

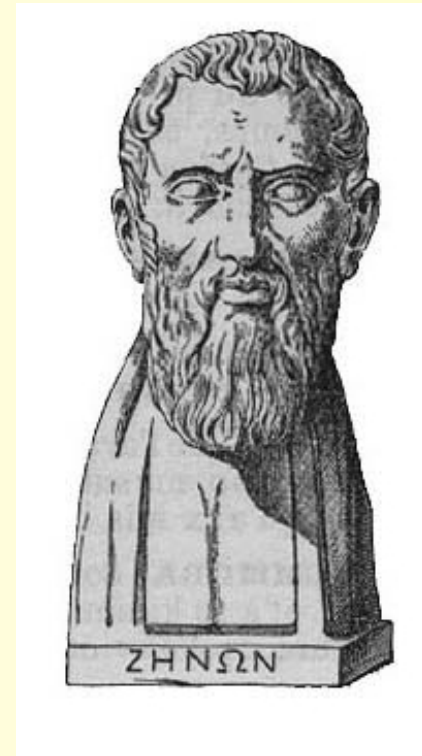
*Квантовый парадокс  
Зенона  
и его проявления  
в спиновой химии*

# Апории Зенона

- Зенон из Элеи 490-430г. до РХ
- Одна из апорий Зенона

## парадокс Летящей стрелы

- любой объект может быть только в одном месте в один момент времени
- он не может быть в двух разных местах в одно и то же время
- **НО** нахождение в 1 месте в 1 момент времени есть покой
- **Следовательно** стрела покоится
- **Следовательно** движение невозможно



*Движенья нет, сказал мудрец брадатый.  
Другой смолчал и стал пред ним ходить.  
Сильнее бы не мог он возразить;  
Хвалили все ответ замысловатый.  
Но, господа, забавный случай сей  
Другой пример на память мне приводит:  
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,  
Однако ж прав упрямый Галилей.*

***А.С. Пушкин***

# Что такое квантовый парадокс (эффект) Зенона ?

## Википедия:

Квантовый эффект Зенона (Квантовый парадокс Зенона) — метрологический парадокс квантовой механики, заключающийся в том, что время распада метастабильного квантового состояния некоторой системы с дискретным энергетическим спектром прямо зависит от частоты событий измерения её состояния. В предельном случае, нестабильная частица в условиях частого наблюдения за ней никогда не может распасться.

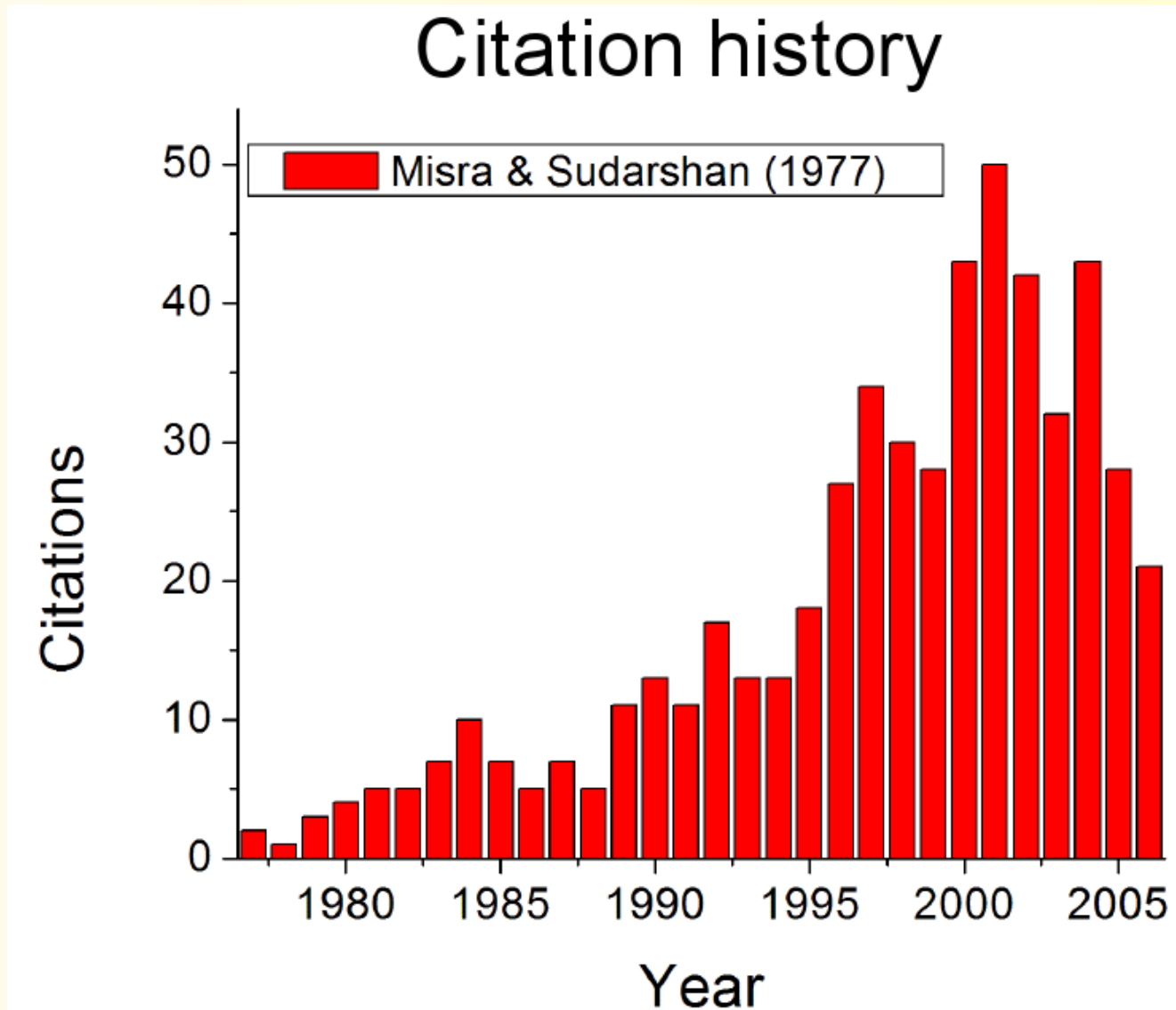
Впервые предсказан в 1958 году советским физиком Леонидом Халфиным, в 1978 году американские физики Байдьянат Мизра и Джордж Сударшан описали эффект, назвав его именем древнегреческого мыслителя Зенона Элейского.

Квантовый эффект Зенона для вероятности переходов между атомными уровнями был экспериментально обнаружен американскими учёными в конце 1989 года.

Название эффекта восходит к апории греческого философа Зенона о полёте стрелы.

# Misra & Sudarshan Paper

The Zeno's paradox in quantum theory, *B.Misra and E.C.G. Sudarshan*, *J. Math. Phys.* **18**, 756 (1977)



# Квантовая эволюция динамической системы при многократных измерениях

Пусть при  $t = 0 : |\phi\rangle$

тогда  $t : e^{-i\hat{H}t}|\phi\rangle$

Вероятность остаться в прежнем состоянии  $|\langle\phi|e^{-i\hat{H}t}|\phi\rangle|^2$

На коротких временах:  $e^{-i\hat{H}t} \approx 1 - i\hat{H}t - \frac{1}{2}\hat{H}^2t^2$

следовательно:  $|\langle\phi|e^{-i\hat{H}t}|\phi\rangle|^2 \approx [1 - (\Delta H)^2t^2],$

где  $(\Delta H)^2 \equiv \langle\phi|\hat{H}^2|\phi\rangle - \langle\phi|\hat{H}|\phi\rangle^2$

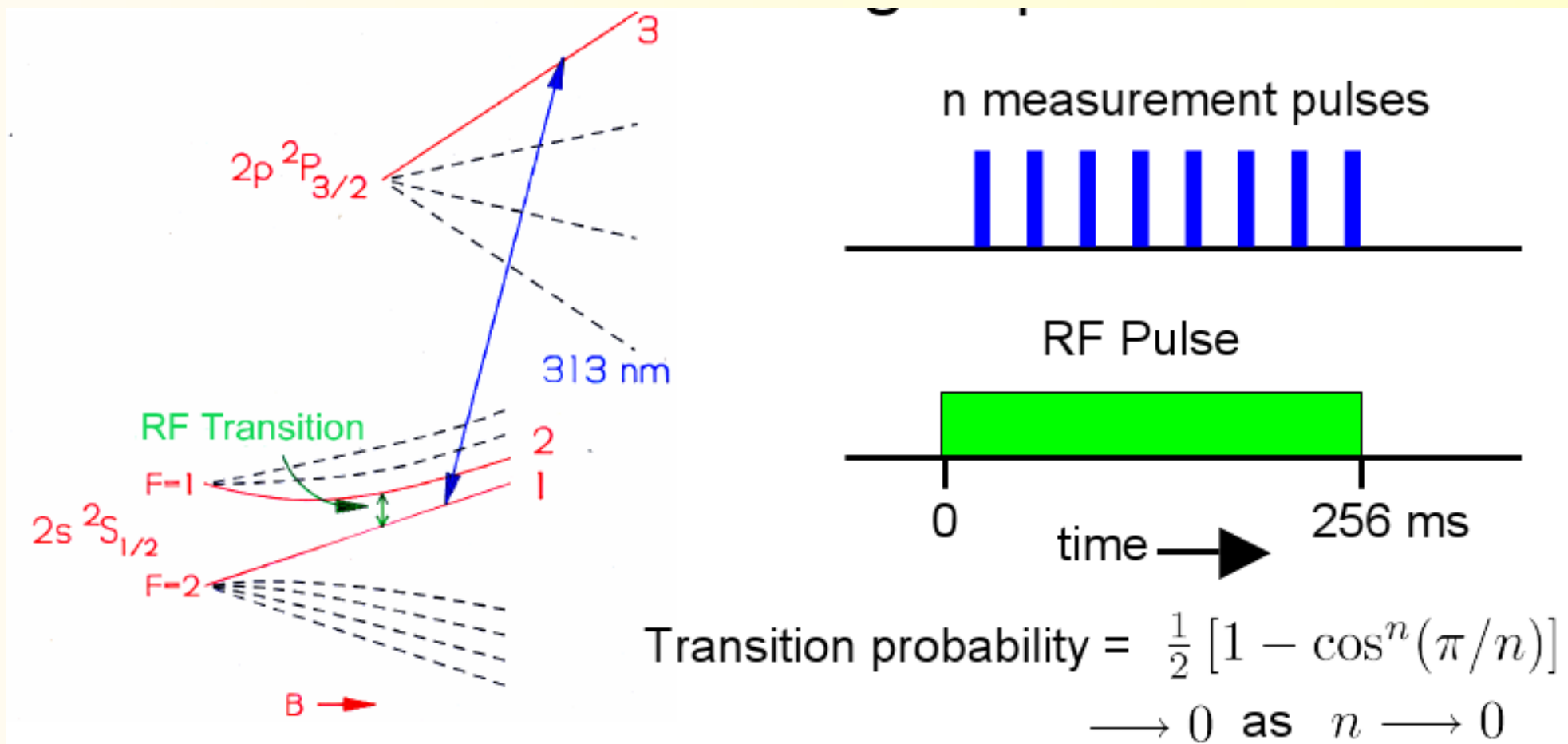
Если измерения проводятся в моменты времени  $t = \frac{1}{n}T, \frac{2}{n}T, \dots, \frac{n-1}{n}T, T$

то вероятность всё время находиться в исходном состоянии стремится к 1:

$$P_{surv} = [1 - (\Delta H)^2(\frac{T}{n})^2]^n \approx \exp\left(-\frac{(\Delta H)^2T^2}{n}\right) \rightarrow 1 \quad \text{при } n \rightarrow \infty$$

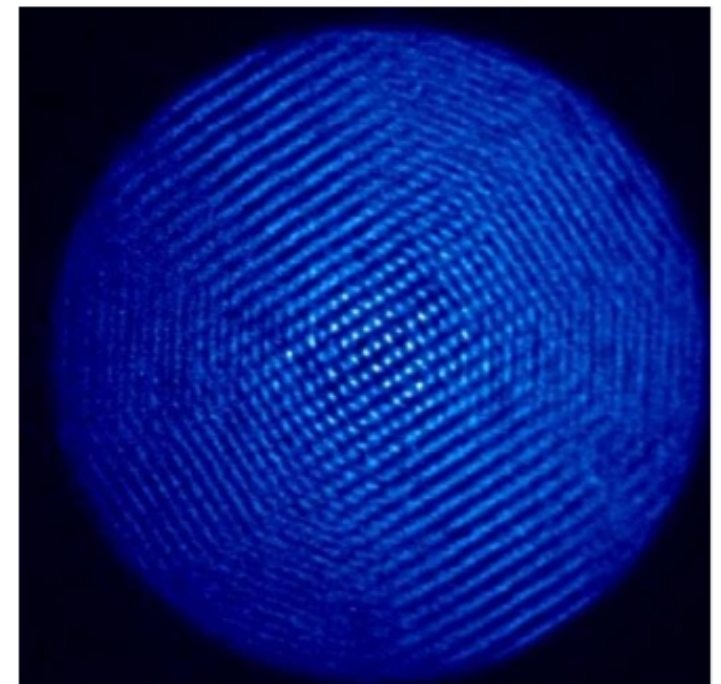
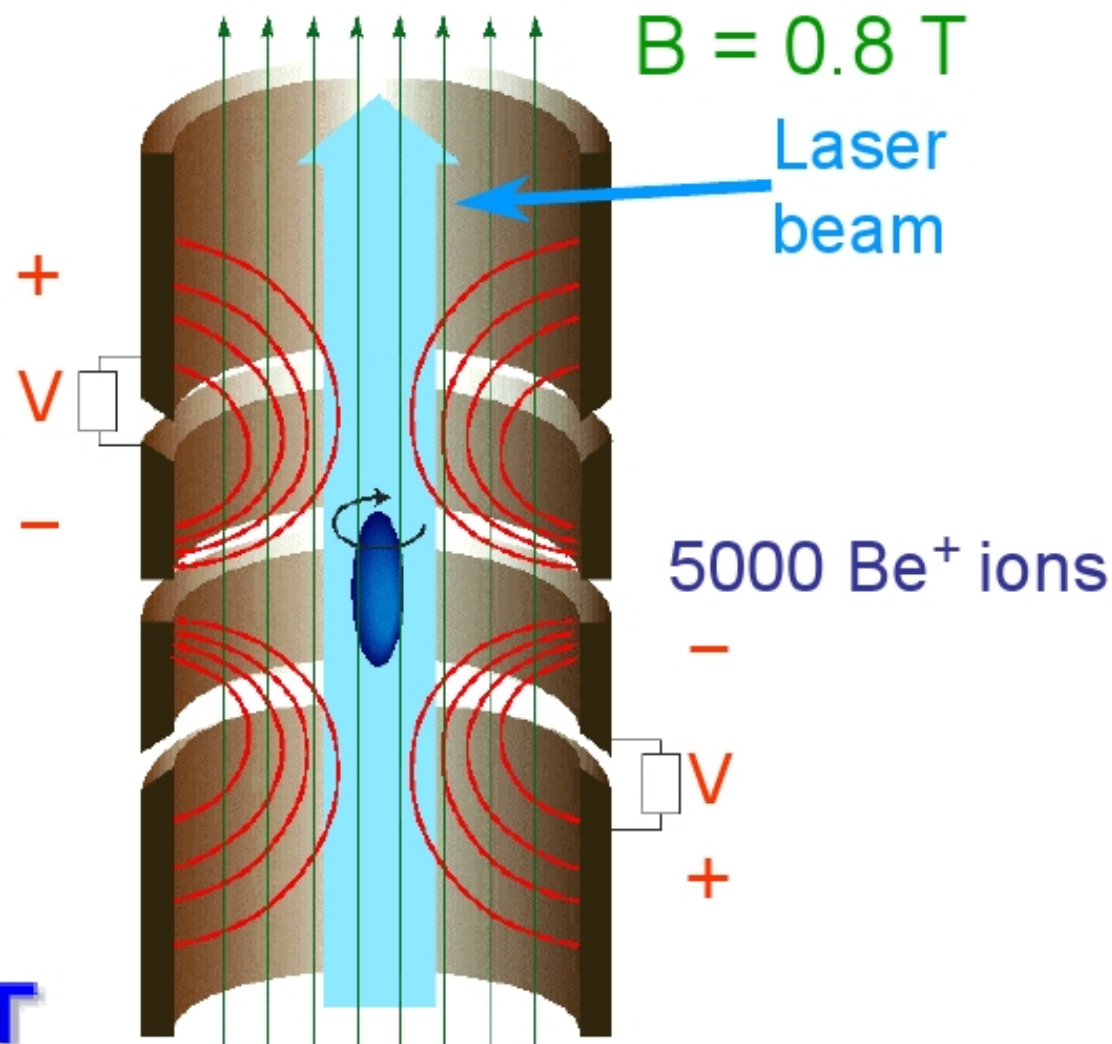
# Первое экспериментальное наблюдение эффекта Зенона

Quantum Zeno effect. *W.M. Itano, D.J. Heinzen, J.J. Bollinger, and D.J. Wineland*, Phys. Rev. **41**, 2295 (1990)



# Penning Trap

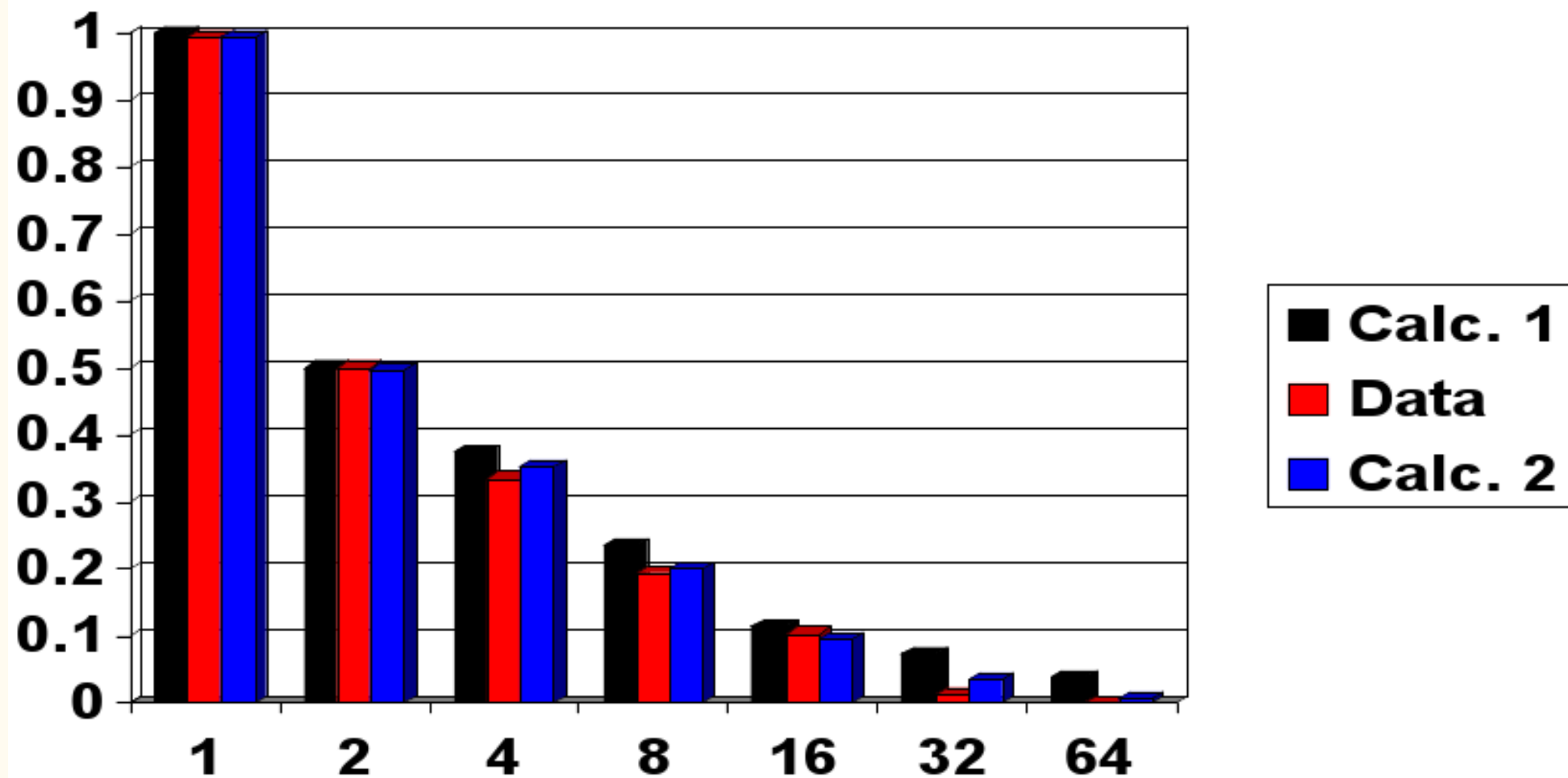
- 5000  $\text{Be}^+$  ions confined by electric & magnetic fields



Crystallized  $\text{Be}^+$  ions



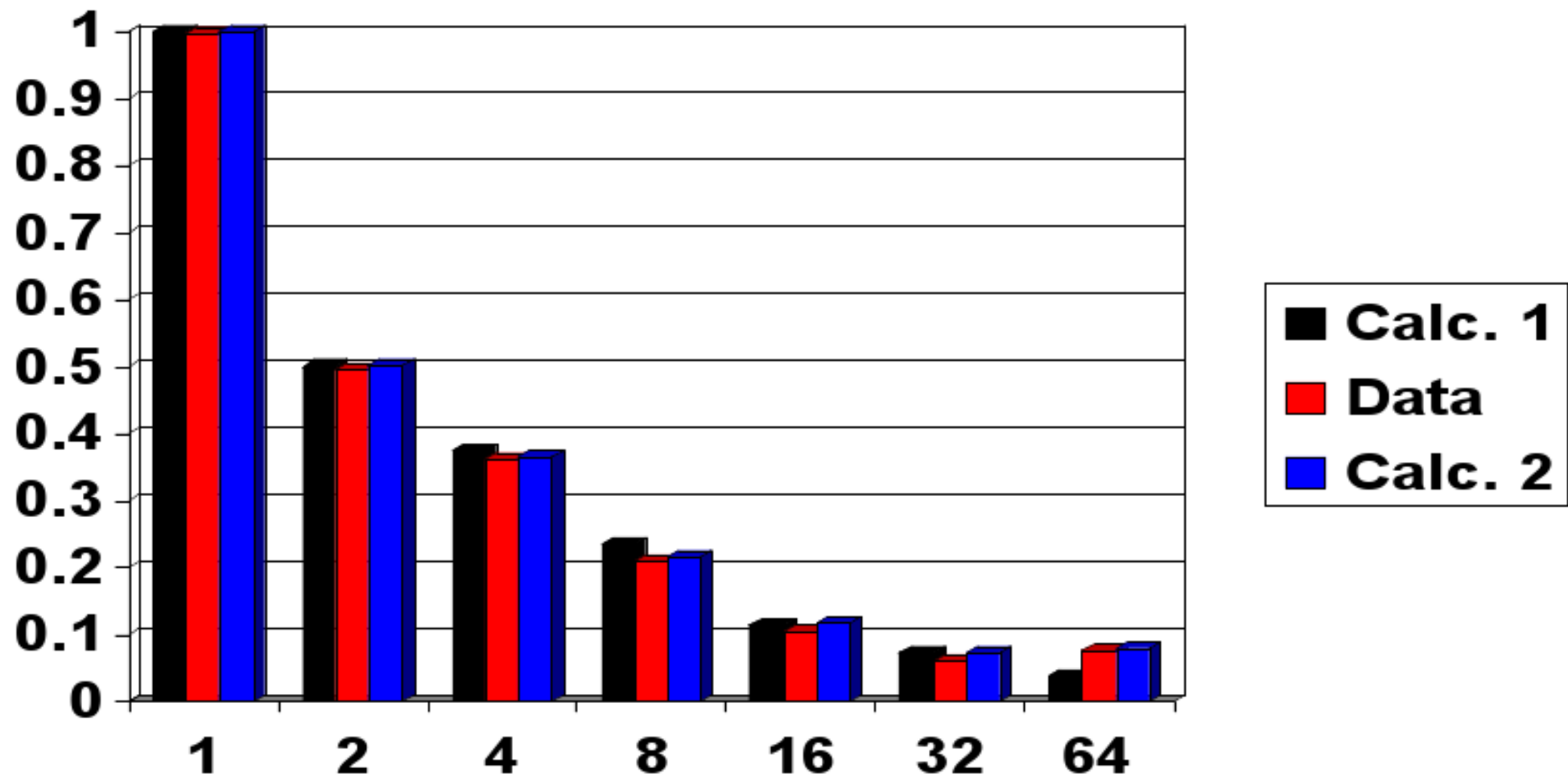
# Data: 1 to 2 Transition



Calc. 1:  $\frac{1}{2} [1 - \cos^n(\pi/n)]$

Calc. 2: Includes finite pulse time, optical pumping

# Data: 2 to 1 Transition



Calc. 1:  $\frac{1}{2} [1 - \cos^n(\pi/n)]$

Calc. 2: Includes finite pulse time, optical pumping

# Remarks on the Experiment

- 2 afternoons of collecting data
- Several days of preparation, mostly writing software to control experiment
- A few weeks analyzing the data
- Over 10 years of prior work by several people on laser-cooled trapped ions for atomic clocks

# Химический эффект Зенона и его появления.

В.Л. Бердинский, И.Н. Якунин. ДАН 421, 1 (2008)

Эволюция радикальной пары:

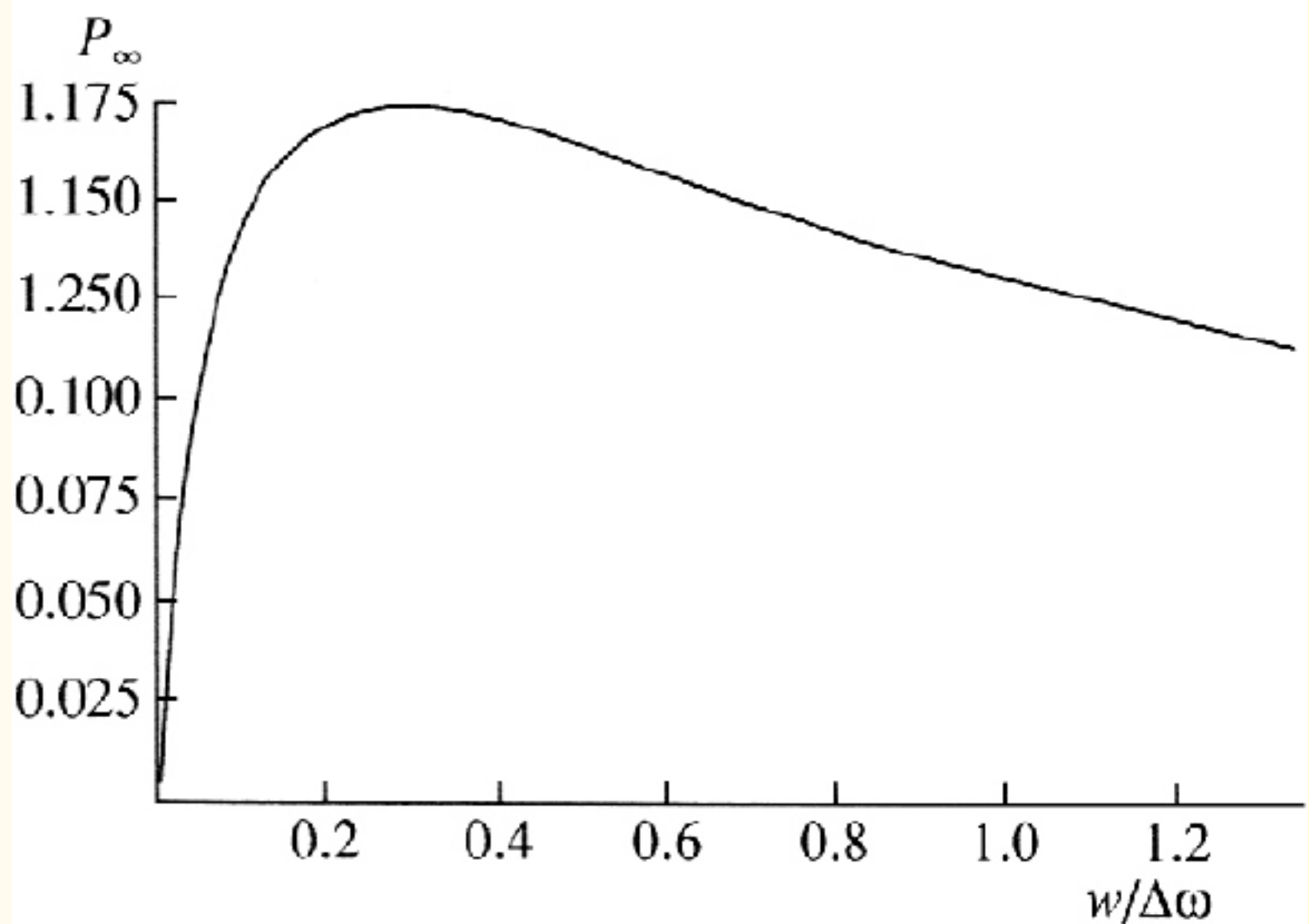
$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] - \frac{w}{2}\{P_S\rho + \rho P_S\} - k\rho, \text{ где } P_S = |S\rangle\langle S|, ,$$

$$H = g_1\beta H S_z^1 + g_2\beta H S_z^2, \quad \rho(0) = \frac{1}{3}\{|T_0\rangle\langle T_0| + |T_+\rangle\langle T_+| + |T_-\rangle\langle T_-\rangle\}$$

$$P_\infty = w \int_0^\infty \rho_{SS}(t) dt$$

$$P_\infty = \frac{1}{6} \frac{w\Delta\omega^2}{(k^2 + kw + \Delta\omega^2)(k + w/2)}$$

$$w_{max} = \sqrt{2(k^2 + \Delta\omega^2)}$$



**Рис. 3.** Зависимость выхода продуктов рекомбинации  $P_\infty$  от константы скорости  $w$  спин-селективной геминальной рекомбинации радикальных пар.

**Time evolution of the spin state of the radical ion pair in the microwave field: an analytical solution.** *S.V. Anishchik, V.N. Verkhovlyuk and V.A. Bagryansky, J. Phys. B, 39 2231 (2006)*

$$|S\rangle = |\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle),$$

$$|T_x\rangle = |\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle),$$

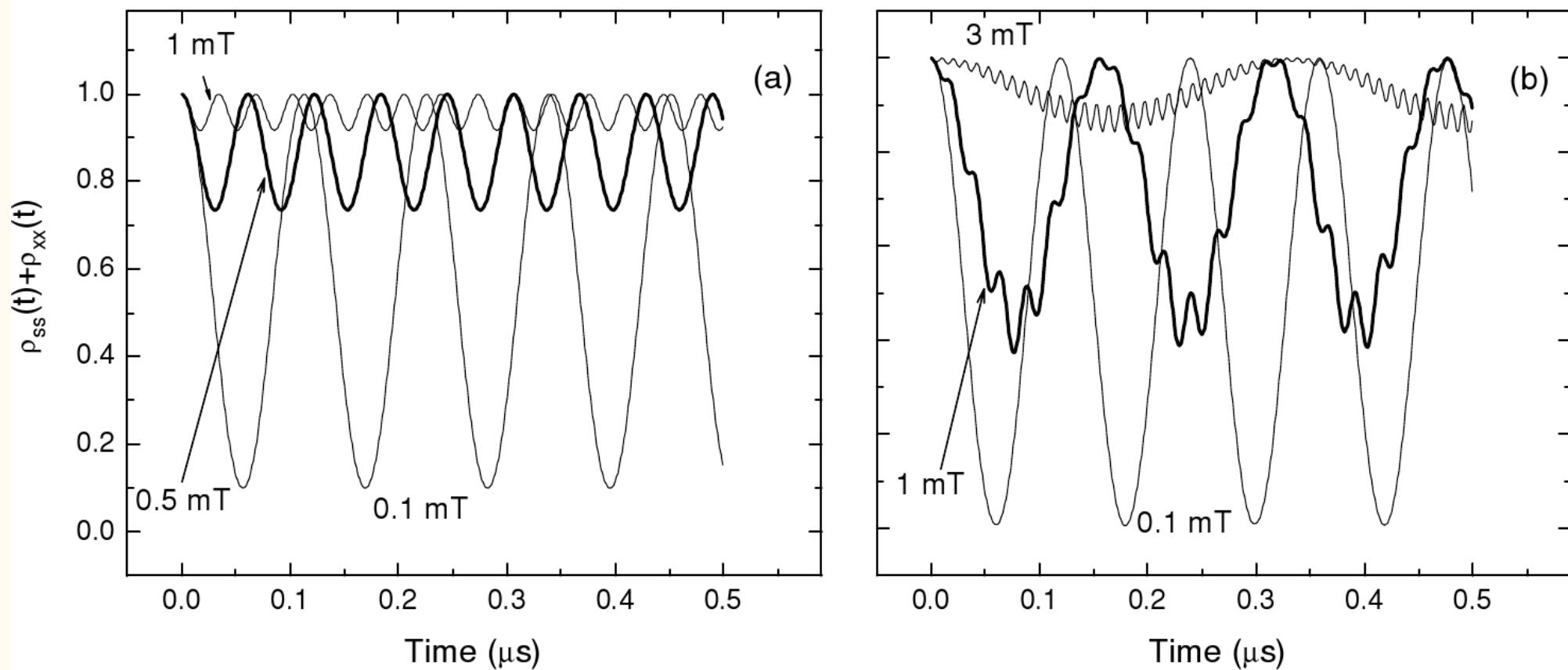
$$|T_y\rangle = |\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle),$$

$$|T_z\rangle = |\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle),$$

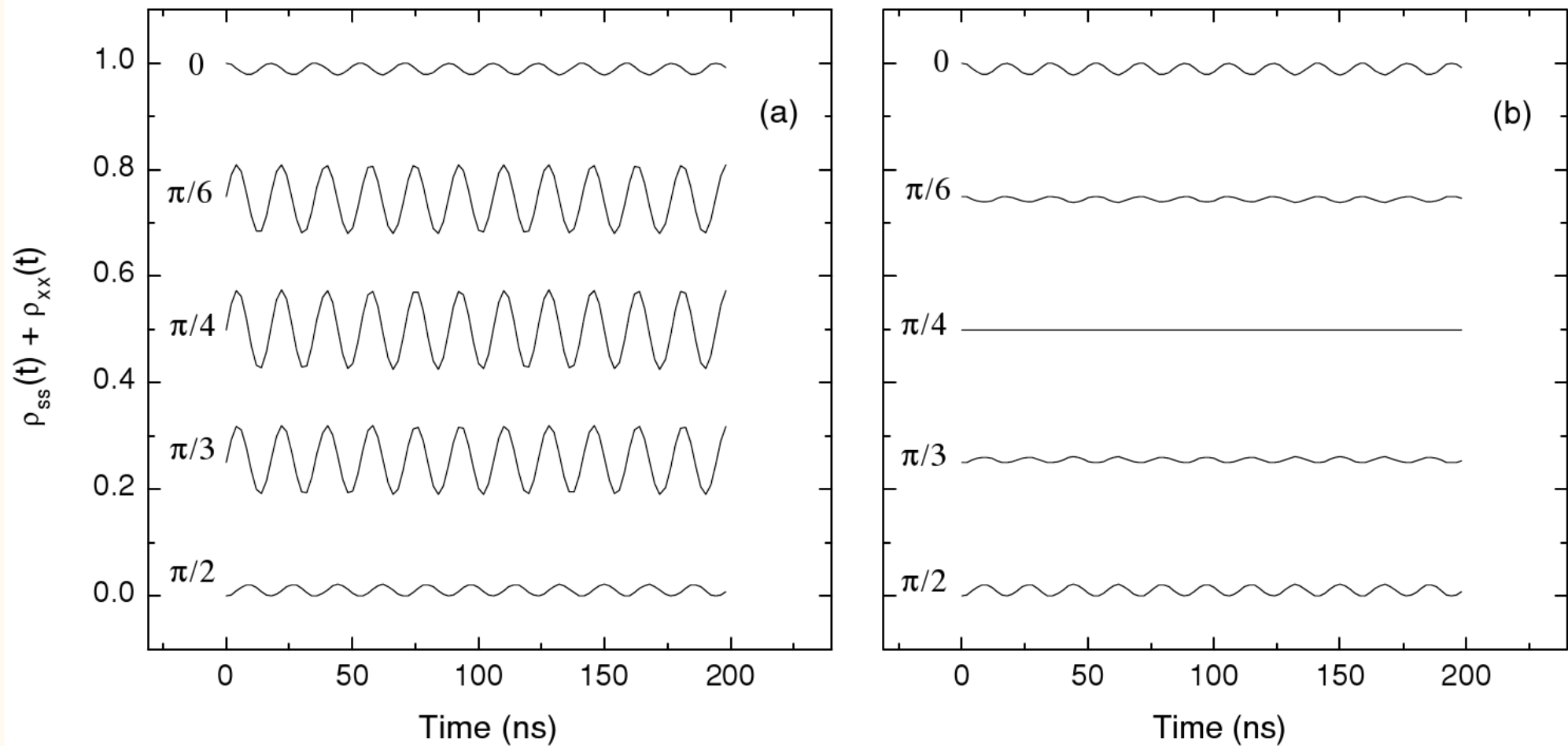
$$|T_z\rangle = |T_0\rangle,$$

$$|T_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|T_+\rangle - |T_-\rangle),$$

$$|T_y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|T_+\rangle + |T_-\rangle)$$



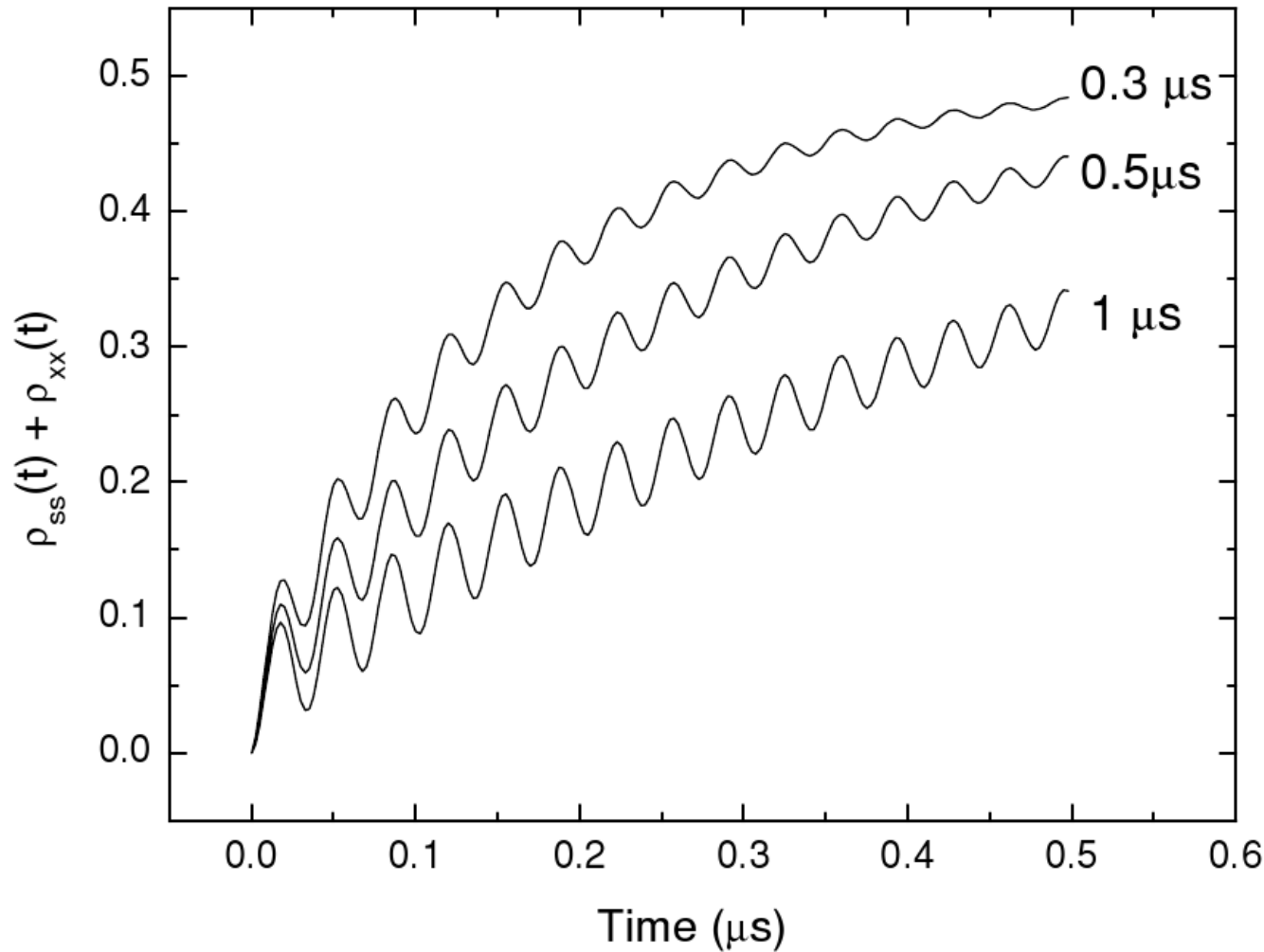
**Figure 4.** Time dependence of the sum of populations of the singlet  $|S\rangle$  and triplet  $|T_x\rangle$  states for different amplitudes of the microwave field. The magnitude of  $B_1$  is indicated next to its corresponding curve.  $\Delta B_A = 0$ ,  $\Delta B_D = 0.3$  mT (a);  $\Delta B_A = 1$  mT,  $\Delta B_D = 1.3$  mT (b).



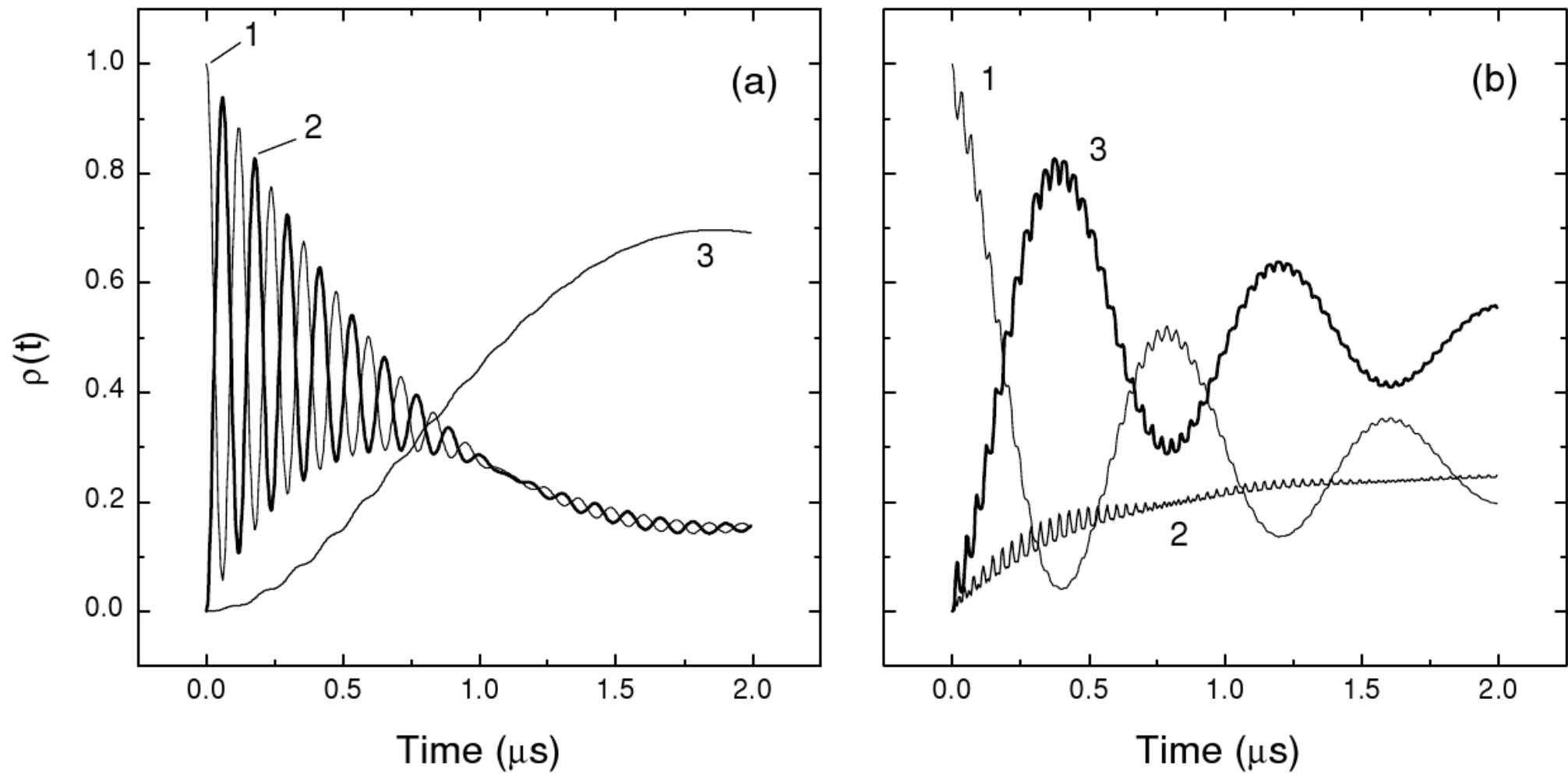
**Figure 5.** Time dependence of the sum of populations of the singlet  $|S\rangle$  and the triplet  $|T_x\rangle$  states for different initial conditions given by equation (18). The values of  $\theta$  are indicated next to their corresponding curves.  $\phi = \pi/2$  (a) and  $0$  (b).  $\Delta B_A = 0$ ,  $\Delta B_D = 0.3$  mT.  $B_1 = 2$  mT.

$$|\Psi\rangle(0) = \cos \theta |S\rangle + \sin \theta e^{i\phi} |T_z\rangle$$





**Figure 6.** Time dependence of the sum of populations of the singlet  $|S\rangle$  and the triplet  $|T_x\rangle$  states. Initial state is  $|T_z\rangle$ .  $B_1 = 1$  mT,  $T_1^A = T_1^D = 10 \mu\text{s}$ ,  $\Delta B_A = 0$ ,  $\Delta B_D = 0.3$  mT,  $T_2^A = T_2^D = T_2$ . Numerical values of  $T_2$  are indicated next to the corresponding curves.



**Figure 7.** Time dependence of the populations of the singlet state  $|S\rangle$  (1), triplet state  $|T_z\rangle$  (2) and the sum of populations of the triplet states  $|T_x\rangle$  and  $|T_y\rangle$  (3) for  $T_1^A = T_1^D = 1 \text{ s}$ ,  $T_2^A = T_2^D = 1 \mu\text{s}$ .  $\Delta B_A = 0$ ,  $\Delta B_D = 0.3 \text{ mT}$ .  $B_1 = 10 \mu\text{T}$  (a) and  $1 \text{ mT}$  (b).

Во вращающейся системе координат:

