

射频阱中异荷离子云耦合运动的 实验分析*

高克林 颜 旻 罗学立 朱熙文

黄贵龙 李交美 施 磊

(中国科学院武汉物理研究所波谱与原子分子

物理国家重点实验室, 武汉 430071)

(1994年1月13日收到)

在射频阱中, 观察到两个相隔很近的射频共振吸收峰. 适当改变囚禁电压、检测频率等条件时, 两峰相对移动或演变为单峰, 其特征可由两异荷离子云的耦合运动加以描述.

PACC: 2925; 3580

1 引 言

研究离子阱中同时囚禁的几种离子的相互作用越来越受到重视, 因为这将有助于研究两种离子的感应冷却^[1]、两类冷却离子的有序结构^[2], 同时也有助于研究离子间的碰撞、复合过程^[3], 以及由此引起的集体运动和非线性效应, 并为在离子阱中研究某些特殊体系, 如负离子以及中性等离子体的特征提供有益的启示.

Jungmann 等^[4]在实验上考察了两类不同质量比的同荷离子的射频吸收信号的移动和变化, 在不考虑离子数的情况下, 此现象由两类离子云耦合模型予以解释. 我们在以往的工作中^[5], 阐明了同时囚禁 Ba^+ 和 BaO^+ 离子时, 离子的射频吸收信号随离子数相对数目变化时的移动, 给出了包含离子数效应的两类离子云的耦合运动模型. Kajia 等^[6]观察到同时囚禁 N_2^+ 和 O_2^+ 时引起的射频信号的展宽和迟滞. Schermann 等^[3]利用射频阱中同时囚禁的 Tl^+ 和 I^- 离子, 研究了离子间的复合率, 观察到在不改变囚禁场时, Tl^+ 和 I^- 离子数的增加.

本文报道在不同实验条件下, 射频阱中同时囚禁两种离子所观察到的双峰吸收信号的移动和交叉. 在确认阱中两种离子分别为正、负离子后, 用两离子云的耦合运动模型对上述实验现象进行了合理的解释, 与两同荷离子云情形对比, 讨论了异荷离子云吸收信号变化的异同, 以及利用信号移动和变化等实验数据确定离子参数的可能性.

* 国家自然科学基金和中国科学院重点基金项目基金资助的课题.

2 实验测量

我们的射频阱^[9]由内表面为旋转双曲面的环和上、下帽组成,阱尺度满足 $r_0 = \sqrt{2} z_0$, $z_0 = 2$ cm, 其中 r_0 为阱的半径, z_0 为两帽间距离的一半. 环上开有直径为 6 mm 的两个小孔, 分别为电子束和原子束的入射孔. 本底真空为 10^{-7} Pa 数量级. 离子由电子流轰击残余气体产生, 囚禁射频源的频率 $\Omega/2\pi$ 为 500 kHz, 直流电压 U 为 8—12 V, 射频电压 V 为 140—175 V. 离子信号由射频共振吸收法进行测量^[7]. 在两帽极间加上一检测场, 当扫描直流电压为某一确定值时, 离子的宏运动轴向频率^[8]与检测射频源频率 $\omega_d/2\pi$ 相等, 离子从检测射频源吸收能量, 在并联谐振回路上产生一共振吸收信号, 此信号经锁相放大器同步检波和放大, 并用计算机进行电子流轰击时间、扫描延时和信号采集的控制.

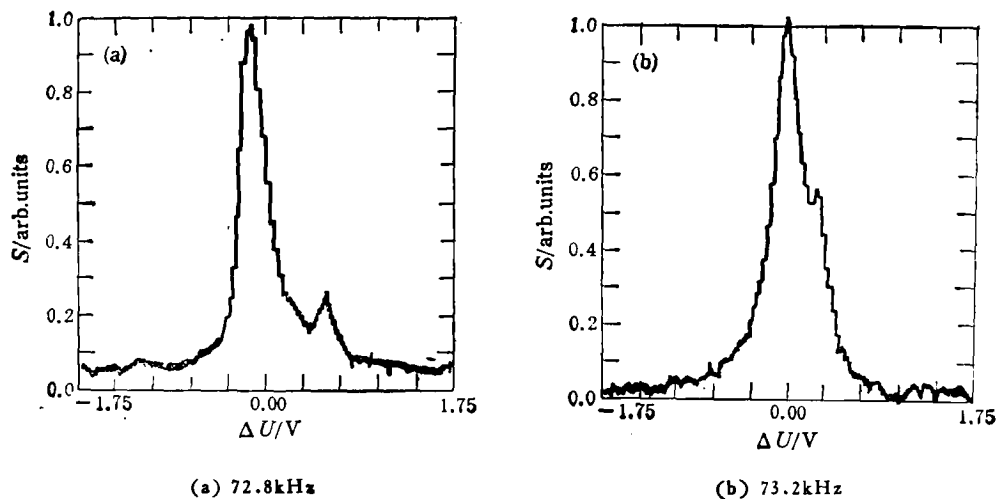
在实验中观察 N_2^+ 离子信号时, 通过适当调节实验参数出现了双峰. 在检测频率不变时, 改变囚禁射频电压, 或在固定的囚禁射频电压下改变检测频率, 得到了离子双峰的变化情况. 改变电子流的工作参数或扫描延时, 考察了离子数对双峰变化的影响.

3 结果与分析

图 1 给出了固定射频电压 V 时, 改变检测场频率 $\omega_d/2\pi$ 时得到的双峰变化曲线. 由图 1 可见, 当 $\omega_d/2\pi$ 增加时, 开始两个共振吸收峰靠近, 接着仅出现一个共振吸收峰, 最后重新出现两个峰并逐渐远离. 同时可知, 其中一个共振吸收峰信号(大峰)的 U 值随着 $\omega_d/2\pi$ 的增加而减小, 而另一共振峰信号(小峰)变化趋势则相反. 其结果如图 2 所示.

对无耦合的离子在射频阱中的运动, 可用 Mathieu 方程描述, 在赝势近似下^[8], 质荷比为 m_i/e_i 的 i 种 ($i = 1, 2$) 离子的轴向宏运动频率:

$$\omega_{i0z}^2 = \frac{\Omega^2}{4} \left(-\frac{8e_i U}{m_i r_0^2 \Omega^2} + \frac{8e_i^2 V^2}{m_i^2 r_0^4 \Omega^4} \right). \quad (1)$$



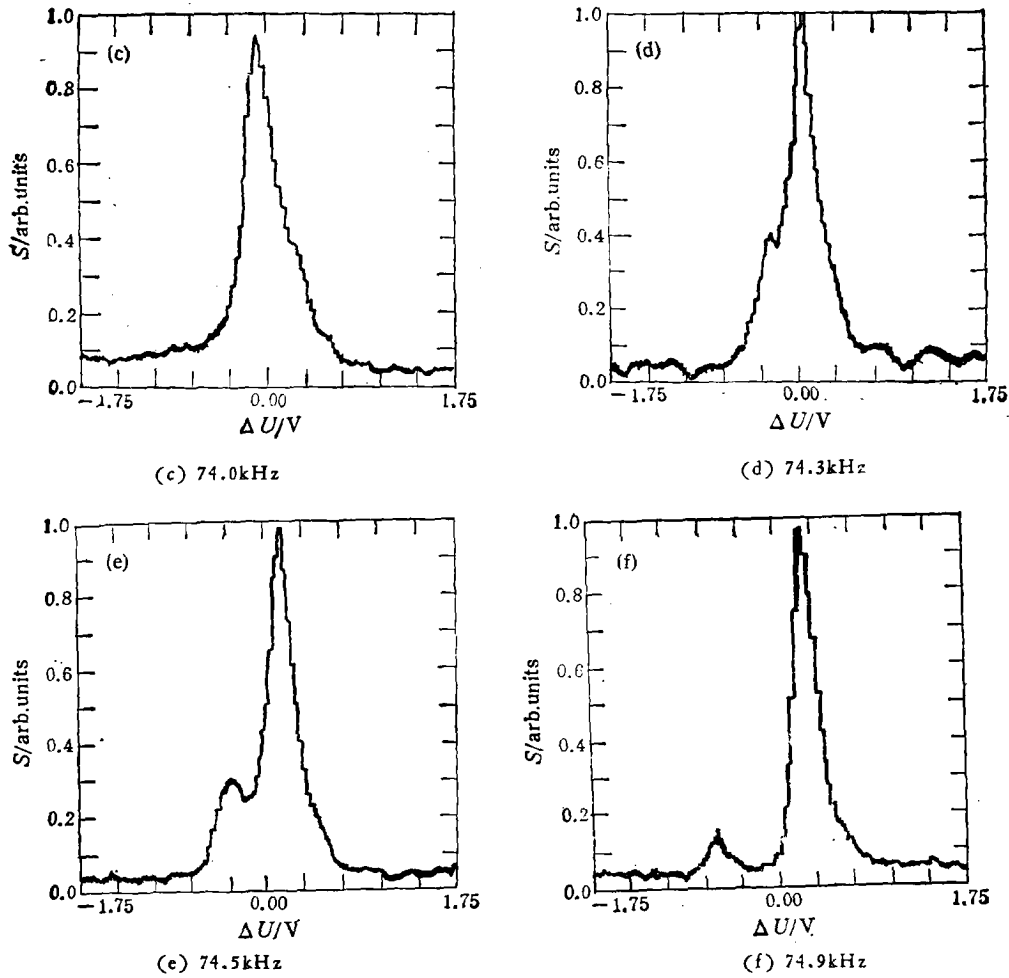


图1 随检测场频率变化时,双峰变化的实验曲线 ($V = 156.43\text{V}$)

从(1)式可知,对固定的 V , 增加 $\omega_d/2\pi$ 即增加 ω_{i0z}^2 时正离子的 U 减小;而负离子的 U 则增加。分析稳定区图也得出,正、负离子的等 β_i ($\beta_i = 2\omega_{i0z}/Q$) 后可以相交。因此,图1表示的大、小峰信号在 (U, V) 图上交叉的事实表明:在阱中同时囚禁了正、负离子,其中大峰代表正离子,而小峰是负离子的共振吸收峰。

在射频阱中同时囚禁两种离子的运动,可用离子云耦合模型^[4,5]描述。离子在阱中受到囚禁力、离子间的库仑力以及微弱探测场的共同作用,在赝势模型中囚禁场主要使离子以不同特征频率分别沿轴向和径向振动;离子云间的库仑相互作用由两离子云的分布和它们质心的距离决定,可看作对囚禁力的微扰;在两帽间的弱检测场使同类离子如同一个质量为 $N_i m_i$, 电荷为 $N_i e_i$ 的“巨离子”作强迫振动。在高温近似下,离子云设为高斯分布。因此,离子云沿轴向的运动方程可写为

$$N_i m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -N_i k_{iz} z_i + A(z_1 - z_2) + N_i e_i E \cos(\omega_d t),$$

$$N_2 m_2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -N_2 k_{2x} z_2 + A(z_2 - z_1) + N_2 e_2 E \cos(\omega_d t). \quad (2)$$

其中, N_1, N_2 分别为 1, 2 两种离子的总数; z_1, z_2 分别为两种离子云的质心坐标; $k_{1x},$

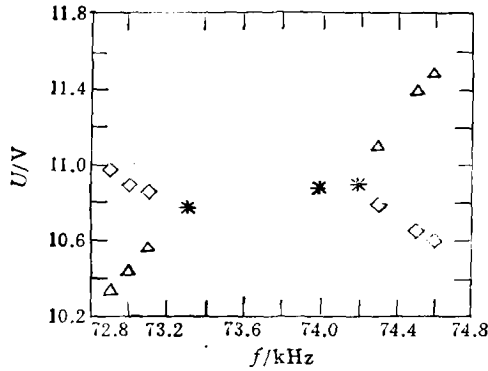


图2 随检测场频率变化时的双峰演变
($V = 156.43V$)
◇为大峰; △为小峰; *为单峰

$k_{2x} \left(\omega_{10x}^2 - \frac{k_{1x}}{m_1} \right)$ 为束缚的力常数; E 为

外加检测场幅度; A 为库仑力常数, 可以

计算出 $A = \left(\frac{2}{9\pi} \right)^{1/3} \rho^{-3} e^2 N_i N_j^{(4)}$. $\rho =$

$$\left[\frac{2k_B T}{m \omega_{0x}^2} \right]^{1/2}.$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数.

由(2)式得出, 在弱耦合条件

$$\left| A \left(\frac{1}{N_1 m_1} + \frac{1}{N_2 m_2} \right) \right| \ll \left| \frac{k_{1x}}{m_1} - \frac{k_{2x}}{m_2} \right|$$

成立时, 离子运动频率有 2 个. 即

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{k_{1x}}{m_1} - \frac{A}{N_1 m_1}, \quad (3)$$

而在强耦合条件 $\left| A \left(\frac{1}{N_1 m_1} + \frac{1}{N_2 m_2} \right) \right| \gg \left| \frac{k_{1x}}{m_1} - \frac{k_{2x}}{m_2} \right|$ 下, 用电吸收法通常只能检测到离子的集体运动频率:

$$\omega_j^2 = \frac{N_1 k_{1x} + N_2 k_{2x}}{N_1 m_1 + N_2 m_2}. \quad (4)$$

分析在固定的检测场频率 ω_d 下 $\left| \frac{k_{1x}}{m_1} - \frac{k_{2x}}{m_2} \right|$ 随 (U, V) 的变化可知: 在两吸收峰出现的区域, 弱耦合条件成立, 而在单峰区则满足强耦合条件. 因此, 改变囚禁场的参数所观察到的单峰-双峰交替现象, 可用异荷离子云耦合模型推得的强-弱耦合转变解释. 在固定检测场频率 $\omega_d/2\pi$ 时, 改变囚禁射频电压 V , 我们也观察到单峰-双峰交替, 这同样与强-弱耦合条件变化相对应.

为了认证被囚禁的两种离子的质荷比, 首先在较大的囚禁场直流和射频电压范围内跟踪单一的大峰信号, 确认正离子为 N_1^+ , 即 $m_1/e_1 = 28$. 外推在此范围内的等 β_x 线至双峰区, 发现外推的 U_{10} 值(假定离子之间无耦合时的值)与观察信号处的 U_1 不同. 对给定的 ω 和 V , 令 $\Delta U_1 = U_1 - U_{10}$, $\Delta U_2 = U_2 - U_{20}$, U_1 和 U_{20} 分别为负离子在有耦合(实验值)和无耦合时的峰位, 由(3)式可推出

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{r_0^2}{2} N_2 e \sqrt{m_1 m_2} \frac{\omega^2}{k_B T} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{2\pi k_B T}}, \\ \Delta U_2 &= -\frac{r_0^2}{2} N_1 e \sqrt{m_1 m_2} \frac{\omega^2}{k_B T} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{2\pi k_B T}}. \end{aligned} \quad (5)$$

根据实验值 U_2, V 和 Q , 以及由信号相对强度推算的相对离子数得出相应的 U_{20} 值, 通

过数值模拟推得单电荷负离子的质量数为 55—57。此种负离子的母体气体不是由外部注入,而是来自真空本底气体。由于含量很少,难以断定它的种类。大气中较高质量数的气体成分很少,此母体气体可能是由阱真空室的前级泵(机械泵-扩散泵组)的泵油扩散产生。初步推测此负离子可能是由电子电离产生的芳香族的负离子 $C_6H_7^-$ 或 $C_6H_5^-$ 。四极质谱计测量的真空系统中的残留气体谱图中: C_4 系烃中质量数为 55 和 57 的成分较大,可作为此推测的旁证。

从方程(5)可知,对正离子云 $\Delta U_1 > 0$, 而负离子云的 $\Delta U_2 < 0$, 且 $\left| \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right| = \frac{N_2}{N_1}$, 即离子的信号移动正比于另一离子的总数。这从物理上不难解释。当 $\frac{\omega}{2\pi} = 72\text{kHz}$ 时, 实测得到 $V = 149.0\text{V}$ 处的 $\Delta U_1 = 1.92$, $\Delta U_2 = -3.08$, 可见正离子的 $|\Delta U_1|$ 值小于负离子的 $|\Delta U_2|$ 值,这是因为正离子总数大于负离子总数的缘故。

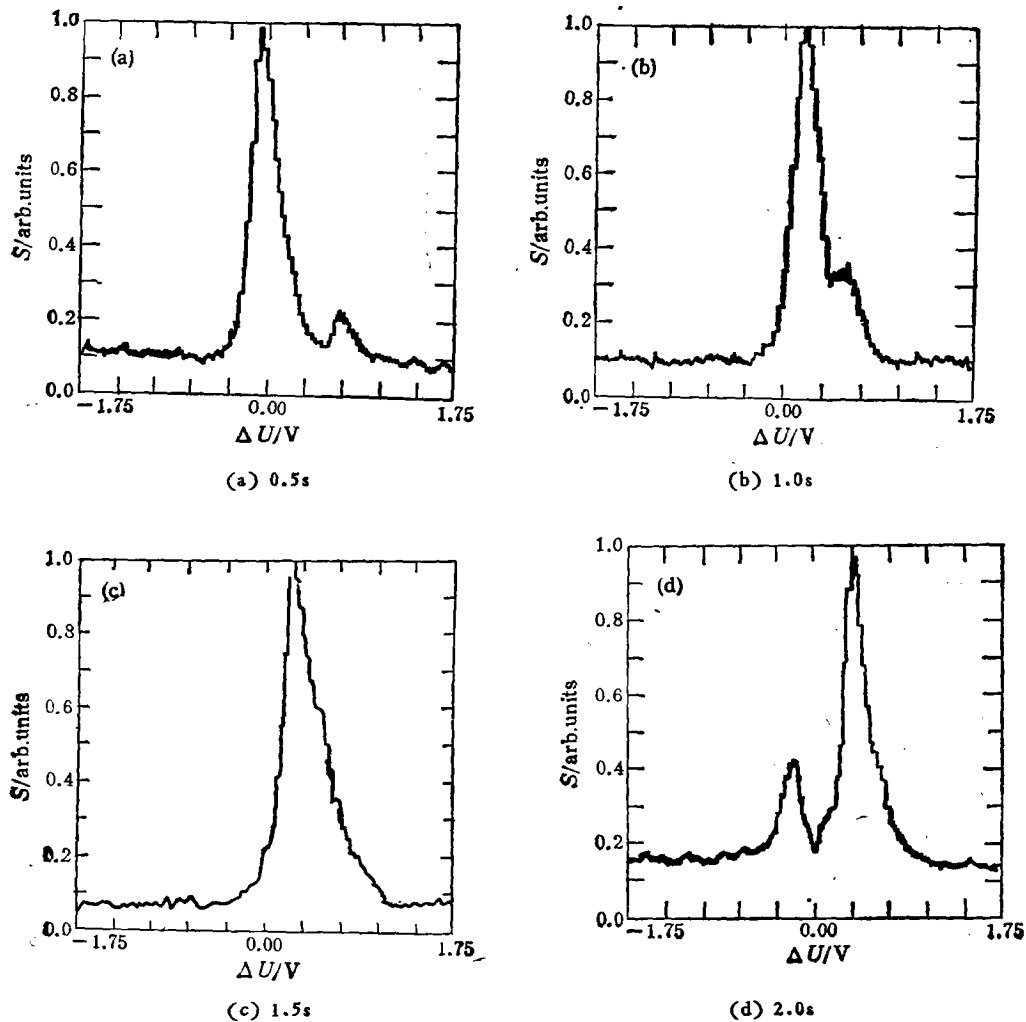


图3 双峰随延迟时间的变化 ($\omega_s/2\pi = 71.0\text{kHz}$, $V = 151.78\text{V}$, $U_0 = -10.4\text{V}$)

在实验上,改变电子束轰击的次数和时间,改变电子束电流,以及在电子束轰击停止后的不同延迟时间观察离子信号,可以考查离子数变化对双峰位移的影响。图3表示正

负离子吸收峰位置随延迟时刻变化的情况。当延迟时间增加离子数减小时, 正离子峰向 U_1 减小的方向移动, ΔU_1 变小; 负离子峰向 U_2 增大的方向移动, ΔU_2 同样减小。这与通过改变电子束流、电子束轰击次数和时间使离子数变化导致的峰位移动结果相同。上述变化趋势可由方程(5)定性描述。从物理上说, 离子数 N_1, N_2 的变化, 必然改变离子之间的 Coulomb 势, 从而改变弱耦合条件下的信号移位, 甚至转变为强耦合条件。

根据上述对异荷离子云和以前对同荷离子云^[9]的耦合运动分析可知, 两离子云间的耦合条件都由囚禁场参数 (U, V, Q) , 离子质荷比 m_i/e_i , 离子数 N_i 及离子云温度 T 决定。所以对给定的 (U, V, Q) 及检测场频率 $\omega_d/2\pi$, 由实验确定的、已知 m_i/e_i 的两离子云的耦合状态和信号位移, 可推出 N_1, N_2 和 T , 从而为由实验推算离子总数和离子云温度这两个重要物理参数提供新的方法。但是, 异荷离子云间的耦合运动类型和频率随实验参数的变化明显不同于两同荷离子云的情形。对同荷离子的耦合运动, 弱耦合区的信号位移方向相同, 当变化囚禁射频电压 V 或检测场频率 $\omega_d/2\pi$ 时, 离子吸收峰在 U 方向上的变化趋势也相同, 所以强弱耦合条件的变换主要由离子的质量差和总数差决定。同时囚禁正、负离子云时, 正、负离子的吸收峰的位移方向以及改变 V 或 $\omega_d/2\pi$ 时的变化趋势则相反, 故耦合条件的变化, 不仅与 m_i/e_i 及 N_i 之差有关, 还会随囚禁工作点的变化而明显改变。分析正、负离子的等 β_z 线可知, 两个吸收峰可以由相距甚远(通常为弱耦合区)到相交, 在交叉区附近自然存在一个强耦合区。

4 结 语

我们在认证双峰信号分别对应 Paul 阱中同时囚禁的正、负离子的基础上, 根据扩展的离子云耦合运动模型, 比较好地说明了实验观测的单峰、双峰的交替和位移。如果我们能同时囚禁已知离子种类(同荷或异荷)离子, 并找到控制、测量离子数和离子温度的方法, 将能预言强、弱耦合条件的出现, 给出耦合运动的频率, 从而定量地验证所用的离子耦合运动模型。反之, 也可用耦合运动频率或实验测得的信号移位, 确定离子数和离子云温度, 从而有助于研究 Paul 阱中的非中性等离子体和原子簇离子的动力学过程。

作者与王界兵、周建威、缪希茹、赵欣博士对有关实验和负离子的认证等进行过有益的讨论。在此一并致谢。

- [1] D. J. Larsen, J. C. Berquist, J. J. Bollinger, W. M. Itano and D. J. Wineland, *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986), 70.
- [2] Wang Jiebing, Zhu Xiwen and Gao Kelin, *Z. Phys.*, **D25** (1993), 253.
- [3] J. P. Schermann and F. G. Major, *Appl. Phys.*, **16** (1978), 225.
- [4] K. Jungmann, J. Hoffnagle, R. G. Devoe and R. G. Brewer, *Phys. Rev.*, **A36** (1981), 3451.
- [5] Yang Weijun, Gao Kelin, Zhu Xiwen, Wang Jiebing, Shi Lei, Li Jiaomei and Huang Guilong, *Z. Phys.*, **D27** (1993), 199.
- [6] A. Kajita, M. Kimura, S. Ohtani, H. Tawara and Y. Saito, *J. Phys. Soc. Japan*, **59** (1989), 1127.
- [7] 祁栋香、杨卫军、李树道、朱熙文, 化学物理学报, **5**(1992), 85.
- [8] H. G. Dehmelt, *Adv. Atom. Mol. Phys.*, **3** (1967), 53.

ANALYSIS OF THE EXPERIMENT OF THE CORRELATED MOTION OF TWO HETERO-CHARGED ION CLOUDS IN AN RF TRAP

GAO KE-LIN YAN MIN LUO XUE-LI ZHU XI-WEN HUANG GUI-LONG LI JIAO-MEI SHI LBI

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica, Wuhan 430071)

(Received 13 January 1994)

ABSTRACT

Two closely locating peaks of ion signals in an rf trap have been observed by rf absorption detection. The two peaks shift regularly and transit to a single peak under certain condition when the voltage of the confining field or the frequency of the detection field varies appropriately. The feature and tendency of the signal variations can be explained by a generalized model of two coupling hetero-charged ion clouds.

PACC: 2925; 3580