

Энергетическая
зависимость средней
энергии образования пары
ионов в водороде.

Г.А.Королёв

5 июня 2012 г.

План доклада.

1. Введение: определение термина «средней энергии, затраченной на образование одной пары ионов» - величины W .
2. Существующие данные об энергетической зависимости величин W .
3. Использование ионизационного детектора ядер отдачи ИКАР для измерения величины W .
4. Результаты измерения с помощью ионизационной камеры величины W для альфа-частиц в газах (водород, дейтерий, $\text{He}+\text{H}_2$, $\text{Ar}+\text{CH}_4$).
5. Результаты измерения W для протонов отдачи в водороде (эксперимент в Серпухове на пучке π -мезонов с энергией 40 ГэВ).
6. Обсуждение полученных результатов.

Средняя энергия W , идущая на образование одной пары ионов

$W = E/N$, E – энергия ионизирующей частицы
 N – полное число пар ионов

Дифференциальное значение средней энергии

$$w = dE/dN$$

$$w(E) = \frac{W(E)}{1 - \frac{E}{W(E)} \frac{dW}{dE}}$$

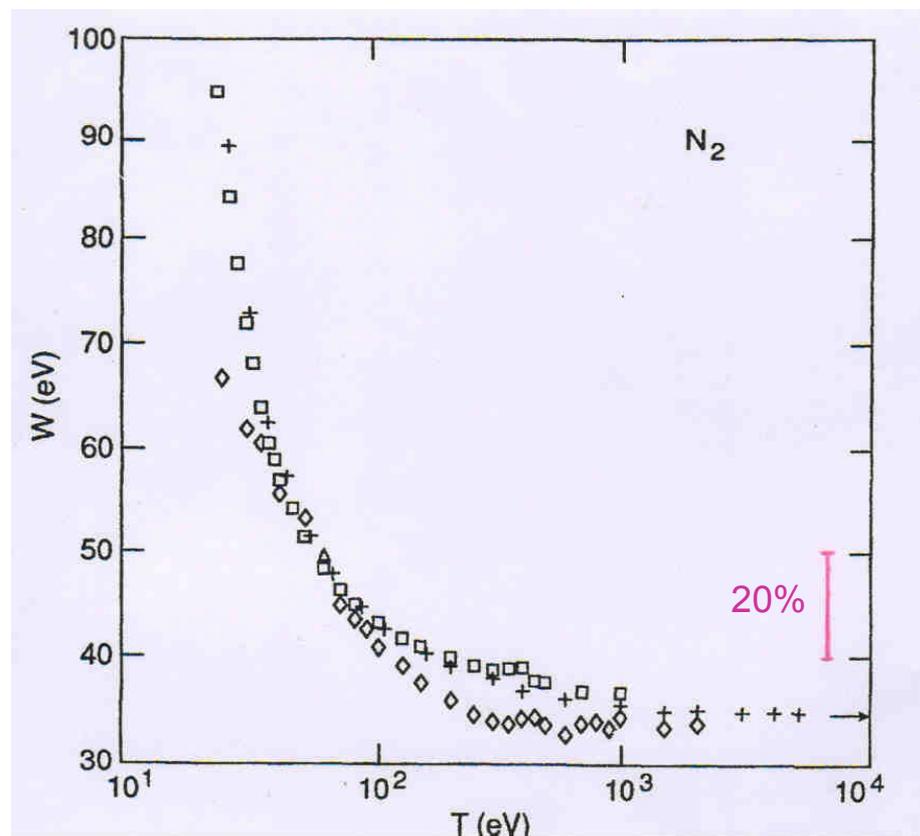
Энергетическая зависимость W :

- ионизационные детекторы,
- дозиметрия,
- радиационная терапия,
- астрофизика, планетология

Обзор работ по W :

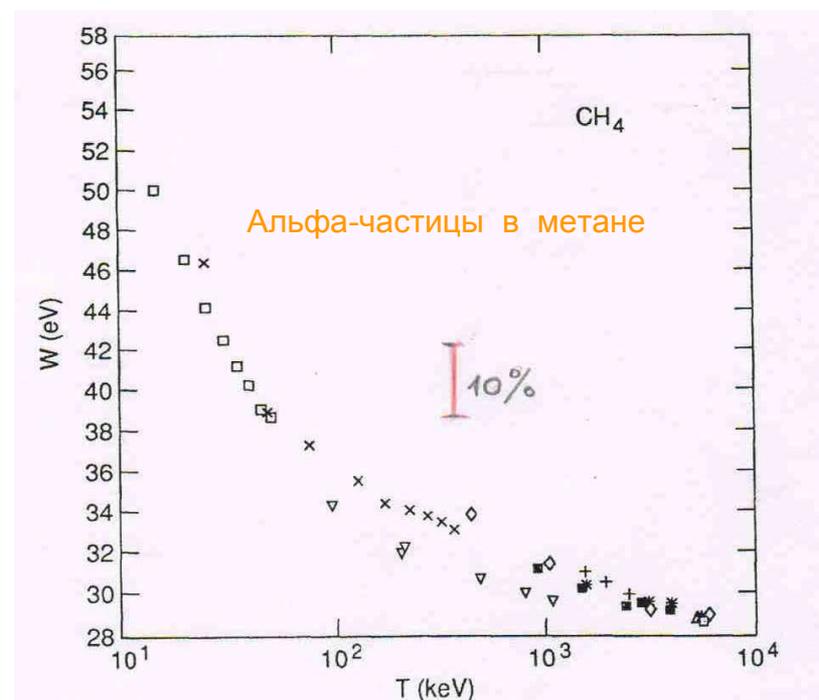
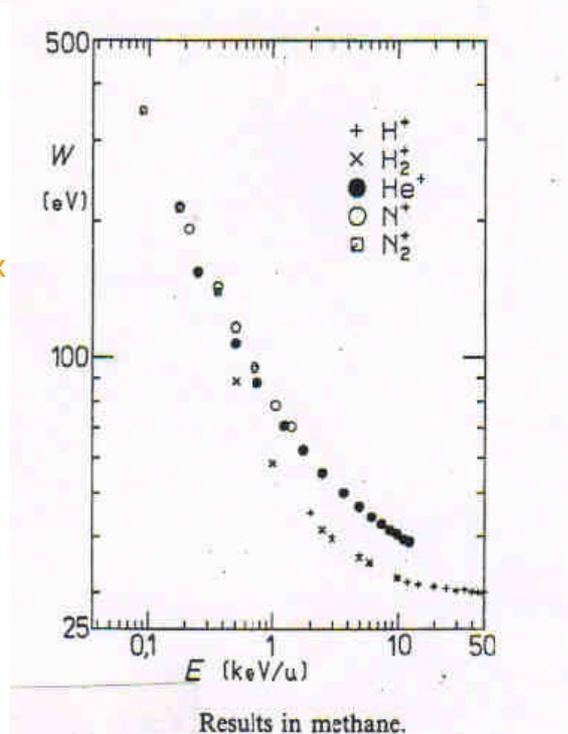
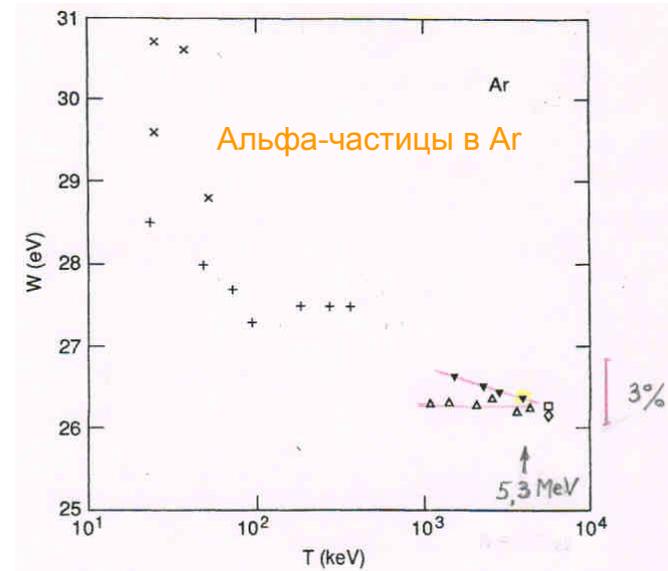
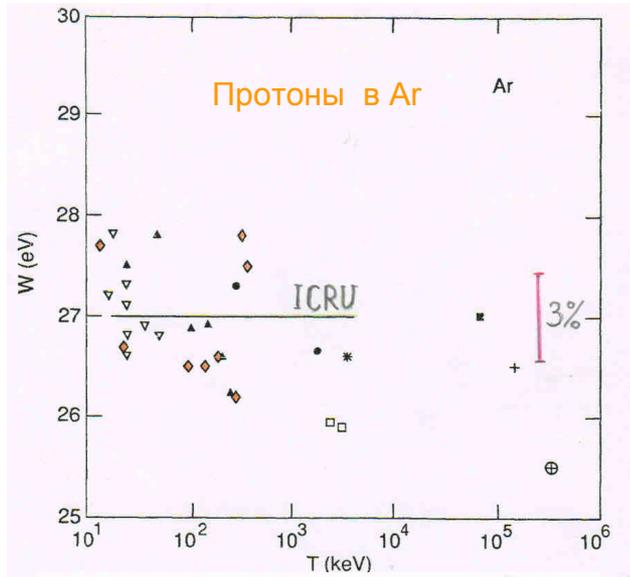
1. International Commission on Radiation Units and Measurements ICRU Report 31 (1979, 1993)
2. International Atomic Energy Agency IAEA-TECDOC-799 (1995)

При высоких энергиях W постоянно,
При низких энергиях W быстро растет.
Данные разных авторов сильно различаются.

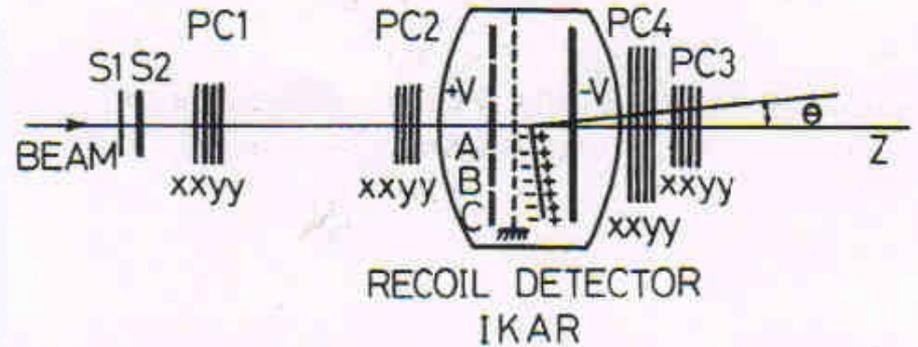
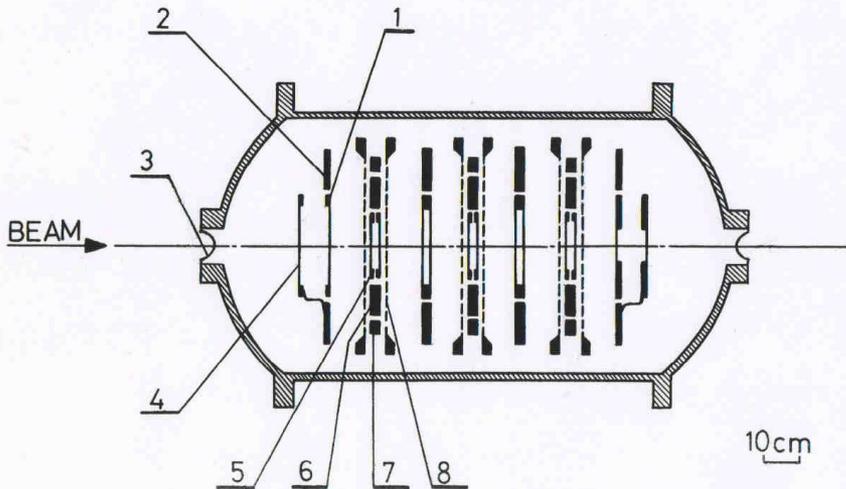


Электроны в азоте

Экспериментальные значения W в газах



Ионизационный детектор ядер отдачи ИКАР



Ионизационная камера ИКАР – классический образец активной мишени.

Пучки: протоны, нейтроны, пи-мезоны, ионы He, Li, Be, B, C
 Наполнение: H₂, CH₄, D₂, He + H₂.

Всегда измеряется сечение $d\sigma/dt$.

Шкала по $-t$ измеряется

$$1) \quad -t = 2mT_R,$$

m – масса ядра отдачи,
 T_R – энергия ядра отдачи.

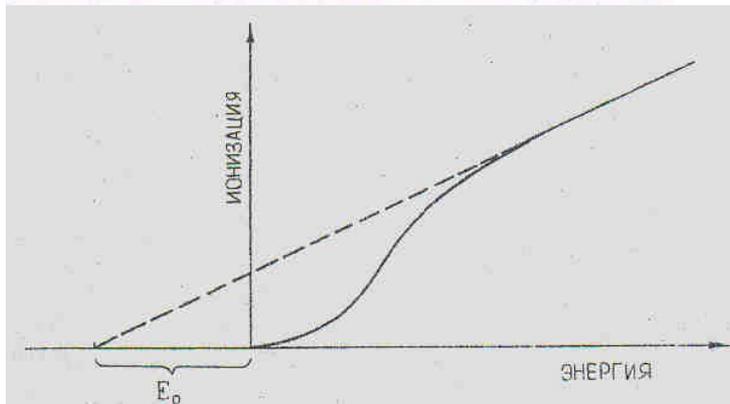
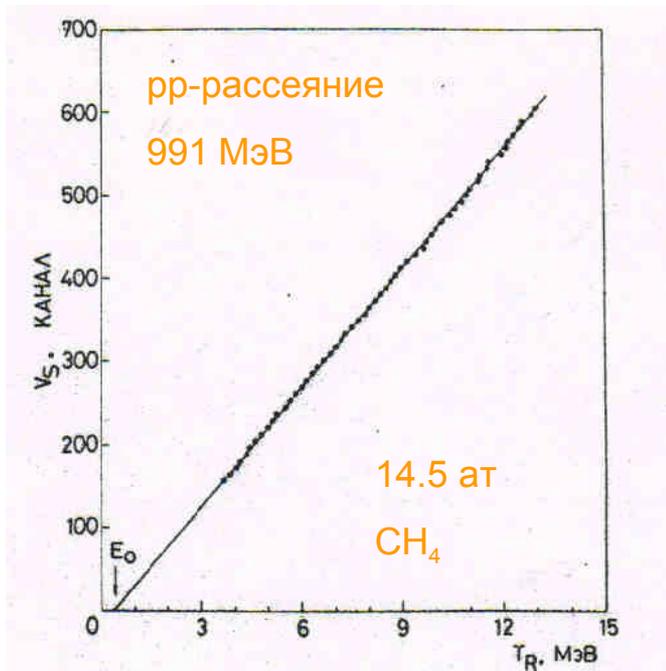
$$2) \quad -t = p^2\theta^2,$$

p – импульс налетающей частицы
 θ – угол рассеяния налетающей частицы

T_R определяется по ионизации в ионизационной камере, что требует энергетической калибровки.



Калибровка по энергии сигналов с ионизационной камеры



Калибровка: 1) по альфа-линии

2) по углу рассеяния налетающей частицы

$$T_R = p^2 \theta^2 / 2m .$$

Связь амплитуды V_R и энергии ядра отдачи T_R :

$$T_R = k V_R + T_0 ,$$

где T_0 и k – параметры, зависящие от газа,

давления и электрического поля. $T_0 = 400$ кэВ в CH_4

Если использовать обе калибровки, то

$$T_R = \frac{(E_\alpha - T_0)}{\beta V_\alpha} V_R + T_0$$

где $\beta = V_R / V_\alpha$ при $T_R = E_\alpha$

Следствия: 1) можно найти $W = f(E)$

2) для H_2 было получено (ЦЕРН,

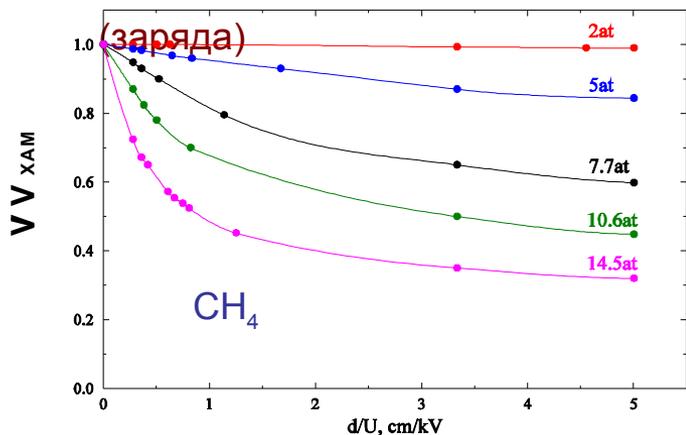
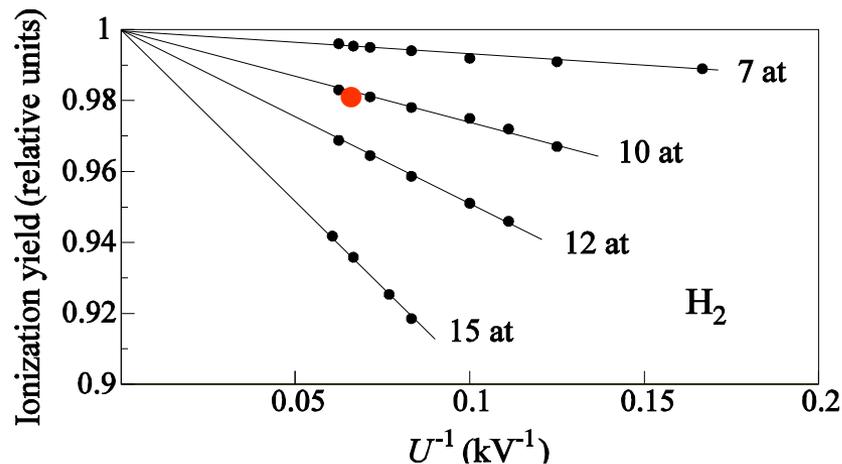
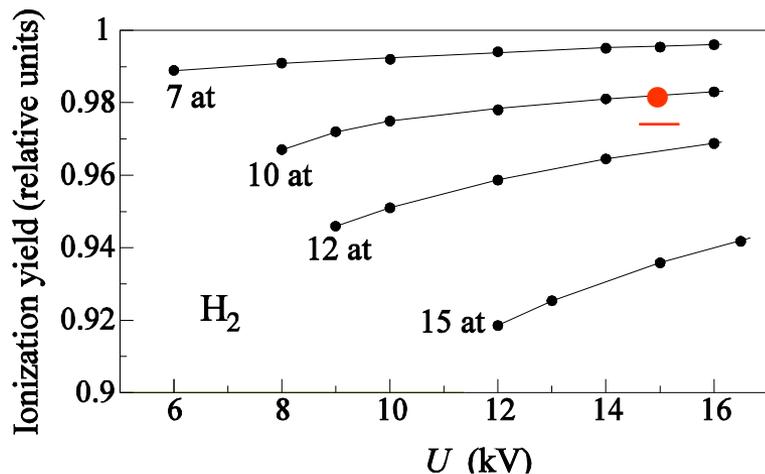
Серпухов, Гатчина) $T_0 < 0$ и $\beta < 1$

Эксперимент в Гатчине с набором α -источников

(1980). Наполнение H_2 , D_2 , $\text{He} + 10.9\% \text{H}_2$, $\text{Ar} + 4.6\% \text{CH}_4$ при разных давлениях и напряжениях.

Результат: в водороде и дейтерии также получено значение $T_0 < 0$. (Препринт ЛИЯФ-549)

Рекомбинация в газе ионизационной камеры



На точность измерения амплитуды сигнала

могут повлиять:

- 1) рекомбинация
- 2) прилипание (примеси O_2 , H_2O)
- 3) неэкранировка сетки

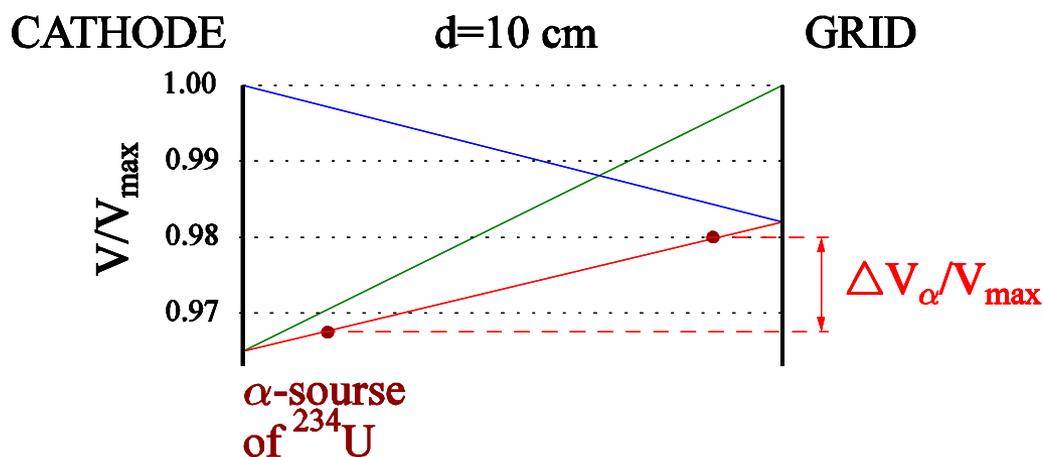
При рабочих условиях (10 ат. H_2 , 15 кВ) $f_\alpha = 0.982$

Можно полагать, что для протонов $f_p \approx 1.0$

Рекомбинация в CH_4 $f_\alpha = 0.75$

в He $f_\alpha = 0.997$

Эффективность сбора заряда на аноде в зависимости от места его возникновения в области катод - сетка



- loss of electrons due to adhesion
- limited transparency of the grid
- total efficiency of charge collection

Неэкранировка

$$V = V_{\max} (1 - \delta Z/d)$$

Прилипание

$$V = V_{\max} (1 - \eta + \eta Z/d)$$

Общее

$$V = V_{\max} [1 - \eta - (\delta - \eta) Z/d]$$

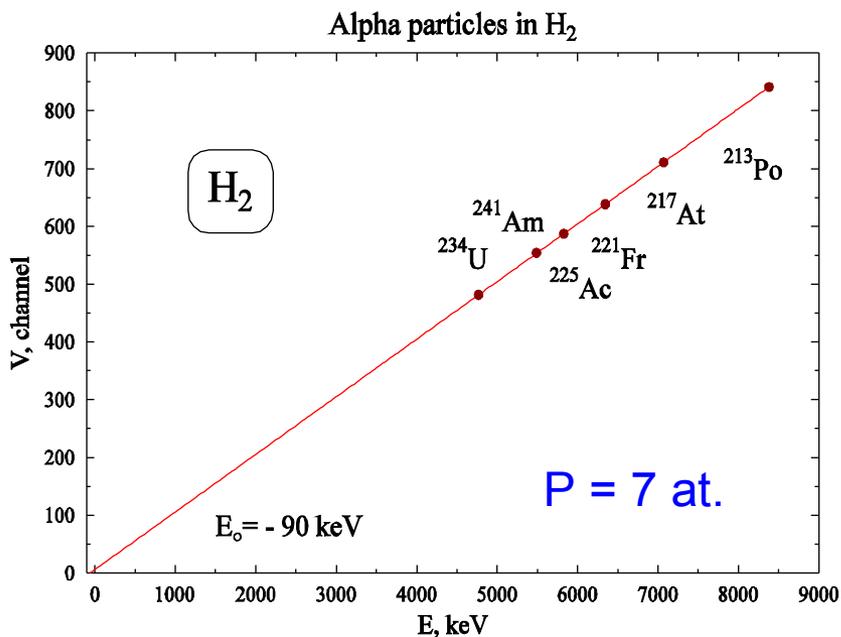
Z – расстояние от катода до ц.т. трека

η – доля потерянных электронов

δ – неэффективность экранировки (~ 0.018)

α -источники нанесены на катод и на сетку

Эксперимент с α -источниками



ИЗОТОП	ЭНЕРГИЯ. кэВ	Ar + CH ₄	H ₂	He + H ₂	D ₂
213Po	8375.9(25)	26.00	36.66	32.51	
217At	7066.9(16)	26.05	36.60	32.57	
221Fr	6341.0(13)	26.10	36.55	32.60	
225Ac	5829.6(14)	26.12	36.51	32.60	
241Am	5485.56(12)	26.15	36.43	32.60	36.29
234U	4774.6(14)	26.20	36.40	32.69	
210Po репер	5304.33(7)	26.15	36.43	32.60	

Для нормировки использованы данные:

H_2 – ICRU Report (1979)

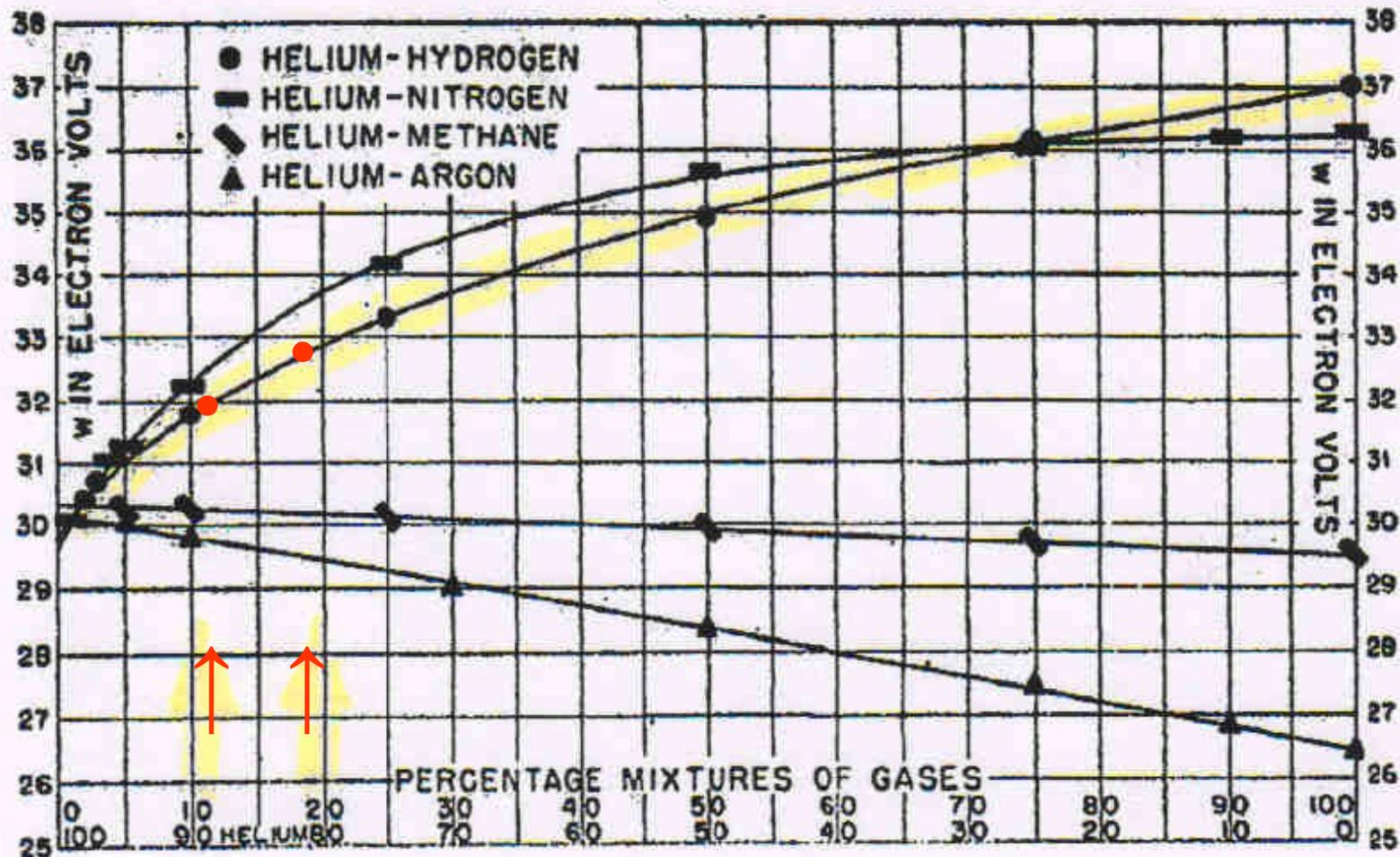
Ar + CH₄ – H.Tawara et al. (1987)

He + H₂ – T.Bortner and G.Hurst (1954)

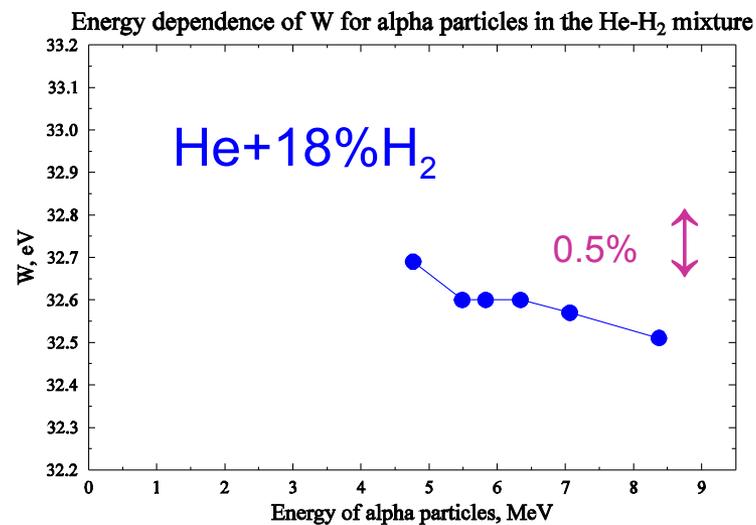
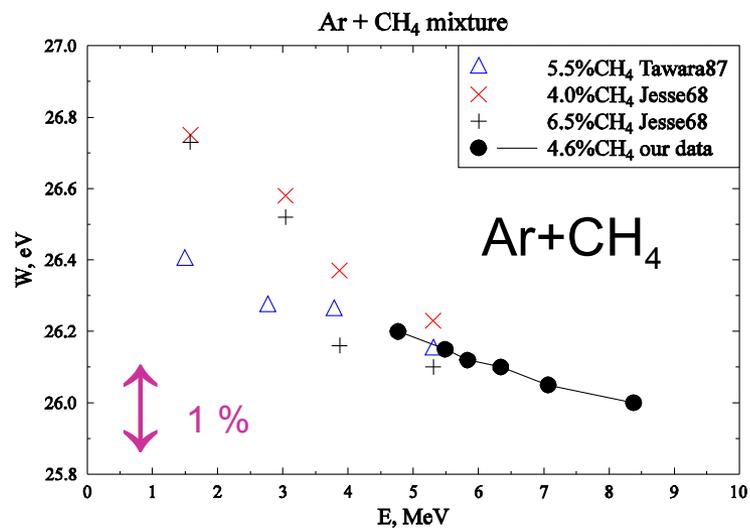
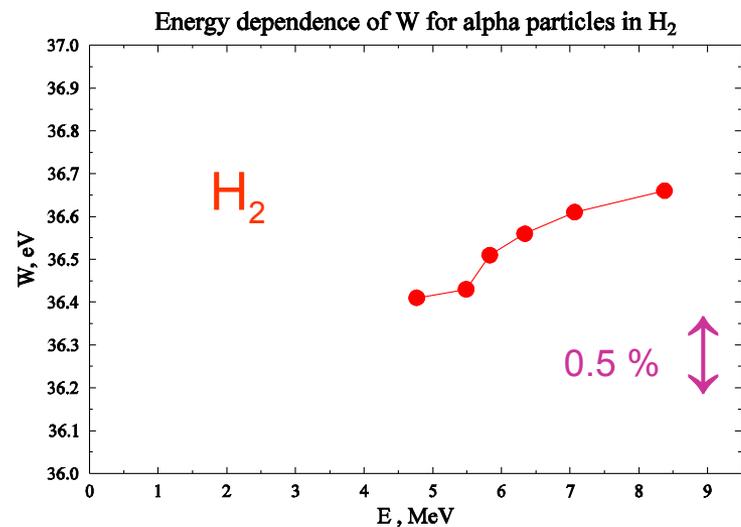
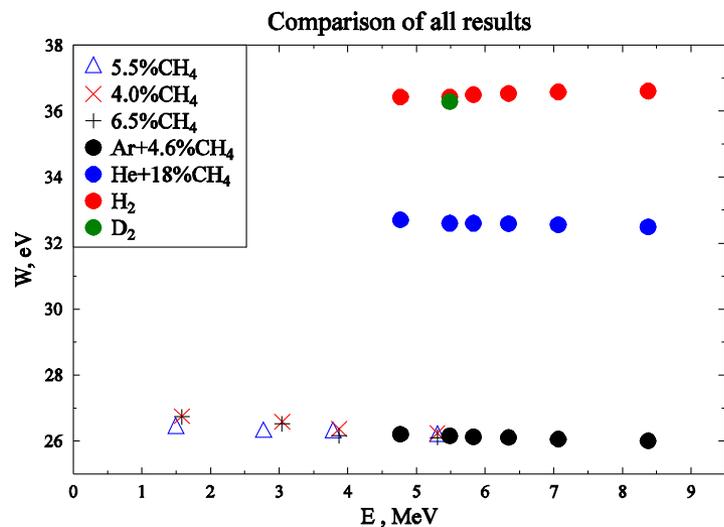
точность репера 1.7%, 0.75%, 0.75%

Выбор значения W для нормировки энергетической зависимости, полученной для смеси гелия и водорода.

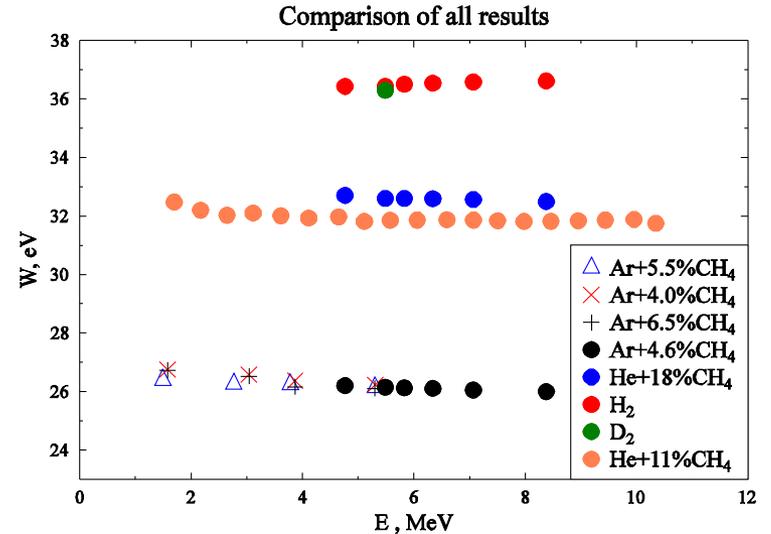
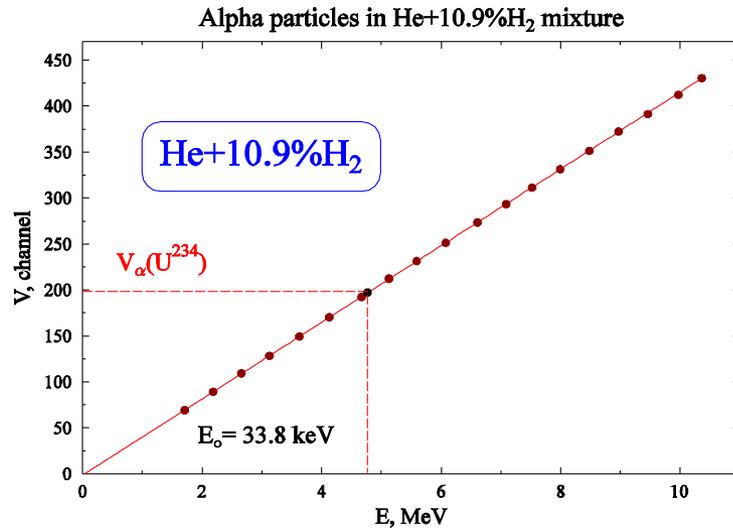
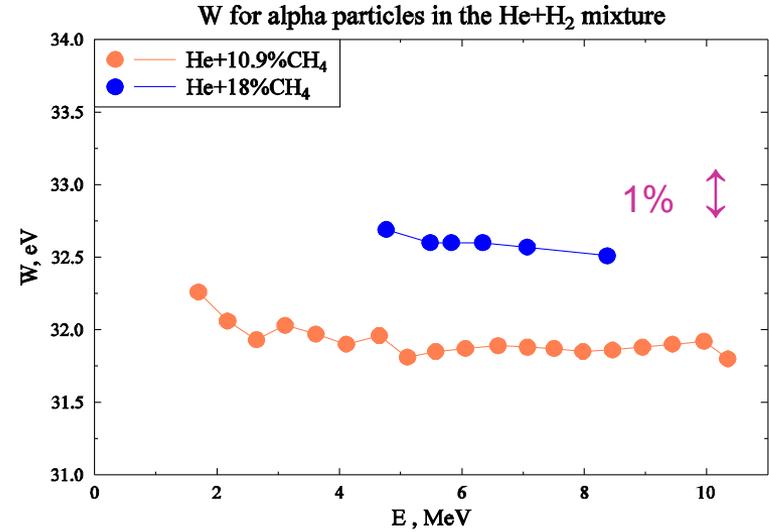
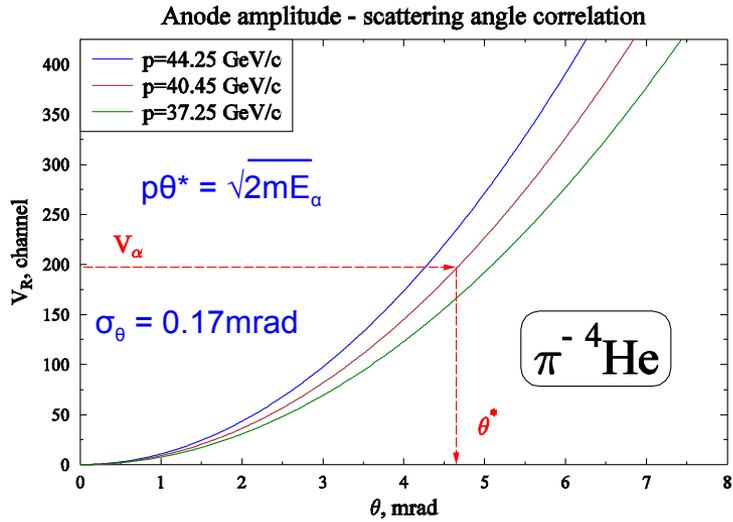
T.Bortner and G.Hurst, Phys.Rev.93, 1236 (1954). Точность абсолютных измерений 0.75%.



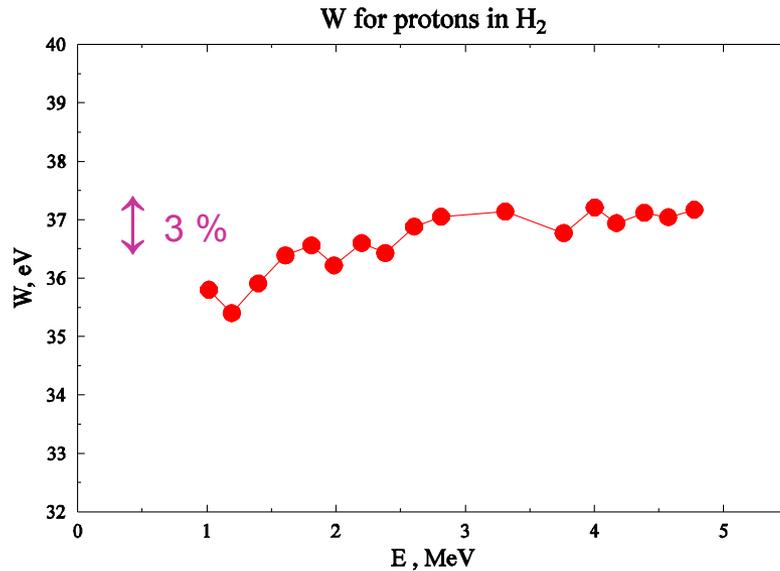
Результаты измерений W для альфа-частиц



Эксперимент в Серпухове: π He - рассеяние



Эксперимент в Серпухове: πR - рассеяние



Для протонов в водороде калибровка

$$T_R = kV_R + T_0 \quad \text{или}$$

$$T_R = V_R(E_\alpha - T_0) / \beta V_\alpha + T_0$$

при $T_R^* = E_\alpha$ $\beta = V_R^* / V_\alpha$

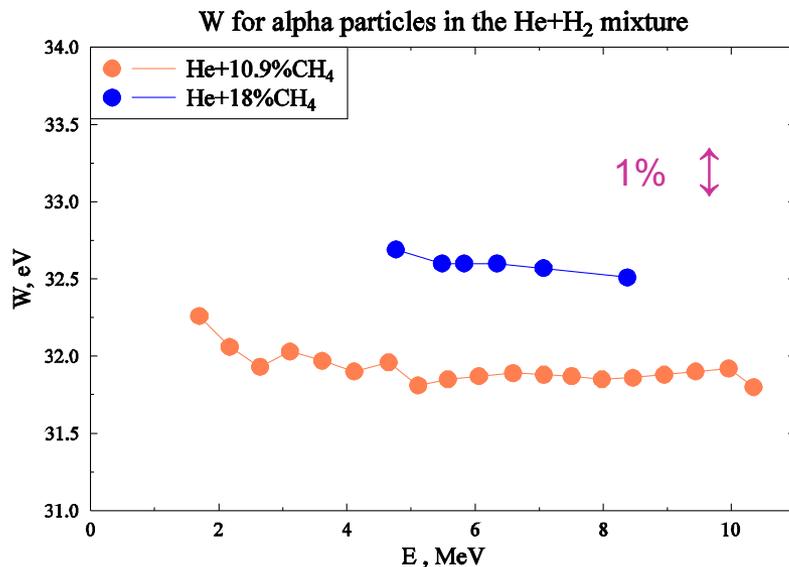
$$\beta = 0.998 \pm 0.005$$

$$T_0 = - (62.1 \pm 6.6) \text{ кэВ}$$

Нормировка W_p протонов в водороде по

$$W_\alpha = 36.43 \text{ эВ для альфа-частиц } ^{234}\text{U}$$

$$(E_\alpha = 4.7746 \text{ МэВ})$$



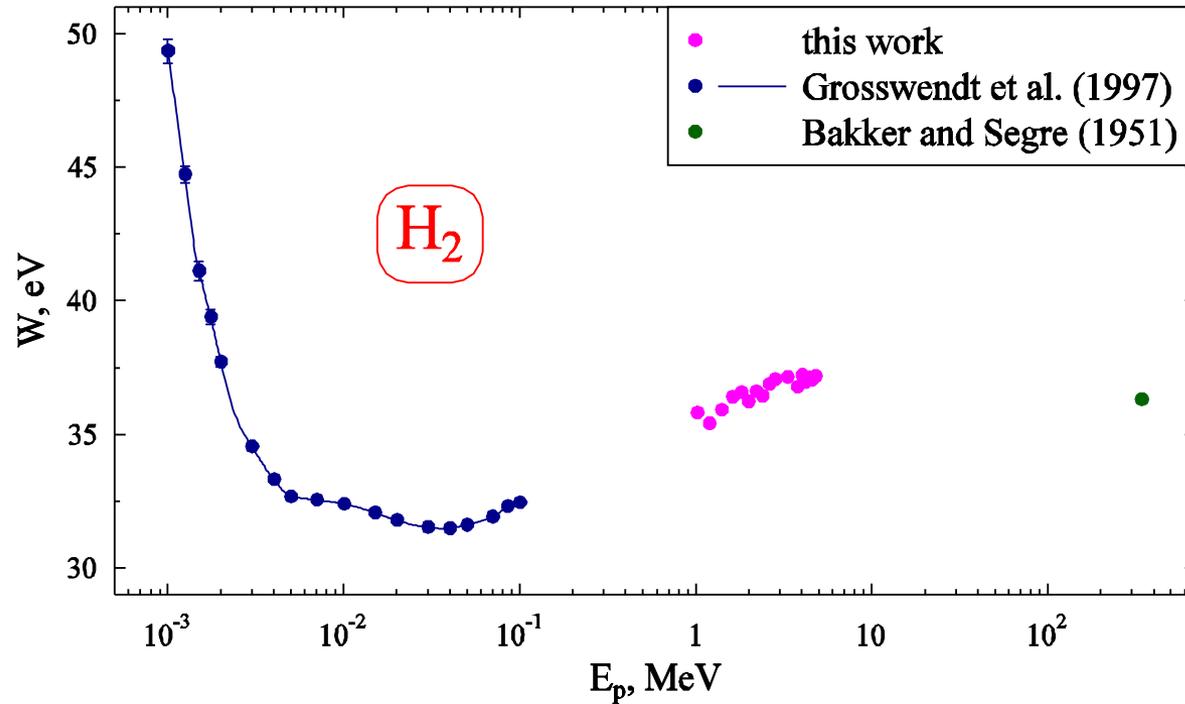
При условии $T_R^* = E_\alpha$

$$V_R^* / V_\alpha = f_p W_\alpha / f_\alpha W_p$$

$$W_p = f_p W_\alpha / f_\alpha \beta$$

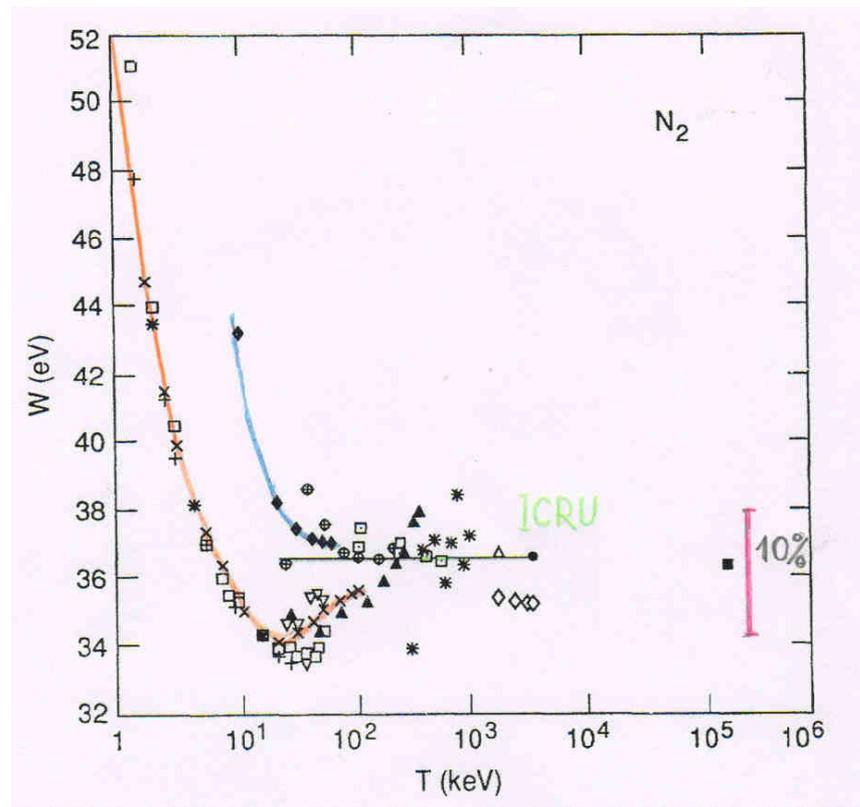
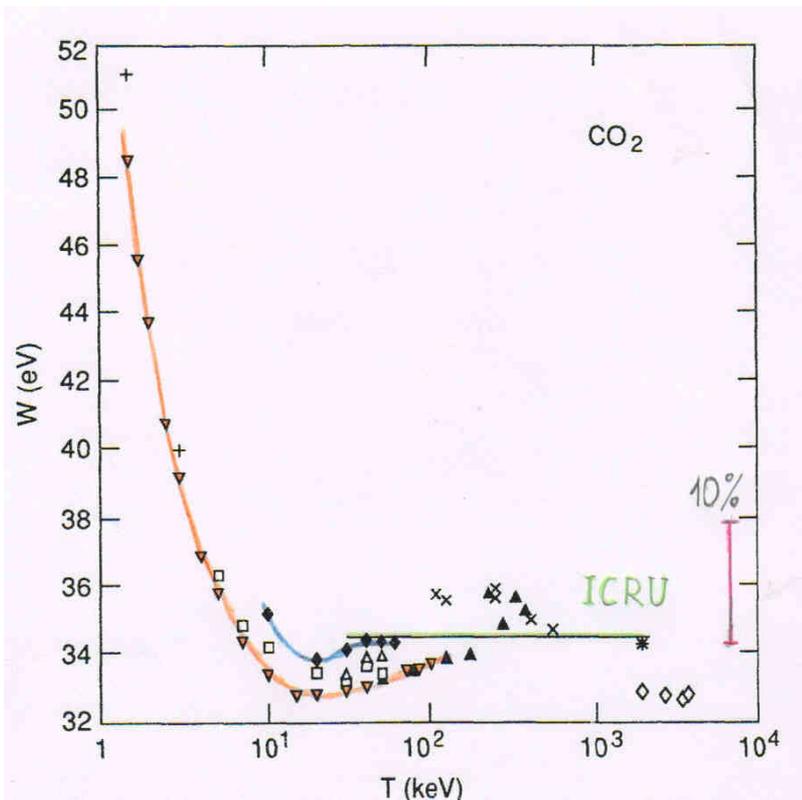
$$W_p = 1.02 W_\alpha$$

Результаты измерений W для протонов в водороде



- Рост W в интервале (1 – 5) МэВ составляет 5%, максимальный рост – 17.5%.
- Точность измерений немецкой работы – 1%, данной работы – 2%.
- Известно ли подобное поведение W в других газах?
- Существует ли теоретическое объяснение эффекта?

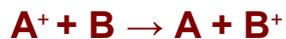
Энергетическая зависимость W для протонов



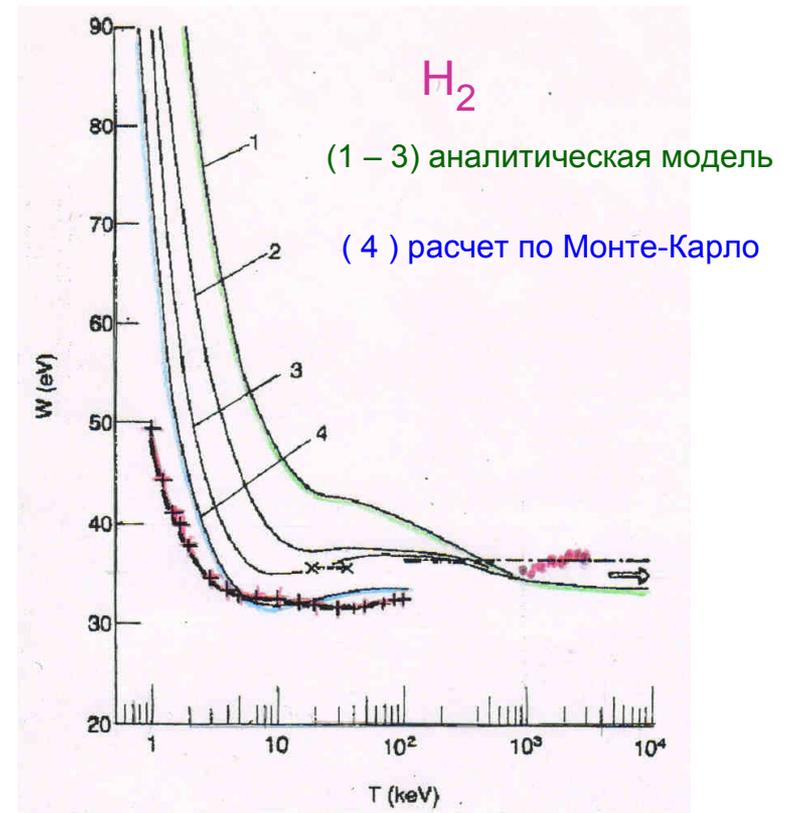
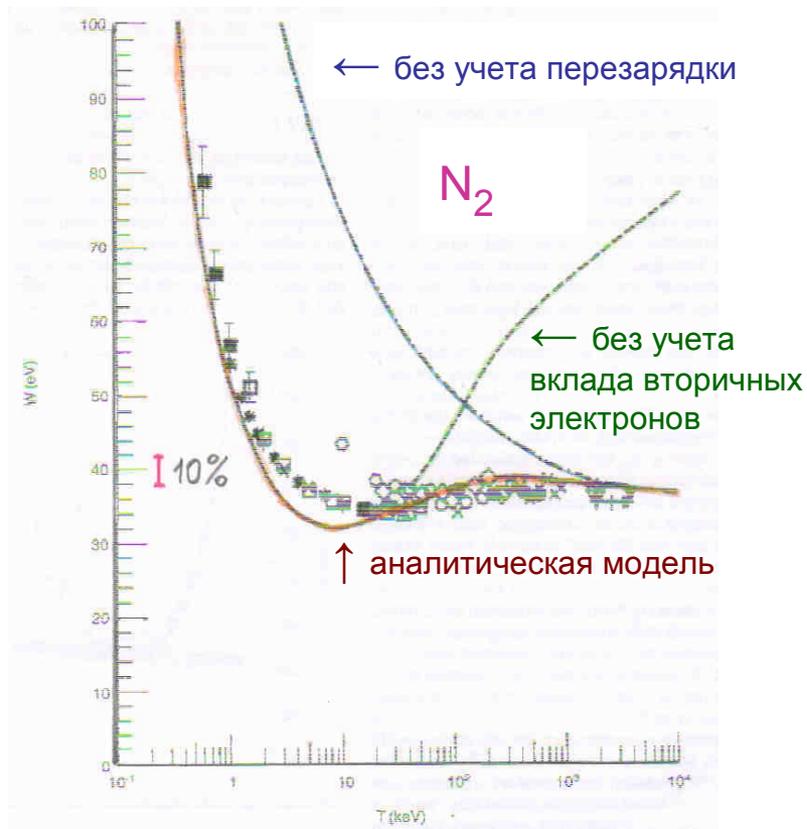
Экспериментально положение минимума W для протонов в области 20-50 кэВ обнаружено

в CO_2 , N_2 и в воздухе. TE gas: 64.4% CH_4 + 32.4% CO_2 + 3.2% N_2 .

Объяснение минимума – вклад электронов от зарядово-обменных процессов.



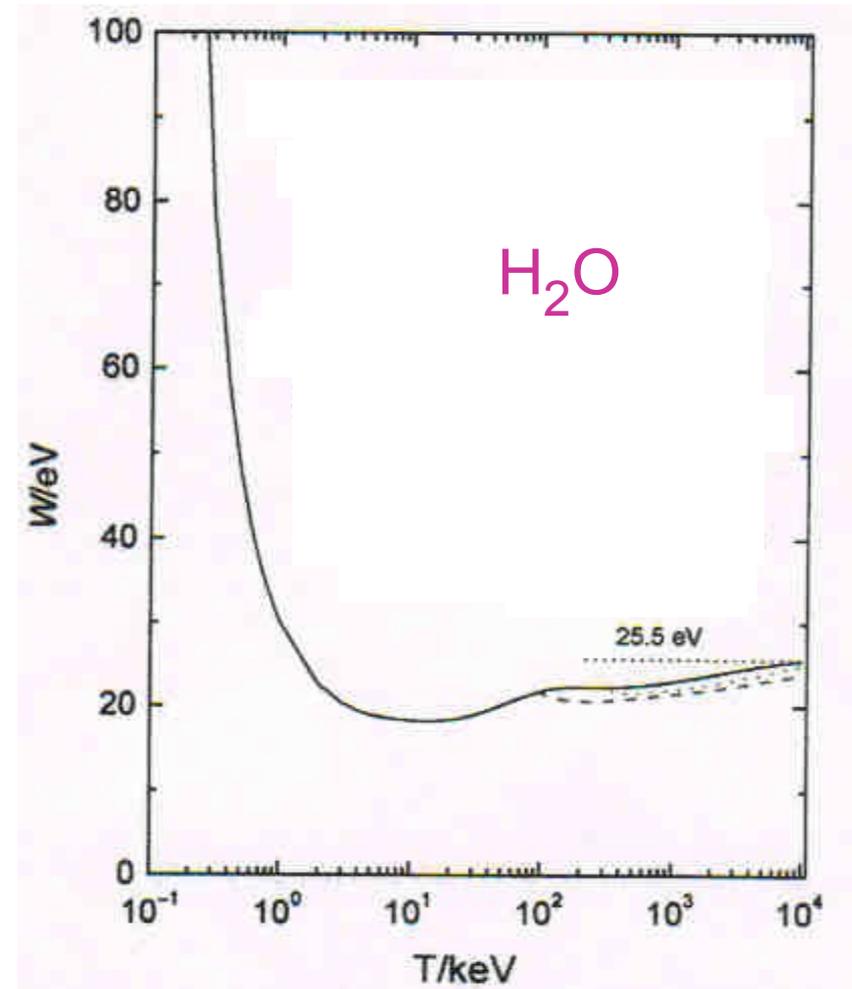
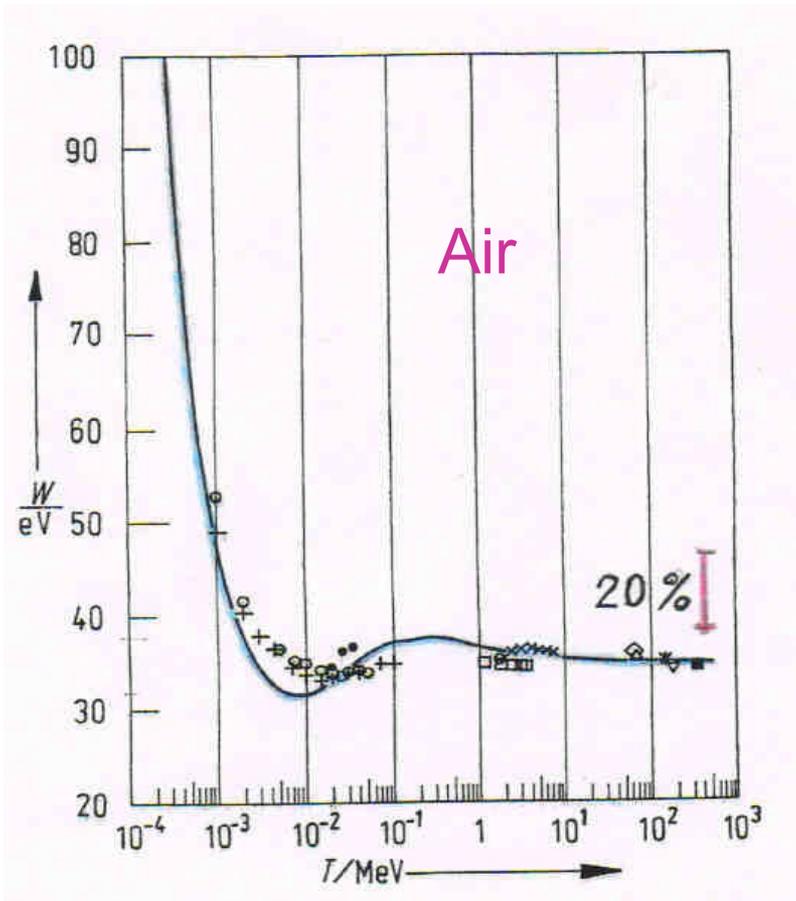
Расчет величины W для протонов в азоте и водороде



Аналитическая модель [B.Grosswendt and W.Baek \(1998\)](#). Для расчета задаются тормозная способность, сечение ионизации (включая перезарядку), вклад вторичных электронов. Не учтен вклад вторичных тяжелых частиц и возбужденных молекул.

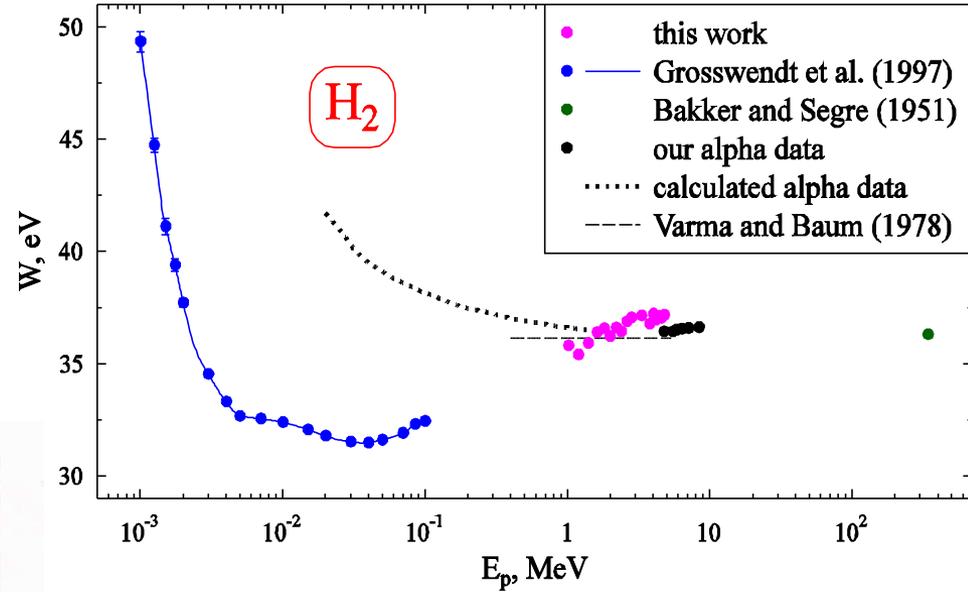
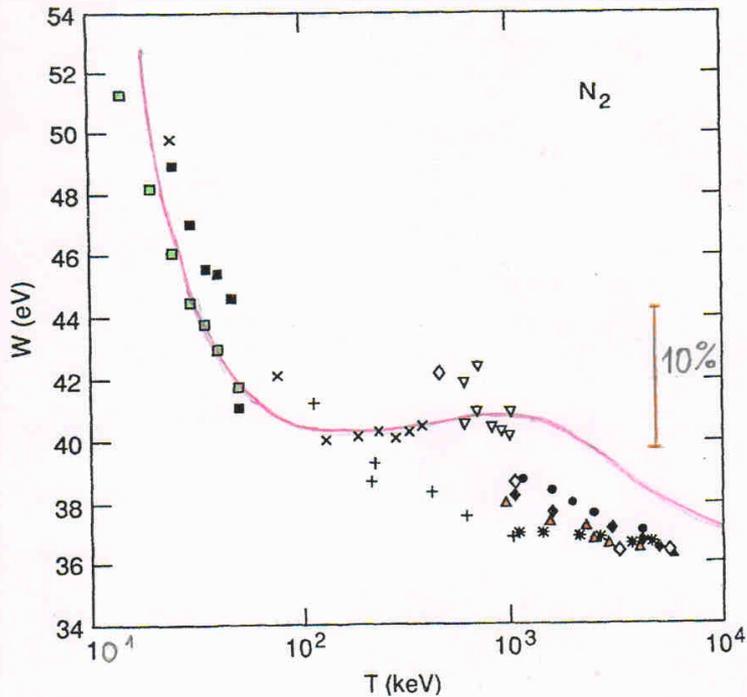
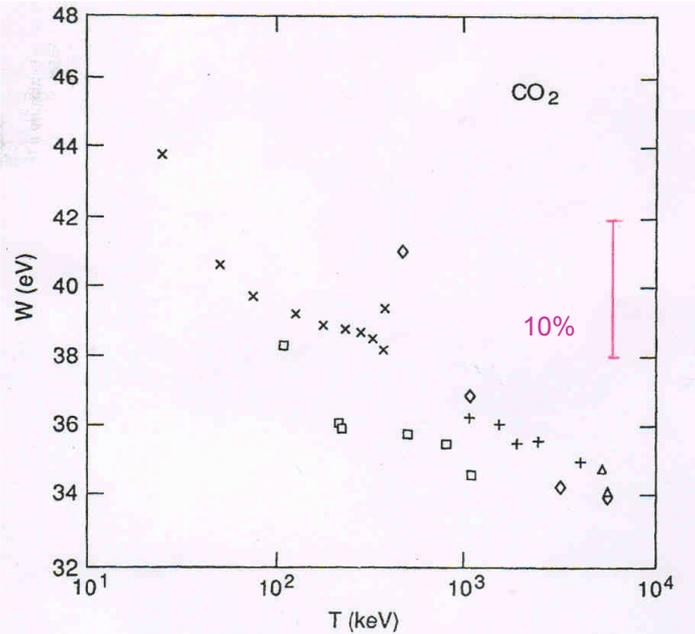


Величина W для протонов в воздухе и воде



Расчет B.Grosswendt and W.Baek (2007) →
Величина W для паров воды на ~ 4 эВ больше

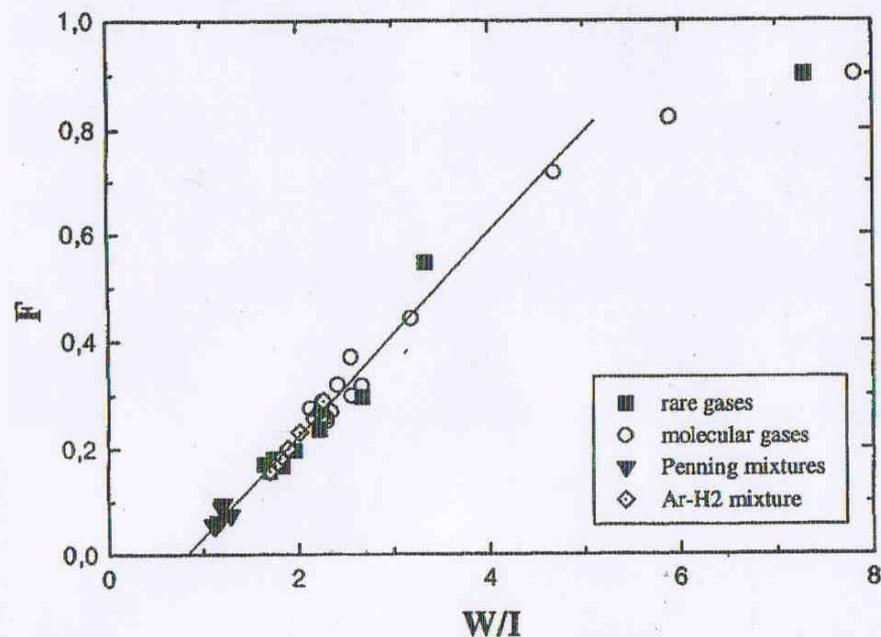
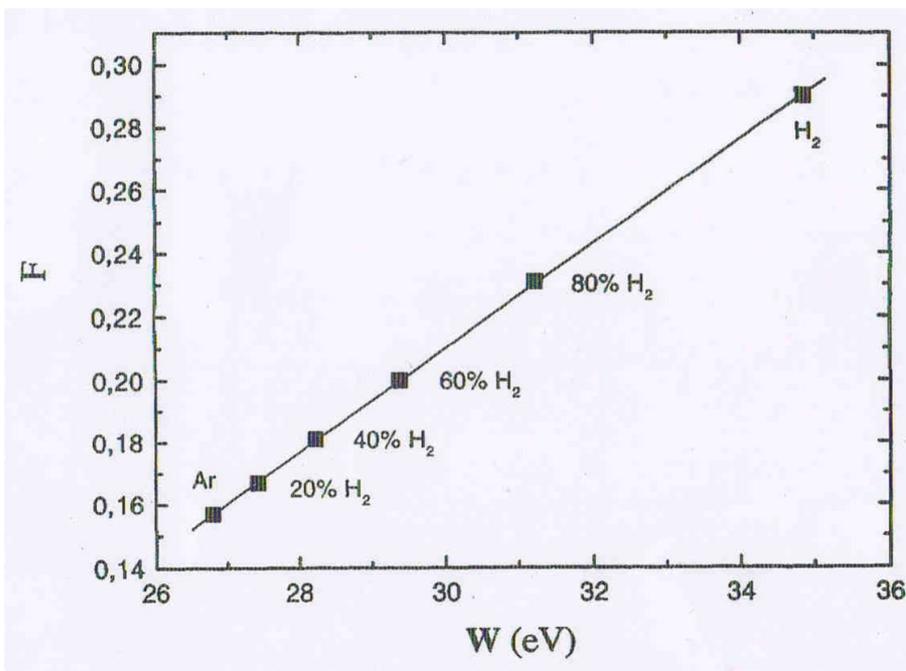
W для α -частиц в газах



---- $W = 36.12$ эВ в интервале $0.4 \div 5.37$ МэВ
M.Varma and J.Baum (1978)

← Расчеты W.Баек and B.Grosswendt (1995) для
Ar и N₂. Плоский минимум в районе 300 кэВ

Фактор Фано F и величина W



Дисперсия $\sigma_N^2 = FN$, где F – фактор Фано. $\sigma_E^2 = FNW^2 = FEW$.

Соотношение I.Врониč (1992): $F = a (W / I) + b$,

где I – потенциал ионизации, $a = 0.188$, $b = -0.15$

Для смеси газов (Penning mixtures) уменьшение W – эффект W.Jesse, уменьшение F – объяснение впервые дано в работе

А.А.Воробьёв, А.П.Комар, В.А.Королёв, ДАН 137,54 (1961), затем G.D.Alkhozov, А.Р.Комар, А.А.Vorobyov, Nucl.Instr.Meth.48,1 (1967)

Результаты работы

- 1) Измерена энергетическая зависимость величины W для протонов в водороде, которая хорошо согласуется с имеющимися данными при низких энергиях. Получен аномальный рост W в диапазоне $1 \div 3$ МэВ. Существующая теория плохо описывает полученные экспериментальные данные.
- 2) С высокой точностью измерена энергетическая зависимость величины W для альфа-частиц в смеси аргона с метаном. Результаты согласуются с данными работ других авторов. Проведенные измерения для смесей гелия и водорода соответствуют общей тенденции уменьшения W с ростом энергии. Однако, в водороде величина W слабо возрастает в диапазоне от 4.8 до 8.4 МэВ.
- 3) Полученные экспериментальные данные для водорода могут способствовать дальнейшему развитию теории.