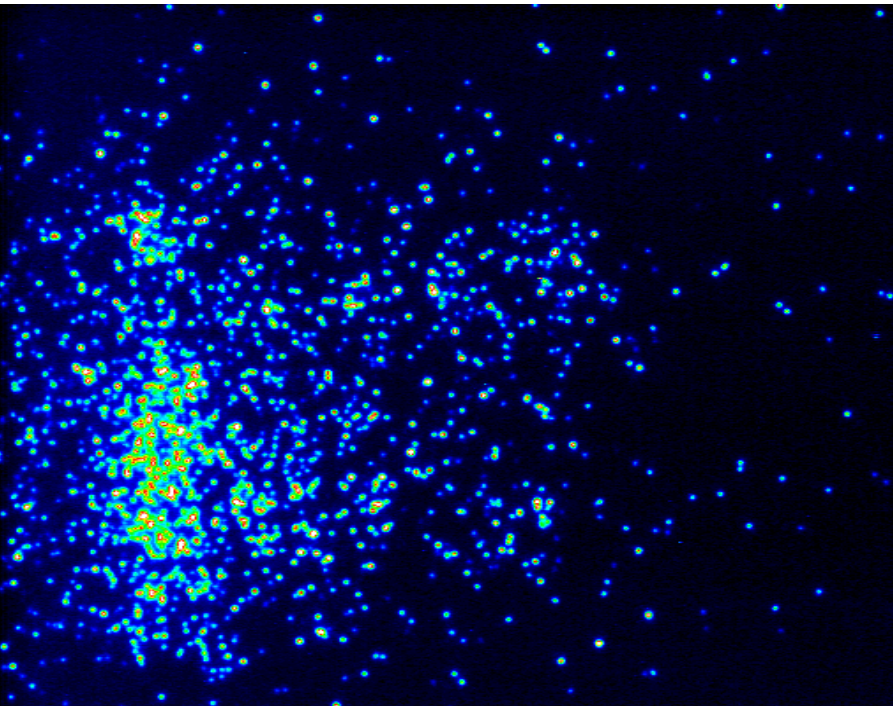
N – 33.6%

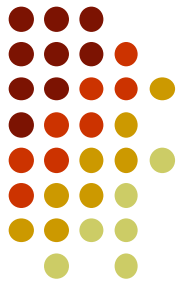
Observation of DD microfusion events accompanied by moderate neutron yield



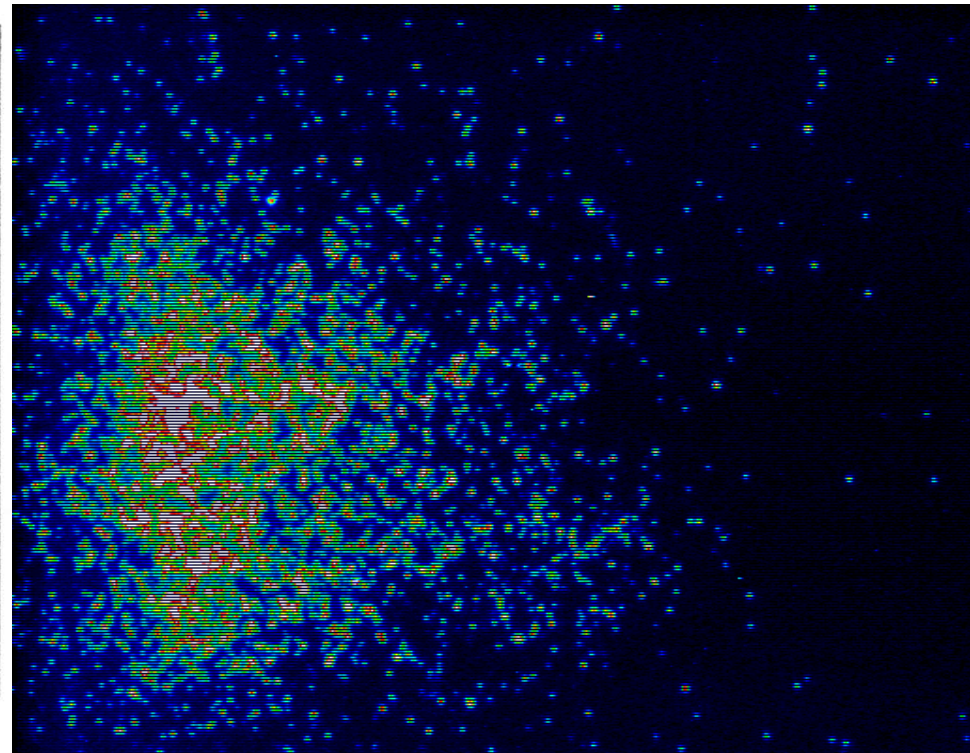
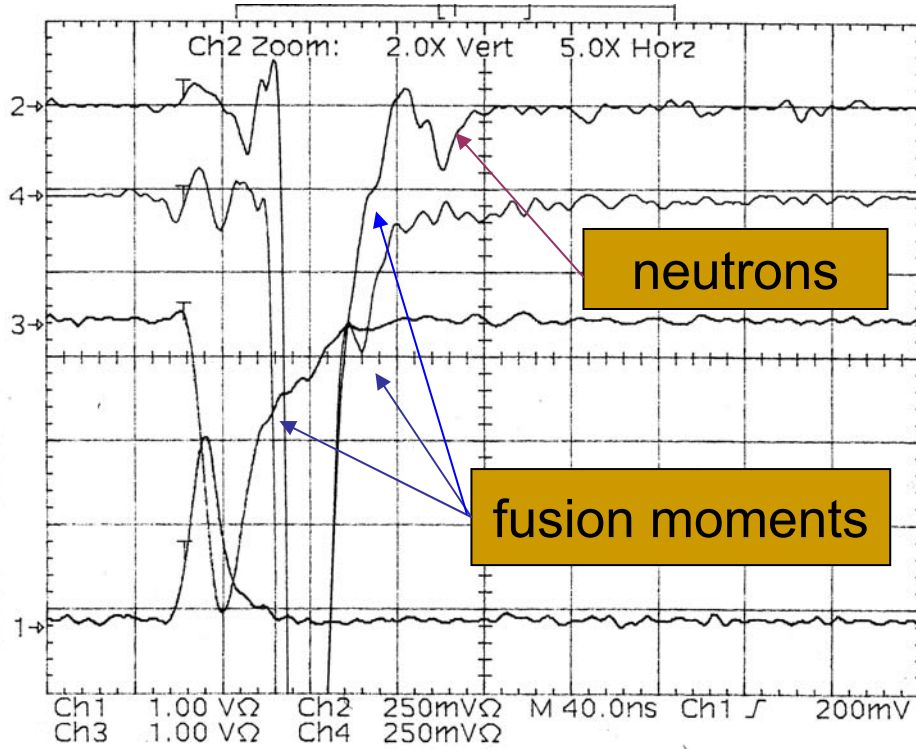
$D(D,n)He^3 \rightarrow \sim 2,45 \text{ MeV neutrons}$

- 46, 6 nsec/m TOF delayed signal

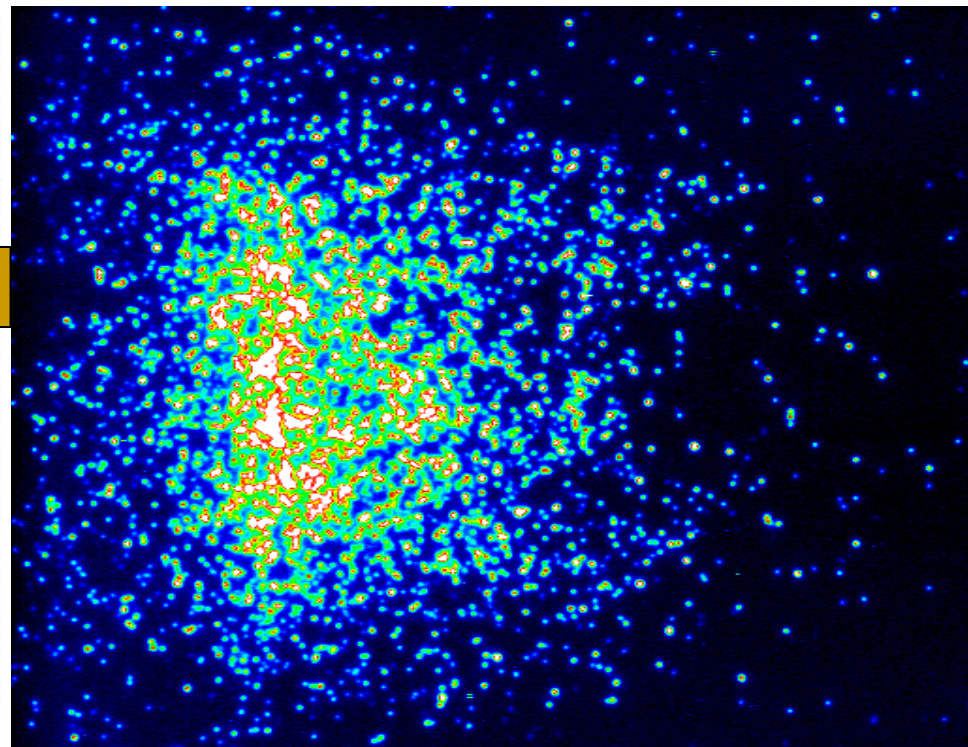
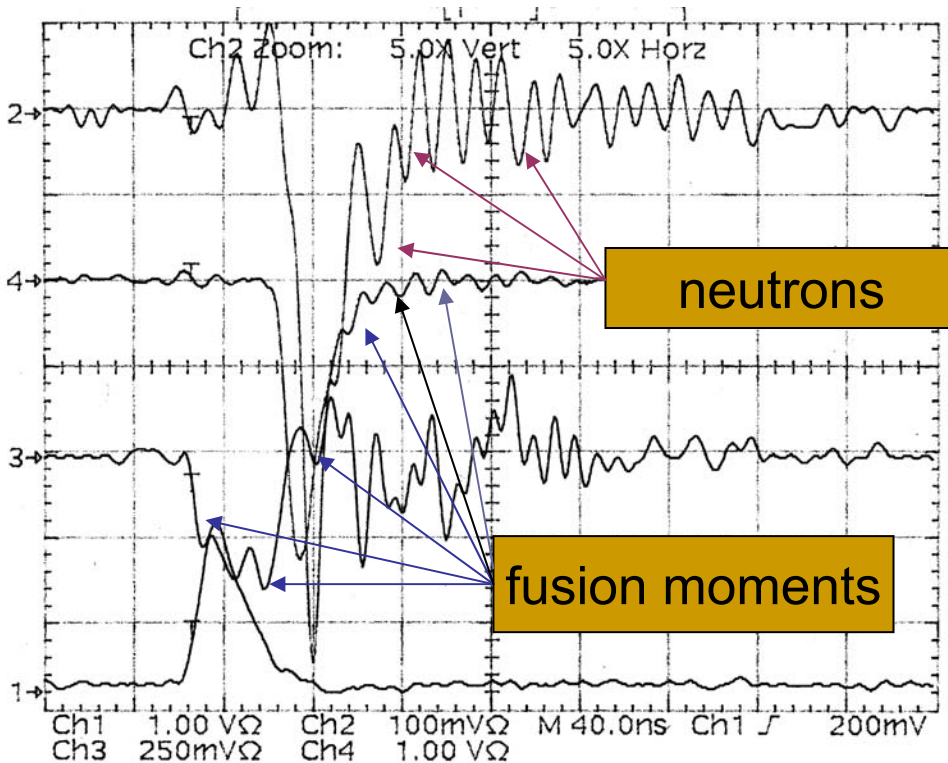




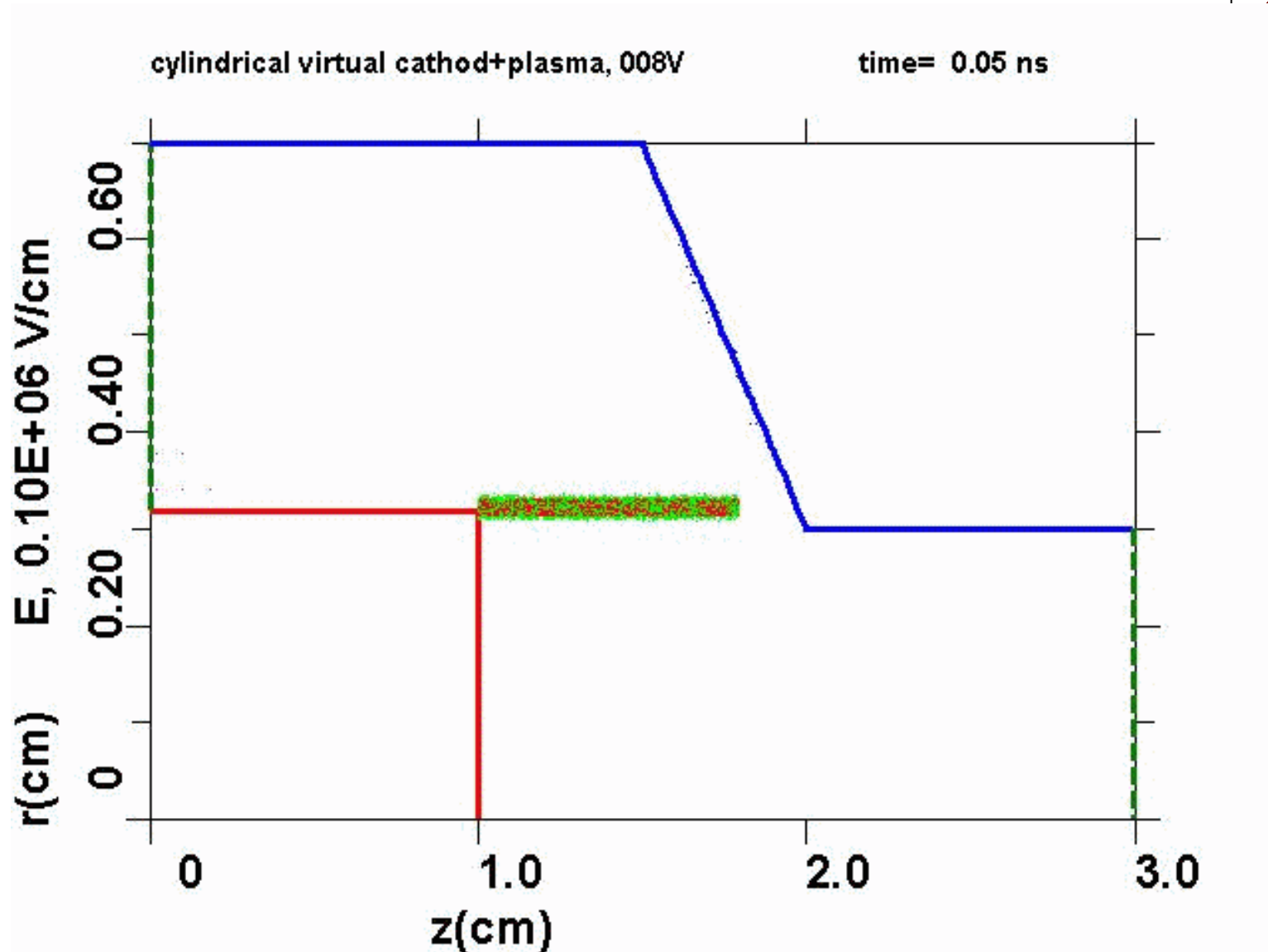
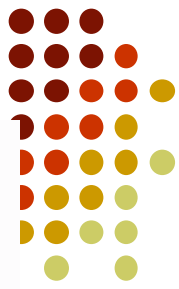
next shots from the same experimental seria.
moderate neutron yield, neutron TOF signal at ch.2 (1005d5)



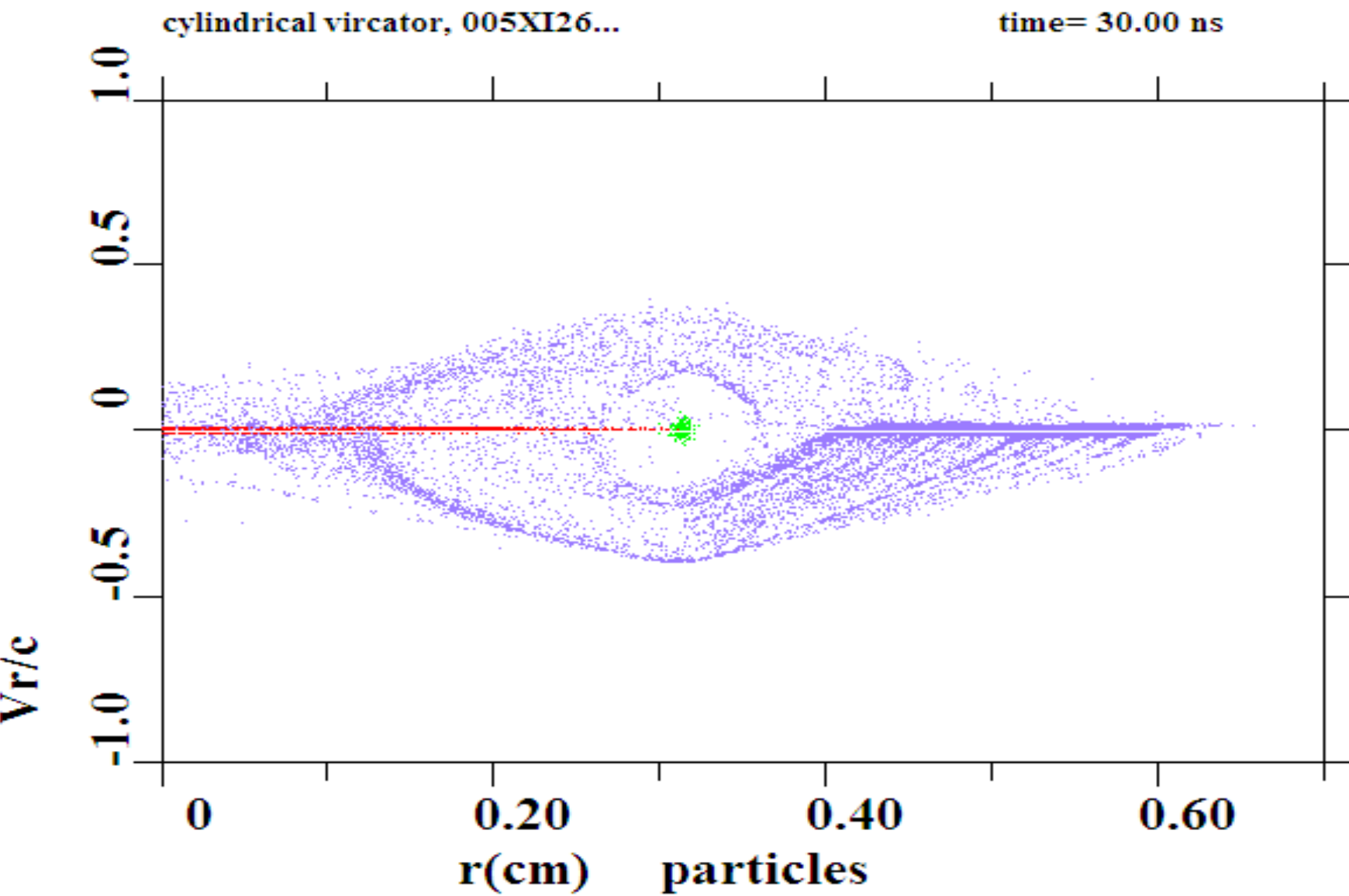
Well-defined multiple fusion events and pulsating neutron yield ($f_{osc.} \approx 80$ MHz, like high freq. POPS)
(PM2+Pb , 0525tri9)



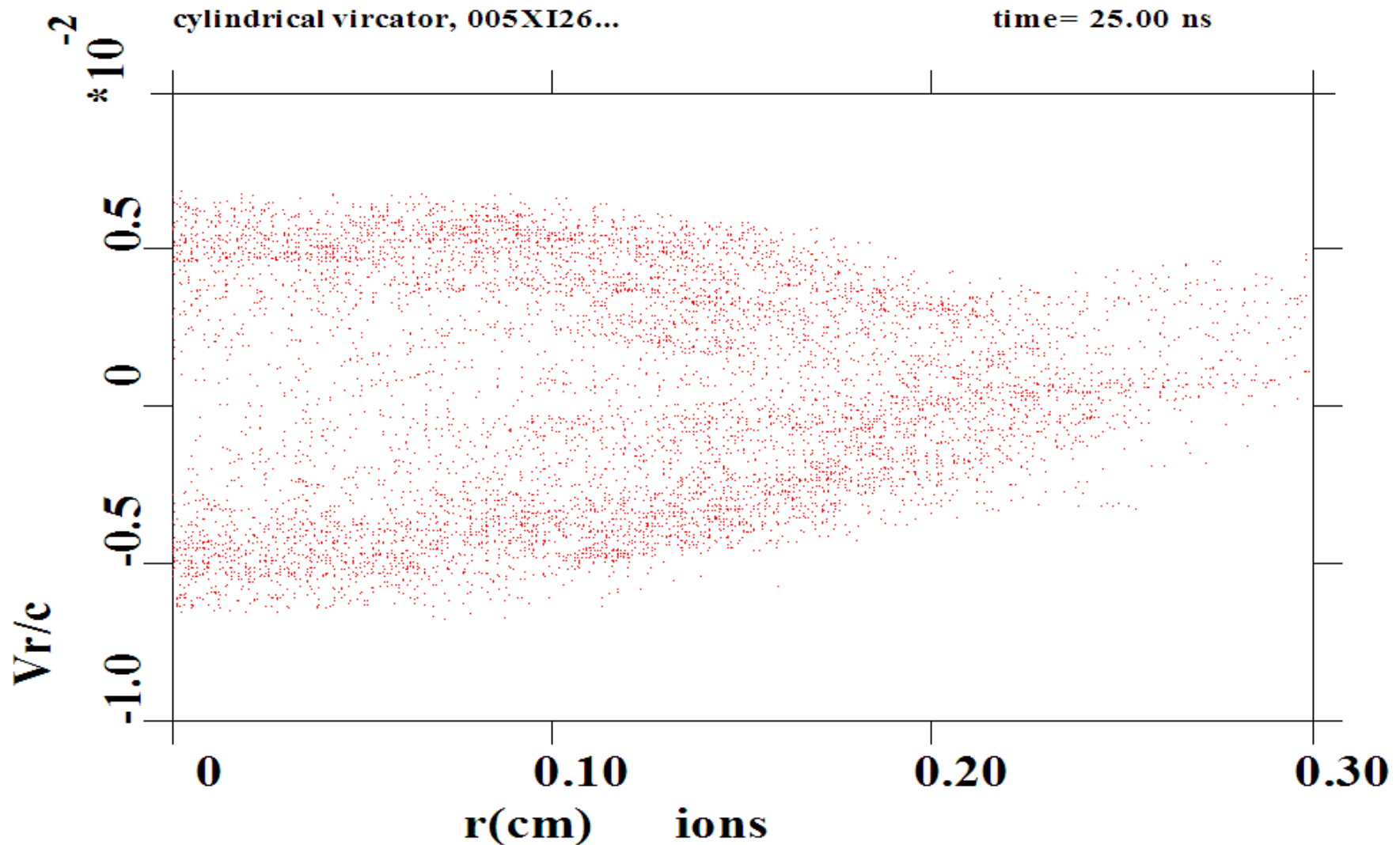
DD nuclear synthesis



Фазовый портрет частиц в режиме образования виртуального катода (ВК)



Радиальные скорости встречных (на оси) ионов как функция радиуса ($W_i^{\max} = 52 \text{ keV}$, $W_i^{\text{mean}} = 21 \text{ keV}$)

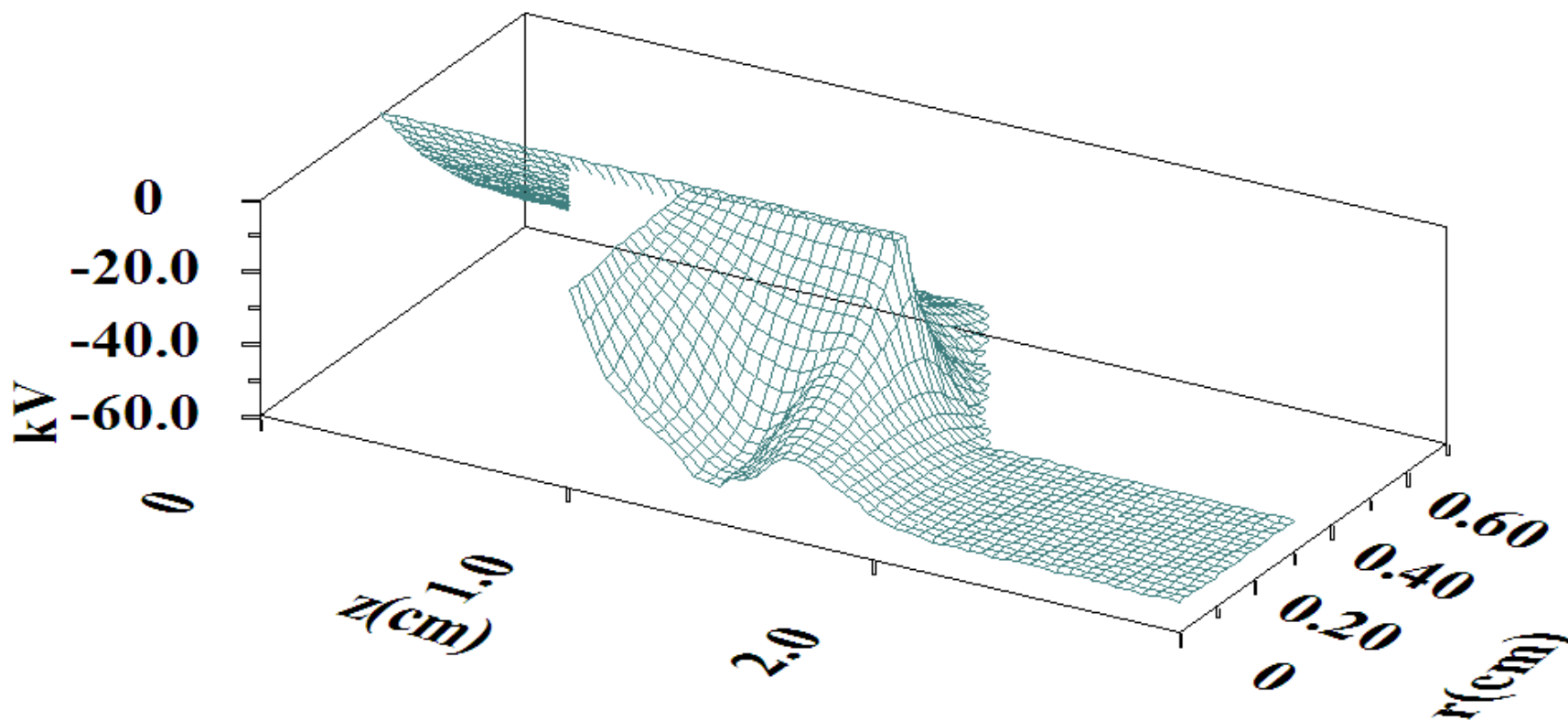


Типичная однократная потенциальная яма в межэлектродном пространстве (расчёт для реальных условий эксперимента)



Potential

time= 37.50 ns



О режимах выхода нейтронов во времени



1) **однократный** (один пик)

$$T_v \approx T_{\text{имп}} = 50 \text{ нсек}$$

2) **Многократный** (два и более нейтронных пиков разной интенсивности)

3) **пульсирующий** (осциляторный) выход

$$T_v \ll T_{\text{имп}} \quad T_{\text{osc}} \approx 12-13 \text{ нсек}$$

простые оценки:

время “скатывания” иона D^+ на “дно” ямы $\approx 2,9$ нсек, ($\approx T_{\text{osc}}/4$),
и максимальная $v_{\text{ion}} \approx 6 \cdot 10^{-2}$ с

- время формирования (восстановления) виртуального катода (ВК) и потенциальной ямы

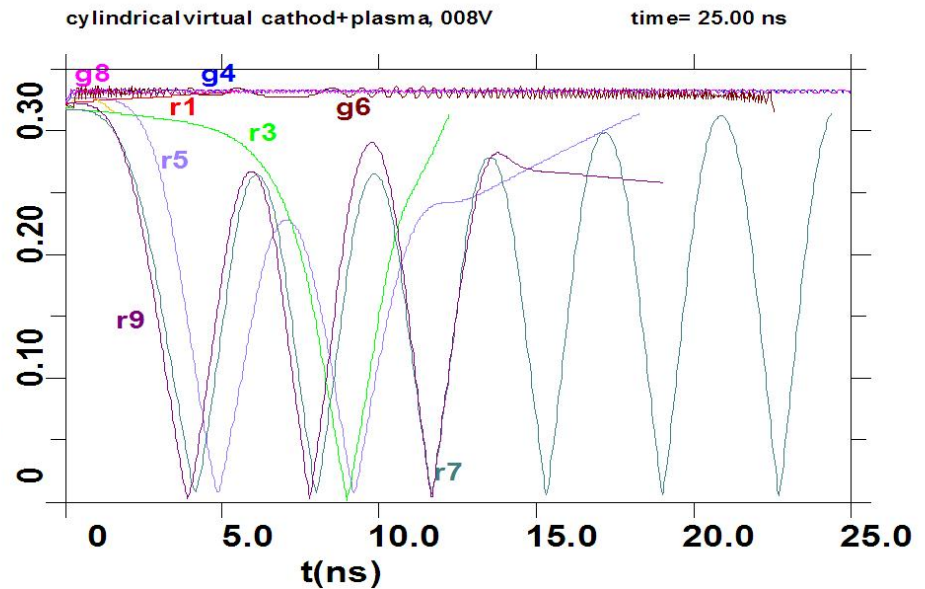
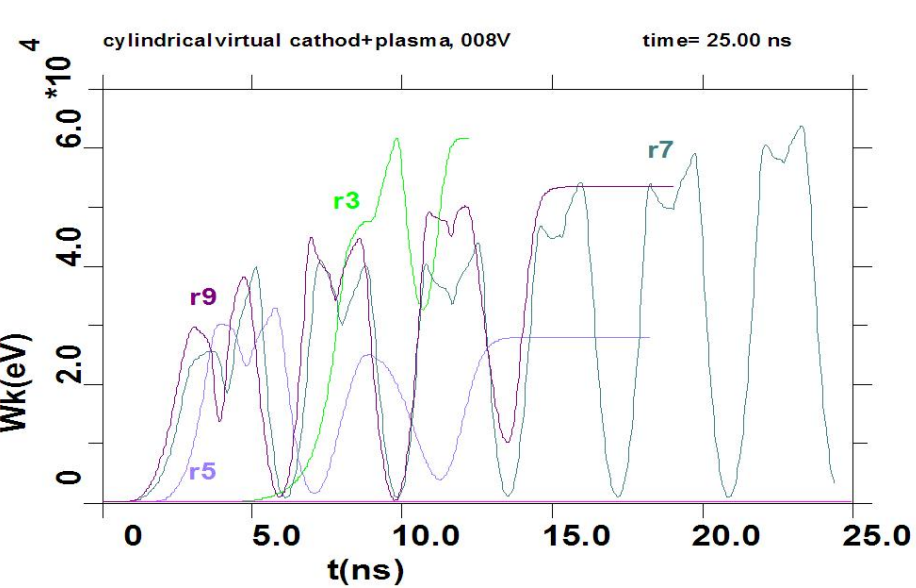
$$T_v \sim C U / I_L$$

- предельный ток CL

$$I_L \sim U^{3/2} / d_{\text{eff}}^2$$

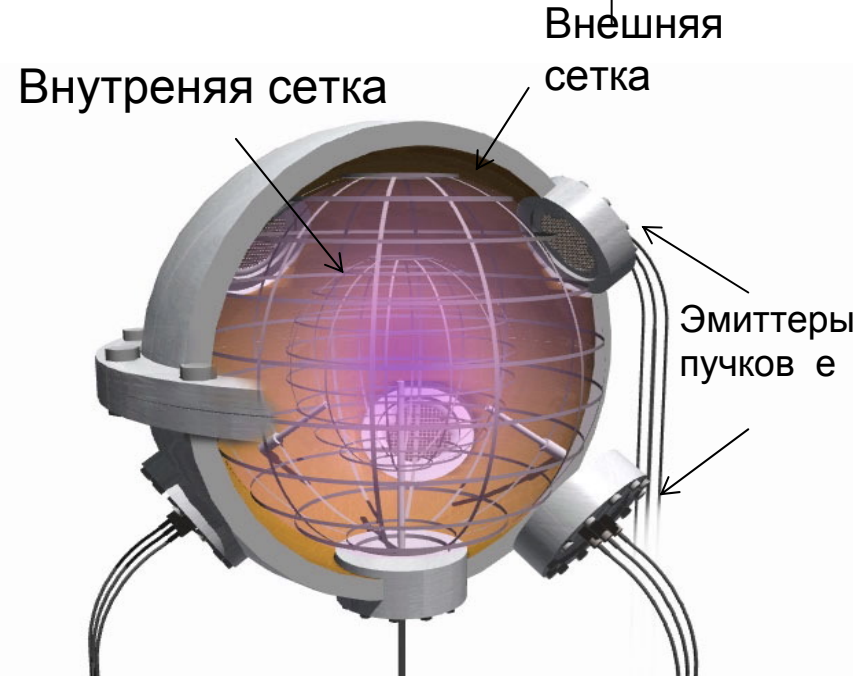
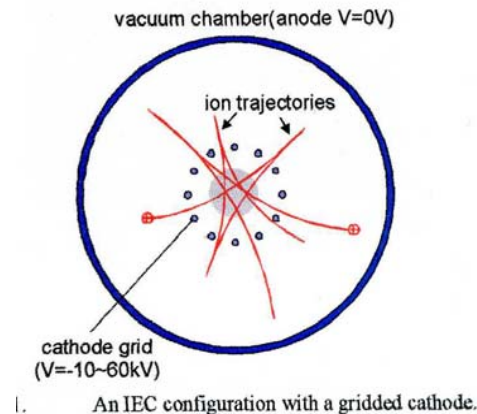
Вариация А-К расстояния d_{eff} в эксперименте позволяет изменять соотношение $T_v/T_{\text{имп}}$, и тем самым - менять режимы выхода нейтронов

Increasing energy of oscillating ions and their trajectories



Экспериментальная установка для исследования ИЕСФ в периодически осциллирующих плазменных сферах (ПОПС, Лос-Аламос 2007) $\omega_{\text{POPS}} < 1 \text{ МГц}$, $\phi_{\text{ПЯ}} < 1 \text{ кэВ}$

- 6 Электронных эмиттеров
 - Управляющий катод
 - Импульсы напряжения $\sim 10 \text{ мкс}$
- Сферические сетки



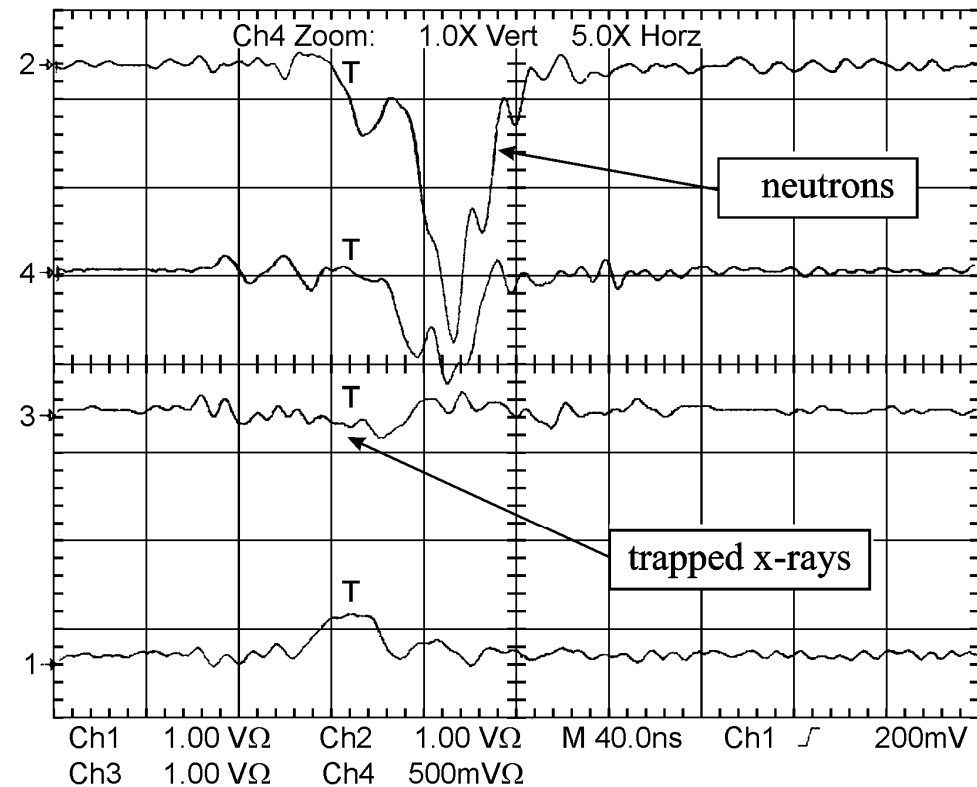
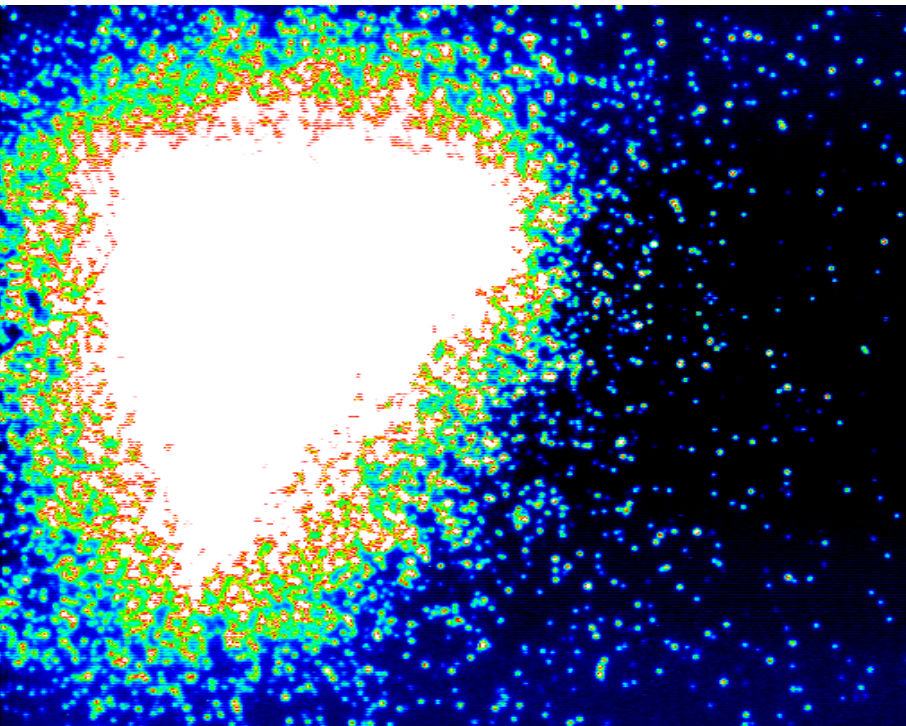
В нашем разряде пучки электронов возникают автоматически, когда прикладывается напряжение, упрощая тем самым схему ПОПС и делая её при этом на порядки эффективнее из-за малых размеров ($\approx 80 \text{ МГц}$, $\phi_{\text{ПЯ}} \sim 55 \text{ кэВ}$)

Схема установки для синтеза с инерционным электростатическим удержанием (ИЕСФ) в Лос-Аламосе, LANL

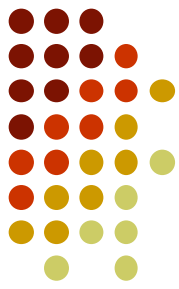
**Another shape of dense ensemble with multiple fusion
and essential x-rays trapping (« microreactor »)
High pulsating neutron yield and almost no x-rays yield
(it provides to register just mainly neutrons at PM4 also)**



- 1018D5, ch.2 -1 V, ch.4- 500 mV



DD neutron yield estimations



- **Our experiment:** total yield $N_{\text{neutrons}} \sim 10^5 - 10^7 / 4\pi$
(under assumption that yield is isotropic one !)

channels for fusion: beam-beam, beam – neutrals, beam-clusters, beam- anode

- **Through POPS physics:** $N_{\text{neutrons}} = \frac{1}{2} n_i^2 \langle \sigma v \rangle V t$

Poisson's Equation $n_e \sim \square^2 \varphi \sim \varphi/a^2$

Fusion power density : $p = \frac{1}{2} \varphi^2 \theta^2 f^2 \langle \sigma v \rangle / a^4 \sim \varphi^2 / r_{\text{BK}}^4$
(per one period of oscillation) , $\theta = r_{\text{max}} / r_{\text{min}}$ $f = n_i / n_e$

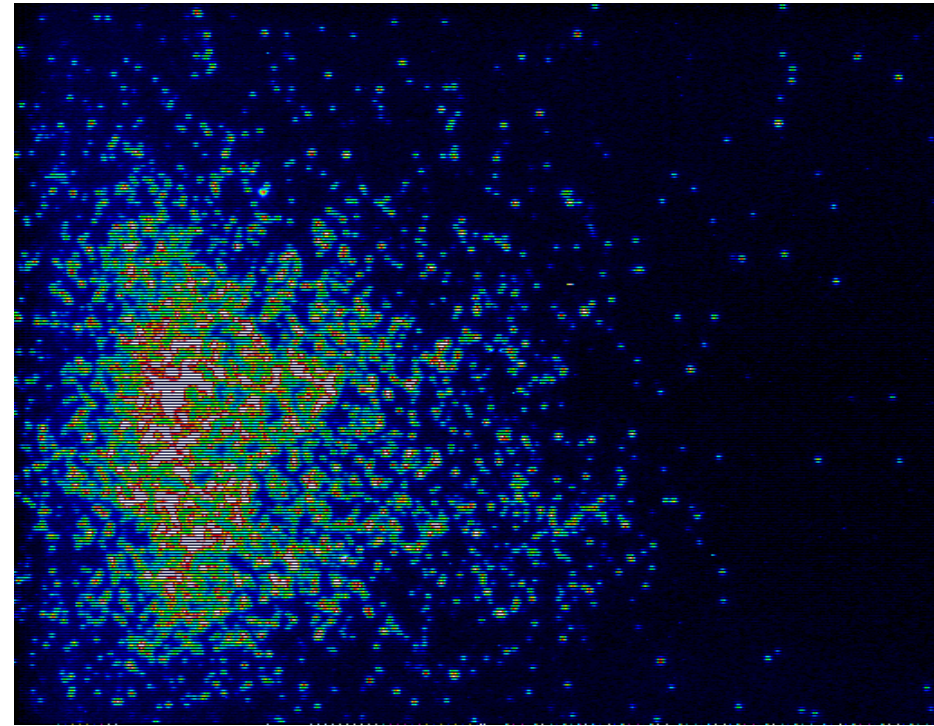
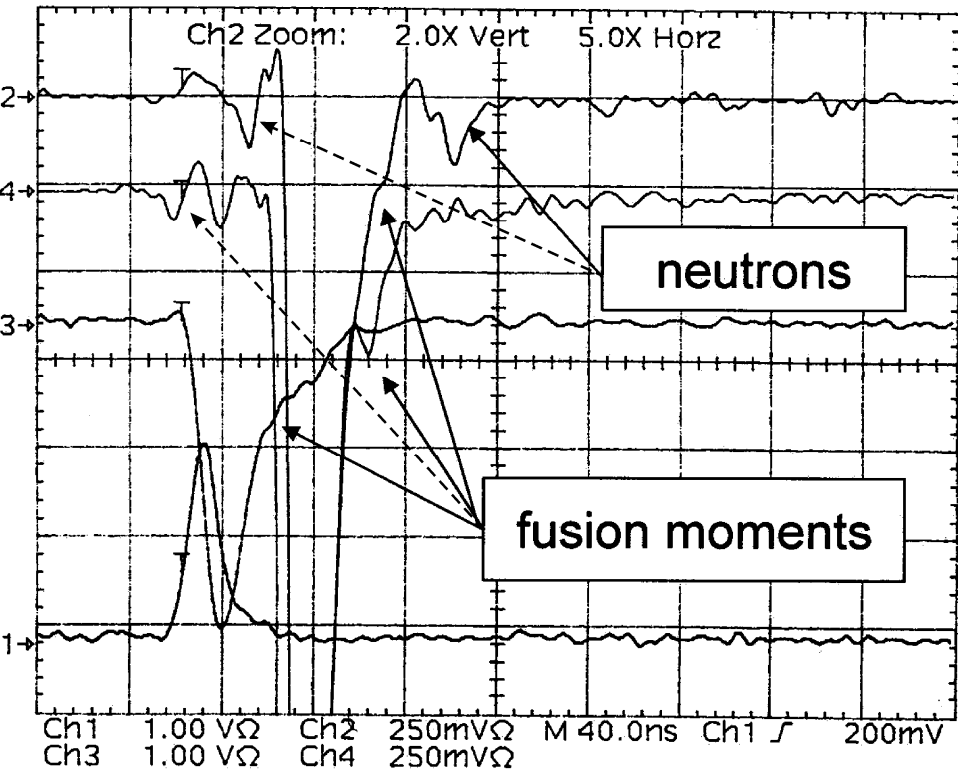
Total power p V : $P_{\text{fusion}} = 3 \theta^2 f^2 \varphi^2 \langle \sigma v \rangle / 2\pi r_{\text{VC}}$

for cylindrical geometry $P_{\text{fusion}} \sim \pi a^2 L p \sim 1/a^2 \sim \varphi^2 / r_{\text{BK}}^2$

Fusion power at our discharge with IECF: POPS

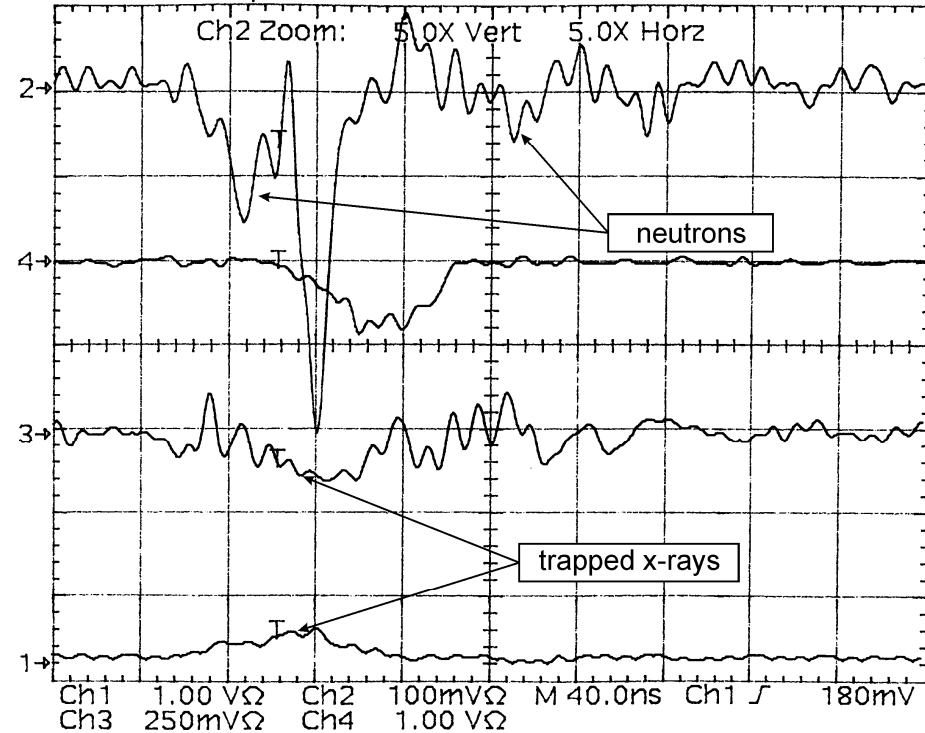
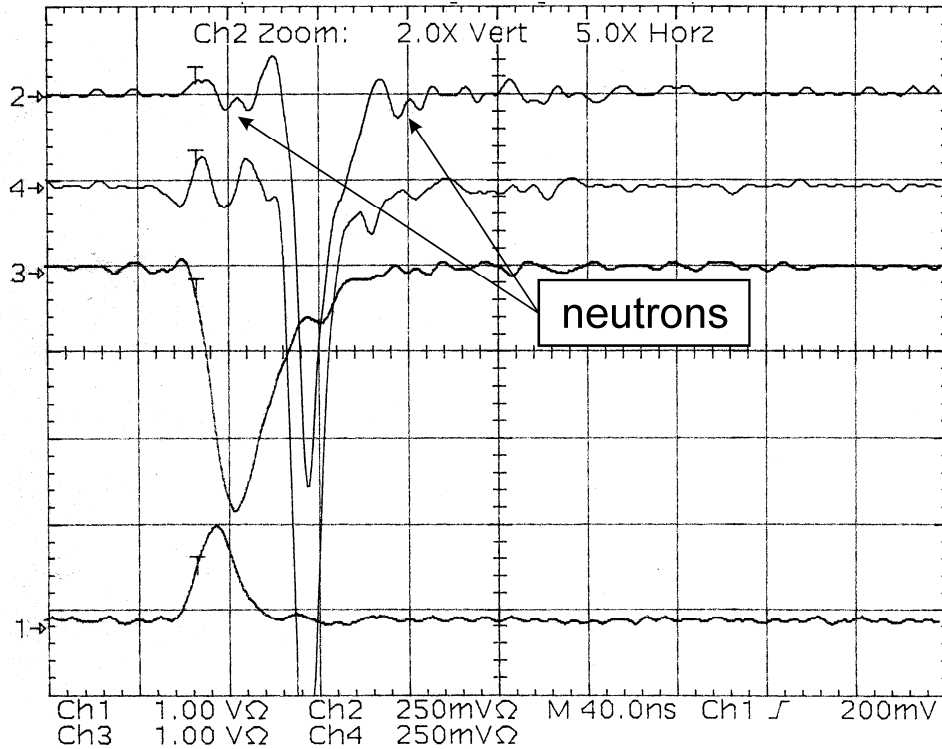
$P_{\text{fusion}} \sim \theta^2 f^2 \varphi^2 \langle \sigma v \rangle L / 2\pi r_{\text{VC}}^2$, $N_{\text{neutrons}} \sim 10^5$
per collapse

Neutron yield is observed when virtual cathode and potential well were formed as well as at very initial stage of discharge sometimes also



A) PIECE OF PARAFFIN HAVE BEEN USED TO SUPPRESS NETRON PEAKS

B) FIRST SHOT AFTER NEXT DEUTERIUM LOADING OF PD ANODE (“CORONAL” ANODE)

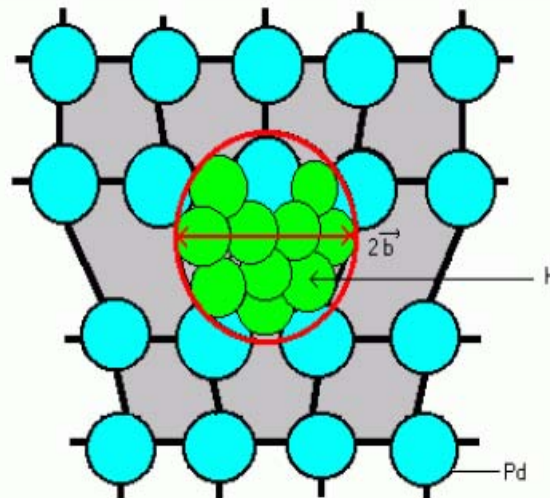


A.G. Lipson, B.J. Heuser, C. H. Castano, G.H. Miley, B.F. Lyakhov and A.V. Mitin, "Transport and Magnetic Anomalies in a Hydrogen-Cycled Pd Foil with a Thermally-Grown Oxide Below 70 K", Phys. Rev. B 72, 082541 (2005); G.H. Miley et al L&P Beams (2009)



A.G. Lipson, I. Chernov et al "Charged Particle Emissions in Metal Deuterides Upon e-Beam Excitation of Their Deuterium Subsystem" IC CMNP, Rome; Dokladi RAN 2009

Edge dislocation core in Pd with H_n -"metallic" hydrogen phase: Dislocation core is a nanotube with radius $R_H = b$ (Burgers vector)

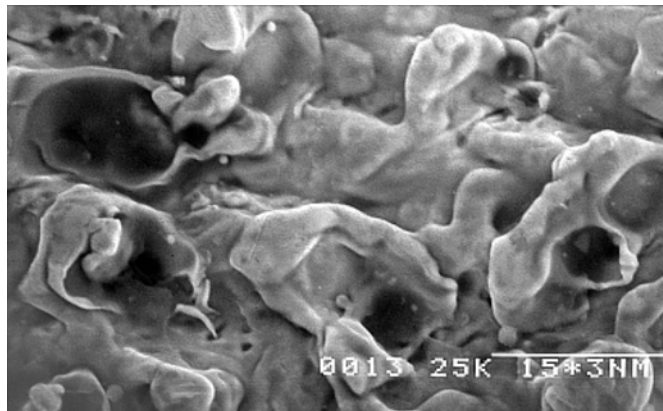


$$\begin{aligned} & \text{Pd}(\bar{1}\bar{2}1) \\ & \vec{b}[\bar{1}01] = 2.75 \text{ \AA} \end{aligned}$$

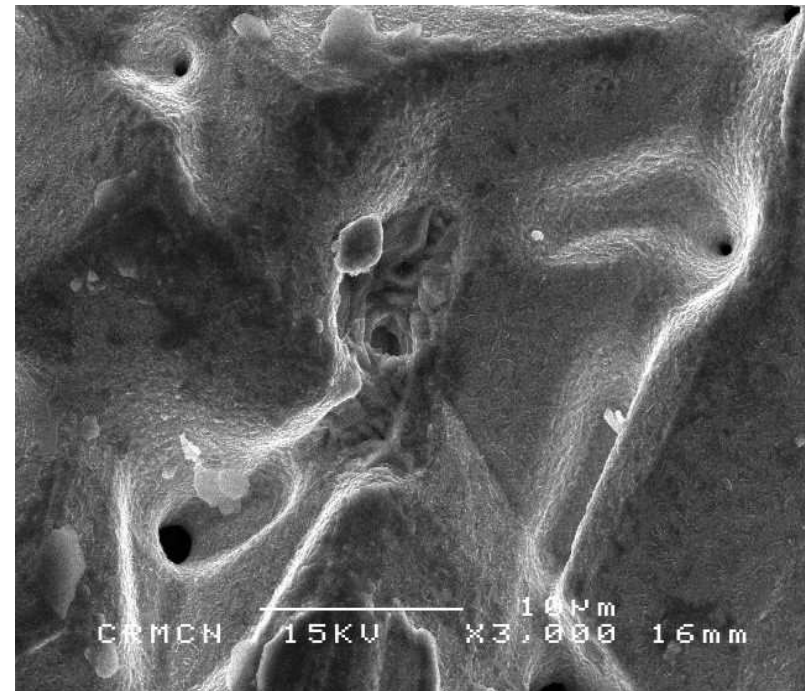
Скэйлинг : высокая плотность мощности синтеза ($\sim \varphi^2 / r_{\text{ВК}}^4$) в миниатюрном цилиндрическом разряде (полная мощность $\sim \varphi^2 / r_{\text{ВК}}^2$). Возможно повышение эффективности синтеза при $r_{\text{ВК}} \rightarrow 0$, с выходом на $Q > 1$ при **уменьшении радиусов до микро- и наноразмеров.**



Анодные кратеры и анодные эктоны (SEM, Г, Вальяно)



Поверхность отожжённой Pd фольги: наличие пор и **каналов микронных размеров** ($\sim 10^5$ на см^2)



Заключительные замечания:



- Демонстрируется столкновительный DD ядерный синтез в межэлектродной среде вакуумного разряда при малом энергоотводе. Выход нейтронов составляет $\sim 10^5 - 10^7/4\pi$ (в изотропном приближении) на 1 Дж энергии, введённой в разряд. Эффективность источника может быть на два порядка выше, чем при лазерном облучении дейтериевых кластеров (T.Ditmire et al. *PRL* 84(2000)634).

- PIC моделирование прояснило в целом физику процессов : многократный DD синтез в комплексной стохастической межэлектродной среде есть проявление коллективного ускорения ионов и их периодических встречных столкновений (как между собой, так и с дейтерийсодержащими кластерами) в потенциальной яме, образуемой виртуальным катодом. Работа расширяет имеющуюся активность по инерционному электростатическому удержанию (IECF -J.Park et al *Phys.Plasmas* 12, (2005)), включая высокочастотные осцилляции ионов, и демонстрирует высокую плотность мощности синтеза ($\sim \varphi^2 / r_{ВК}^4$) в миниатюрном разряде.

- На самой начальной стадии разряда может также наблюдаться выход нейтронов. Природа этого менее исследованного эффекта (“warm fusion”) обсуждается. Требуется новый эксперимент и детальная диагностика.

Yu.K.Kurilenkov and M.Skowronek *J.Phys.A: Math&Gen* v.39 (2006) 4375;

Yu.K.Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov et al. v 42 (2009) 214041;
Plasma Physics Reports, 2010, Vol. 36, No. 13, pp. 1219 ; No. 13, pp. 1227