

快报

正、反粒子受控湮灭原理

魏开煜

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

本文提出了人工控制正、反粒子湮灭反应的基本原理: 用电磁场将正、反粒子约束在一起, 形成具有一定密度的“等粒子体”或“准等粒子体”. 这种“等粒子体”和“准等粒子体”是一种新的物质形态. 它能够在常温和低温下发生自行湮灭和释放能量. 温度越低反应截面越大, 并且可以通过调节正、反粒子的密度来控制其湮灭寿命和释放能量的速率.

一、无源“等粒子体”和“准等粒子体”的湮灭

假如用外加电磁场把密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 的正粒子和反粒子共同约束在一个体积为 Ω 的空间里. 那么当 ρ_1 与 ρ_2 相等时, 我们称这种正、反粒子混合物为“等粒子体”; 当 ρ_1 与 ρ_2 相近但不相等时, 称为“准等粒子体”. 在进行湮灭反应期间不从外界补充正、反粒子的等粒子体(或准等粒子体), 称为“无源”等粒子体(或准等粒子体). 以 v 表示正、反粒子的相对运动速度, $\sigma = \sigma(v)$ 表示湮灭总截面. 假如在湮灭过程中约束电磁场保持体积 Ω 不变, 那么粒子和反粒子的密度变化方程为:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{d\rho_2}{dt} = -\rho_1\rho_2\langle v\sigma \rangle. \quad (1.1)$$

式中 t 是时间, $\langle v\sigma \rangle$ 是乘积 $v\sigma(v)$ 在速度空间的统计平均值. 对于等粒子体, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, 方程简化为

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = -\langle v\sigma \rangle. \quad (1.2)$$

它的解为:

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \rho_0 \int_0^t \langle v\sigma \rangle dt \right]^{-1}. \quad (1.3)$$

式中 ρ_0 为反应的起始密度. 在时间 t 内, 单位体积中湮灭的正、反粒子对数目为

$$n = \left[\rho_0^2 \int_0^t \langle v\sigma \rangle dt \right] \left[1 + \rho_0 \int_0^t \langle v\sigma \rangle dt \right]^{-1}. \quad (1.4)$$

我们定义正、反粒子密度湮灭到起始值的一半所需的时间 τ 为等粒子体的“湮灭半衰

期”或“寿命”。它是衡量湮灭快慢的一个尺度。令 $t = \tau$ 和 $n = \frac{1}{2} \rho_0$ 就可由 (1.4) 得到确定 τ 的条件

$$\int_0^{\tau} \langle v\sigma \rangle dt = 1. \quad (1.5)$$

假如反应所释放的能量通过热交换器不断地取走, 而使等粒子体的温度保持不变。那么 v 为常数, $\sigma(v)$ 也与时间无关。在此情况下公式 (1.3)–(1.5) 可以简化为:

$$\rho = \rho_0(1 + \rho_0 \langle v\sigma \rangle t)^{-1}, \quad (1.6)$$

$$n = \rho_0^2 \langle v\sigma \rangle t (1 + \rho_0 \langle v\sigma \rangle t)^{-1}, \quad (1.7)$$

$$\tau = \frac{1}{\rho_0 \langle v\sigma \rangle}. \quad (1.8)$$

由此可见, 调节等粒子体的起始密度 ρ_0 , 可以改变湮灭“寿命”。这可以利用电磁膨胀或压缩来实现。

对于准等粒子体, 由于正粒子容易获得, 我们以 $\rho_1 > \rho_2$ 为例, 在同样的假定条件下求解方程 (1.1) 可以得到 $\rho_1 = \rho_2 + (\rho_{10} - \rho_{20})$ 以及

$$\rho_2 = \frac{\rho_{20}(\rho_{10} - \rho_{20})e^{-(\rho_{10} - \rho_{20})\langle v\sigma \rangle t}}{\rho_{10} - \rho_{20}e^{-(\rho_{10} - \rho_{20})\langle v\sigma \rangle t}}, \quad (1.9)$$

$$n = \frac{\rho_{10}\rho_{20}[1 - e^{-(\rho_{10} - \rho_{20})\langle v\sigma \rangle t}]}{\rho_{10} - \rho_{20}e^{-(\rho_{10} - \rho_{20})\langle v\sigma \rangle t}}, \quad (1.10)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{(\rho_{10} - \rho_{20})\langle v\sigma \rangle} \ln \left(\frac{2\rho_{10} - \rho_{20}}{\rho_{10}} \right). \quad (1.11)$$

这里 ρ_{10} 和 ρ_{20} 分别是正、反粒子的起始密度, 我们定义小密度成份湮灭一半所需时间为准等粒子体寿命。这里反粒子是小密度成份, 故以 τ_2 表示。当 $\rho_{10} \gg \rho_{20}$ 时, (1.9)–(1.11) 简化为:

$$\rho_2 \simeq \rho_{20}e^{-\rho_{10}\langle v\sigma \rangle t}, \quad (1.12)$$

$$n \simeq \rho_{20}(1 - e^{-\rho_{10}\langle v\sigma \rangle t}), \quad (1.13)$$

$$\tau_2 \simeq \frac{1}{\rho_{10}\langle v\sigma \rangle} \ln 2. \quad (1.14)$$

这描述稀薄反粒子束打入稠密气体、液体或固体。

二、有源“等粒子体”和“准等粒子体”的湮灭

假如使用正、反粒子源(例如加速-减速器)不断地向等粒子体和准等粒子体补充“燃料”, 并且补充速率同湮灭速率保持平衡。在此情况下, 单位体积中湮灭的正、反粒子对的数目由下列方程确定:

$$\frac{dn}{dt} = \rho_{10}\rho_{20}\langle v\sigma \rangle. \quad (2.1)$$

积分得:

$$n = \rho_{10}\rho_{20} \int_0^t \langle v\sigma \rangle dt. \quad (2.2)$$

假定反应所释放的能量被热交换器取走,保持等粒子体和准等粒子体温度不变,由(2.2)得到

$$n = \rho_0^2 \langle v\sigma \rangle t \quad (\text{等粒子体}), \quad (2.3)$$

$$n = \rho_{10}\rho_{20} \langle v\sigma \rangle t \quad (\text{准等粒子体}). \quad (2.4)$$

三、湮灭所产生的能量和功率

以 ε 表示每对正、反粒子湮灭所释放的能量,则无源等粒子体和准等粒子体在单位体积中所释放的能量分别为:

$$Q = \left(\frac{t}{t + \tau} \right) \rho_0 \varepsilon, \quad \tau = \frac{1}{\rho_0 \langle v\sigma \rangle}. \quad (3.1)$$

和

$$Q = \frac{\rho_{10}\rho_{20}(1 - e^{-(\rho_{10}-\rho_{20})\langle v\sigma \rangle t})\varepsilon}{\rho_{10} - \rho_{20}e^{-(\rho_{10}-\rho_{20})\langle v\sigma \rangle t}}. \quad (3.2)$$

无源等粒子体和准等粒子体可以用来形成脉冲式“燃烧循环”.每个循环由四步构成:(1)由正、反粒子源向电磁约束器注入正、反粒子束;(2)进行电磁压缩使正、反粒子达到所需起始密度;(3)湮灭反应;(4)电磁场恢复注入状态.假定循环周期为 T , 每个周期中湮灭反应时间为 Δt , 则单位体积中产生的平均功率为:

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \left(\frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \right) \rho_0 \varepsilon \quad (\text{等粒子体}), \quad (3.3)$$

$$\bar{W} = \frac{\rho_{10}\rho_{20}(1 - e^{-(\rho_{10}-\rho_{20})\langle v\sigma \rangle \Delta t})\left(\frac{\varepsilon}{T}\right)}{\rho_{10} - \rho_{20}e^{-(\rho_{10}-\rho_{20})\langle v\sigma \rangle \Delta t}} \quad (\text{准等粒子体}). \quad (3.4)$$

有源等粒子体和准等粒子体可以用来形成恒定燃烧,单位体积内所产生的能量和恒定功率分别为:

$$Q = \rho_0^2 \langle v\sigma \rangle \varepsilon t, \quad W = \rho_0 \left(\frac{\varepsilon}{\tau} \right) \quad (\text{等粒子体}). \quad (3.5)$$

$$Q = \varepsilon \rho_{10}\rho_{20} \langle v\sigma \rangle t, \quad W = \rho_{10}\rho_{20} \langle v\sigma \rangle \varepsilon \quad (\text{准等粒子体}). \quad (3.6)$$

四、计算及分析

低能质子、反质子 ($\bar{p}p$) 湮灭总截面的实验曲线^[1]比较接近于公式:

$$\sigma \simeq \frac{\pi R_0^2}{\gamma\beta}. \quad (4.1)$$

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\beta = \frac{v}{c}$, c 是光速; $R_0 = 1.4 \times 10^{-13}$ cm, 是由 π 介子质量估算出的核力作用半径. 假如粒子与反粒子相对运动的能散度可以忽略, 则当 $\beta \ll 1$ 时, 可得到

$$\langle v\sigma \rangle \simeq \pi R_0^2 c = 1.8 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{sec}. \quad (4.2)$$

代入(1.8)式得到 $\bar{p}p$ 等粒子体的湮灭寿命为

单

为
木
表

—
—
—
—
—
—
—
—
—

厘米
生 1

$$2) \quad \tau \simeq \frac{5.4}{\rho_0} \times 10^{14} \text{sec.} \quad (4.3)$$

3) ρ_0 以粒子对/cm³ 为单位。低能 $\bar{p}p$ 主要湮灭为 π 介子或光子。按湮灭为一对 π 介子估算, 所放出的能量大约为 $\epsilon \simeq 1.6\text{GeV}$ 。代入 (3.5) 第二式就得到有源等粒子体在单位体积中所产生的功率为

$$4) \quad W \simeq 2.6 \times 10^{-13} \left(\frac{\rho_0}{\tau} \right) \text{ kW/cm}^3. \quad (4.4)$$

对于不同起始密度 ρ_0 , 计算出的 τ 和 W 如表 1。

表 1 有源 $\bar{p}p$ 等粒子体湮灭

ρ_0 (粒子对/cm ³)	τ (sec)	W (kW/cm ³)
5.4×10^{13}	10	1.4
5.4×10^{14}	1	140
5.4×10^{15}	0.1	1.4×10^4
5.4×10^{16}	0.01	1.4×10^6

对于无源 $\bar{p}p$ 等粒子体, 在反应脉冲 Δt 中单位体积内所释放的能量为

$$Q \simeq 2.6 \times 10^{-10} \left(\frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \right) \rho_0 \text{ J/cm}^3. \quad (4.5)$$

单位体积中产生的平均功率为

$$\bar{W} \simeq 2.6 \times 10^{-13} \left[\frac{\Delta t}{T(\tau + \Delta t)} \right] \rho_0 \text{ kW/cm}^3. \quad (4.6)$$

为了在每个反应脉冲中, 90% 以上的正、反粒子都能湮灭掉, 我们令 $\Delta t = 10\tau$; 考虑到技术上的可能性, 我们取 $T \geq (\Delta t + 10\text{sec})$ 。在此参数下, 计算所得到的 τ , Q 和 \bar{W} 值列在表 2 中。

表 2 无源 $\bar{p}p$ 等粒子体湮灭

ρ_0 (粒子对/cm ³)	τ (sec)	Δt (sec)	Q (J/cm ³)	T (sec)	\bar{W} (kW/cm ³)
5.4×10^{14}	1	10	1.2×10^3	12	10
5.4×10^{15}	0.1	1	1.2×10^6	12	1×10^2
5.4×10^{16}	0.01	0.1	1.2×10^7	12	1×10^3
5.4×10^{17}	1×10^{-3}	0.01	1.2×10^8	12	1×10^4
5.4×10^{18}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1.2×10^9 (0.3 吨 TNT 当量)	—	—
5.4×10^{19}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1.2×10^{10} (3 吨 TNT 当量)	—	—

由表 1 可知, 有源 $\bar{p}p$ 等粒子体密度只要达到 5.4×10^{13} 粒子对/cm³, 就可在每立方厘米中产生 1.4 千瓦恒定功率。当密度为 5.4×10^{16} 粒子对/cm³ 时, 每立方厘米中可产生 140 万千瓦的巨大功率。

由表 2 看出, 无源 $\bar{p}p$ 等粒子体密度为 5.4×10^{14} 粒子对/cm³ 时, 每立方厘米中可产

生 10 千瓦平均功率;当密度为 5.4×10^{17} 粒子对/cm³ 时,每立方厘米中也可产生 1 万千瓦的强大功率。特别是当密度提高到 $5.4 \times 10^{18} \sim 5.4 \times 10^{19}$ 粒子对/cm³ 时,每立方厘米中在 1~0.1 毫秒的一瞬间就可以释放出 0.3~3 吨 TNT 当量的巨大能量,因而可能形成武器级爆炸。

五、结 语

本文阐述的原理可以用来设计正、反粒子受控湮灭装置,这类装置可作为研究粒子物理和反物质物理的实验装置,也可能发展成为未来的动力装置和武器。

原理也适用于异种正、反粒子,例如 $\bar{p}D$, $\bar{p}T \cdots$ 等等。 $\bar{p}D$ 和 $\bar{p}T$ 准等粒子体受控湮灭,可能用来点燃核聚变。

除 \bar{p} 外,目前可以大量产生的稳定反粒子还有 e^+ 。而 e^+e^- 准等粒子体受控湮灭装置,可能成为性能可调的强 γ 源。有重要的实用价值。

作者感谢洗鼎昌教授的热情支持和有益讨论。

参 考 文 献

- [1] W. Brückner, et al., CERN-FP/85-141, 1985.

THE CONTROLLED ANNIHILATION PRINCIPLE OF PARTICLES AND ANTIPARTICLES

WEI KAI-YU

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

ABSTRACT

In this paper, a controlled annihilation principle of particles and antiparticles is suggested. The particles and antiparticles are kept in a common space by an electromagnetic field to form an equipartisma or semiequipartisma. The equipartisma and simiequipartisma are new material form, they can annihilate themselves and liberate their energy at usual temperature. One may control the annihilation life-time and energy liberated speed with adjustment of the particle and antiparticle density.