

质子衰变实验进展*

王瑞光[†] 戴长江

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 按照粒子物理标准模型理论,重子数是绝对守恒的.而大统一理论(GUTs)明确地否定了重子数的对称性,预言质子会衰变成更轻的次粒子.文章论述了质子衰变的物理概念、基本探测条件和主要实验现状,并在探测方法的探讨和探测技术的改进方面融入了一些想法.目前一般认为质子的寿命为 $\tau_p > 10^{32}$ 年左右.质子衰变的探测,对于新理论模型的验证、宇宙学和粒子物理学的发展具有重要意义.

关键词 重子数守恒,质子衰变,寿命,探测器,反物质

The status of experimental nucleon decay research

WANG Rui-Guang[†] DAI Chang-Jiang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Baryon numbers are absolutely conserved in the standard model. However, according to the grand unified theory, nucleons in the nucleus will decay and baryon-number conservation may not be absolute. In this paper, the physical concepts, detection, and experimental status of nucleon decay research are reviewed. Our proposals to improve experimental methods and techniques are also presented. Up to now, the proton lifetime τ_p is deemed to be greater than 10^{32} years. The detection of nucleon decays will be very helpful for validation of new theoretical models and the development of cosmography and particle physics.

Keywords baryon-number conservation, proton decay, lifetime, detector, anti-matter

1 引言

在我们生活的世界里,为何宇宙中物质比反物质多?这是现代物理学中一个耐人寻味的难题.在粒子宇宙学中,这个问题表现为宇宙中的重子—反重子不对称性.按照标准模型理论,重子数、轻子数是绝对守恒的.质子是最轻的(也是最低能量的)重子,因而是绝对稳定的.然而,超出标准模型理论范畴的大统一理论(GUTs)^[1]明确地否定了重子数的对称性,预言质子经由 X 玻色子而衰变.重子数到底是绝对地、严格地守恒,还是有条件地、近似地守恒?质子衰变的实验探测,将给出最终的判决.如果

质子确实存在衰变,那么大统一理论基本设想的正确性就有了实验基础,进而为大爆炸宇宙学中的粒子生成提供了理论基础.总之,解决了质子衰变问题,人们就有可能对重子数的起源以及对宇宙的过去、现在和未来有更多的了解和真理性的认识.这正是广大物理学、宇宙学和哲学工作者多年来屏息以待地想弄清“质子衰变”的动因,使在宇宙学(极大科学)和粒子物理学(极小科学)这 2 个不同领域中同时出现“质子衰变”热.

质子衰变后会产生正电子和中性 π 介子,而中性 π 介子会再度衰变产生 2 个单位的伽马射线(γ),

* 国家自然科学基金(批准号:10775144)资助项目

2010-09-03 收到

[†] 通讯联系人. Email: wangrg@mail.ihp.ac.cn

具体反应为

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0,$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

质子是由 u, u, d 3 个夸克组成的. 在大统一能量下, 夸克和反电子之间没有本质的不同. 在正常情况下, 一个质子中的 3 个夸克没有足够能量转变成反电子, 由于测不准原理意味着质子中夸克的能量不可能严格不变, 所以, 其中一个夸克能非常偶然地获得足够能量进行这种转变, 这样质子就要衰变. 但是衰变的概率是如此之低, 以至于至少要等 100 万亿亿年 (10^{30} 年) 才能有一次. SO(10) G_{422} 预言质子寿命为 1.44×10^{32} 年^[2-4], 而 minimal SUSY SU(5) 预言质子寿命为 2×10^{35} 年^[5-7], 额外维度模型则预言质子 $p \rightarrow \text{nothing}$ 寿命为 9.2×10^{34} 年^[8].

另一方面, 新的理论模型预言在原子核中的核子将衰变, 重子数守恒将被破坏^[9-11]. 如果以 B 表示重子数, 重子数守恒被破坏时, 其改变数 $\Delta B=1$ 、 $\Delta B=2$ 等^[12-14]. 重子数破坏对解释当今宇宙物质存在的现状有着非常重要的作用, 因而颇被人们所关注. 国际上已有不少实验组对质子衰变和核中核子衰变做了实验研究, 这些对于新的理论模型的验证具有重要的科学意义.

2 质子衰变探测的基本条件

因为质子寿命极长, 衰变事例极少, 加上衰变后的产物不易探测和甄别, 实验探测极为困难. 从理论上讲, 实验必须具备以下几个条件: 第一, 要有足够多的包含极大数量质子的探测物质. 比如用 4000 吨的水作为探测物质 (约含质子和中子 2.5×10^{33} 个), 假设质子寿命为 10^{31} 年, 每月可以期望看到 20 个衰变事例. 扣除其他效应, 能够观察到的事例大概只有一半. 除 H_2 外, 一切物质中都含有将近一半的中子. 中子也是由夸克组成的, 也会由于其中的夸克传递一个 X 粒子而衰变. 在一切“质子衰变”实验中, 也计入了这样的中子衰变. 第二, 必须排除宇宙线的干扰. 即实验必须深潜在地下或海底进行, 利用岩石土层或海水来减少宇宙射线本底. 但宇宙线中有高能 μ 子和中微子, μ 子的穿透力很强, 仍有一部分深入地下, 而中微子几乎可穿透地球而毫不衰减. 如果宇宙线中的中微子被质子吸收而发生 $p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$ 的类似质子衰变过程, 给事例的甄别带来一定困难. 因此, 第三, 要有一套能利用质子衰变产物的特征来鉴别信号真伪的装置. 按大统一理论, 质子衰变最常见的通道为

$p \rightarrow \pi^0 + e^+$, π^0 又会立即衰变为 2 个 γ 光子. 所以, 我们可从测定装置内的某一点上突然放出一个 e^+ 和 2 个 γ 的现象而辨别事例的真伪.

3 实验研究现状

最早的实验是莱因斯 (F. Reines) 和哥德哈伯 (M. Goldhaber) 于 1954 年进行的^[15]. 他们用了 50kg 的闪烁体, 质子和中子的总数约为 3×10^{28} 个. 如果有一个质子衰变为 e^+ 和 π^0 , 那么每个粒子的能量应接近于 500MeV, 其中 π^0 又很快衰变为高能 γ 光子. 这些高能粒子在闪烁体中运动时会使闪烁体发光. 用光电倍增管接收这些光信号可以计算出高能粒子的运动轨迹和能量, 从而可以把质子衰变和宇宙射线的干扰区别开. 为了减小宇宙线的影响, 实验是在一个 30m 深的地下室进行的. 该实验运行了几小时, 每秒钟有几次闪光, 但分析结果认为, 这些闪光都是宇宙线引起的假信号, 未发现一个质子衰变事例.

随后, 日本、印度、美国和欧洲的一些研究小组, 先后开展了质子衰变的实验探索. 20 世纪 80 年代初以来, 越来越多的国际小组投入探测行列, 实验规模越来越大, 水平越来越高. 比如, 由印度和日本科学家组成的实验小组利用印度柯拉金矿 (Kolar Gold Field) 的废矿井做实验测定质子的衰变^[16]. 该实验装置的基本框架是由一层铁和一层探测器相间叠合起来. 一期装置安装了 34 层探测器共约 1600 个计数单元, 每层探测器大小为 $4 \times 6m^2$, 两层探测器间插入 1.2cm 厚的铁板, 重量 140 吨. 二期装置增加到了 60 层探测器共约 4000 个计数单元, 每层探测器大小改为 $6 \times 6m^2$, 因此重量增加到 260 吨. 整个装置在地下 2300m 的深处, 等效于 7600m 深的水. 实验从 1980 年末开始运行, 1993 年结束, 没有观察到确信的质子衰变事例 (虽然有几个事例候选者). 基于多年的观测数据, 曾推算出质子的平均寿命在 10^{31} 年的量级.

柯拉金矿实验是采用固态材料作为探测物质. 类似的实验还有: 欧洲组在意大利法国边境的阿尔卑斯山脉勃朗峰的隧道中进行的 NUSEX 实验^[17], 探测器重量 150 吨. 1983 年, 他们宣称观测到一个衰变候选事例, 相应的质子寿命 2.2×10^{31} 年. 欧洲组还在阿尔卑斯山的弗雷瑞斯隧道 (Frejus Tunnel) 进行了 FREJUS 实验^[18], 探测器重量达到了 900 吨, 给出 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 衰变通道的质子寿命

大于 1.0×10^{32} 年, $p \rightarrow k^+ + \bar{\nu}$ 衰变通道的质子寿命大于 5.4×10^{30} 年^[19]. 而在美国明尼苏达(Soudan)地下矿洞中, 美国人安装了 960 吨的探测器^[20], 给出质子寿命 3.8×10^{31} 年^[21].

除了探测物质为固态材料外, 还有以水作为探测物质的探测器. 典型的有美国的 IMB 实验^[22]、日本神冈实验(Kamiokande)^[23] 和日本超级神冈实验(Super-Kamiokande)^[24]. IMB 实验是在美国的俄亥俄州的克里夫莱德一个深约 600m (相当于 1570m 水深) 的盐矿进行. 探测器大小有 $22.5 \times 17 \times 18 \text{m}^3$, 中间灌入 3300 吨的纯净水(水不断的循环过滤), 在周围安装了 2048 个光电管收集光信号. 当质子衰变为一个正电子与一个 π 介子、带电粒子在水中的运动速度超过光在水中的传播速度时, 就会产生切连科夫辐射, 并且被周围的光电倍增管记录下来. 经过观察也没有发现质子的衰变. 他们得出的结论是质子寿命大于 1.5×10^{32} 年.

神冈和超级神冈探测器是日本建造的大型中微子探测器, 位于日本岐阜县的一个深达 1000m 的废弃砷矿中. 其目标是探测质子衰变以及太阳、地球大气和超新星爆发产生的中微子. 探测器主要部分是一个内部盛有高纯度水的圆柱形容器, 容器内壁上安装有光电倍增管. 从 1982 年到 1996 年, 探测器容量扩大了近 10 倍: 容器从高 16m、直径 15.6m, 扩大为高 41.4m、直径 39.3m; 盛水从 3000 吨增加为 5 万吨; 光电倍增管从约 1000 只增加为 11200 只. 因此从最初的神冈探测器更名为超级神冈探测器. 尽管神冈/超级神冈探测器探测质子衰变的目标还没有实现, 但因探测到太阳中微子的缺失、给出中微子振荡的首个确切证据, 其实验组领导者日本科学家小柴昌俊获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖.

按照衰变物理模型, 目前的重子数实验大体可分为 2 类, 现分述如下:

3.1 质子衰变实验

国际上已有不少实验组对质子衰变作了实验研究. 典型的如: 用于中微子和核子衰变实验的大型水切连科夫探测器 Super-Kamiokande, 它具有 5 万吨水, 如果水中产生 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$, 而 π^0 又衰变为 2 个 γ 光子, 这样对于每个质子衰变事例, 水切连科夫探测器可以测到 3 个切连科夫光信号(e^+ 和 2 个 γ 光子). 该实验选择 π^0 的质量范围为 $85-185 \text{MeV}/c^2$; 总的不变质量范围为 $800-1050 \text{MeV}/c^2$, 在总曝光量达 14 万吨年时, 在总动量与总不变质量相关的参数平面上的特定区域(总动量: $0-300 \text{MeV}/c$; 总的不变质量: $800-1050 \text{MeV}/$

c^2) 内没有测到 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 的衰变事例, 给出 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 衰变通道的质子寿命大于 8.2×10^{33} 年 (90% C. L.); 此实验同时也给出 $p \rightarrow k^+ + \bar{\nu}$ 衰变通道的质子寿命大于 2.8×10^{33} 年 (90% C. L.)^[25]. 未来将有更多的实验组开发大型的、具有高空间分辨和高能量分辨的径迹探测器, 用于观测不同的质子衰变通道, 给出更长的质子寿命. 如 ICANOE 将开发 3 万吨的大型液氙中微子和核子衰变径迹探测器, 将用于研究质子按衰变通道 $p \rightarrow k^+ + \bar{\nu}$ 的实验探测, 预期目标为质子寿命大于 10^{34} 年^[26,27]. 又如, LANNDD 将开发一个具有 7 万吨的大型液氙中微子和核子衰变径迹探测器, 将用于研究质子按衰变通道 $p \rightarrow k^+ + \bar{\nu}$ 的实验探测, 实验目标是质子寿命 10^{35} 年^[28].

3.2 核中核子衰变实验

国际上已有不少实验组对核中核子衰变作了实验研究^[29], 如地下大型实验有 IMB, Kamiokande, FREJUS collaboration, Super-Kamiokande 等, 主要观测核中核子衰变为中微子的通道. 典型的如 FREJUS^[19], 它以整个地球的原子核为核源, 采用了 700 吨含铁的径迹量能探测器, 观测核中单中子和双中子衰变为中微子的稀有事件, 即通过径迹量能器对中微子的探测, 在总曝光量达 2 千吨年时, 给出核中核子的衰变寿命下限 τ : 对于单中子衰变, $\tau(n \rightarrow \nu \bar{\nu}) > 1.2 \times 10^{26}$ 年; 对于双中子衰变, $\tau(nn \rightarrow \nu \bar{\nu}) > 6.0 \times 10^{24}$ 年. 又如 Kamiokande^[30] 采用了 2 千多吨水切连科夫探测器观测 ^{16}O 核中中子衰变为三中微子(两个中微子加一个反中微子)的稀有事件, 由探测中微子产生的信号, 在总曝光量达 7.7 千吨年时, 给出核中中子的衰变寿命下限 $\tau(n \rightarrow \nu \bar{\nu}) > 2.3 \times 10^{27}$ 年 (90% C. L.).

另外, 地下大型中微子探测器也被用于观测核中核子衰变到不可见通道的稀有事件, 给出核中核子的衰变寿命下限. 如用于中微子和核子衰变实验的大型液体闪烁探测器 KAMLAND, 它具有低的探测阈能量 ($< 1 \text{MeV}$)、好的能量分辨和空间分辨. 在总曝光量达 838 吨年时, 通过对母核 ^{12}C 衰变后的子核 ^{11}C 的再衰变产物(n 或 n, r) 的探测, 获得 ^{12}C 核中单中子衰变到不可见通道的寿命($n \rightarrow \text{inv.}$) 大于 5.8×10^{29} 年 (90% C. L.). 同时该实验也获得双中子衰变到不可见通道的寿命($nn \rightarrow \text{inv.}$) 大于 1.4×10^{30} 年 (90% C. L.)^[31]. 又如, 用于太阳中微子实验的大型 D_2O 探测器 SNO, 利用探测器中的 ^{16}O 作母核, 在总曝光量达 $7 \times 10^8 \text{cm}^3 \times 254$ 天时, 通过对母核 ^{16}O 衰变后的子核 ^{15}O 的退激 γ 射线的探测, 获得 ^{16}O 核中单中子衰变到不可见通道的寿命($n \rightarrow \text{inv.}$) 大于 1.9×10^{29} 年 (90% C. L.). 同时实验也获

得单质子衰变到不可见通道的寿命($p \rightarrow \text{inv.}$)大于 2.1×10^{29} 年 (90% C. L.) [32].

将来,除了现有的这些实验继续观测核中核子的衰变实验外,将有更多投入运行的地下大型中微子实验,也将兼顾探测核中核子的衰变实验,将给出更高的核子衰变寿命下限.

另一方面,10 多年来,由于地下低本底实验技术取得长足的进展,采用地下小型实验装置研究核中核子衰变的实验又掀起了新的高潮,典型的如 DAMA collaboration [33] 和 Borxino test facility [34] 等. 这些实验是通过探测子核的衰变来观测母核中的核子衰变,即主要观测核中核子衰变到不可见的通道. 由于探测的是子核衰变时放出的射线,探测效率高,所以能以小型的实验装置同样也可获取好的结果. 如 DAMA/LXe, 采用 6.5 kg 的液态氙闪烁探测器探测 ^{129}Xe 核的核子衰变,通过对母核 ^{129}Xe 衰变后的子核 ^{128}I 的再衰变产物的探测,在总曝光量达 2258 kgdays 时,给出核中核子的衰变寿命下限 $\tau: \tau(p \rightarrow \text{inv.}) > 1.9 \times 10^{24}$ 年 (90% C. L.). 同时该实验也获得: $\tau(pp \rightarrow \text{inv.}) > 5.5 \times 10^{23}$ 年 (90% C. L.)

; $\tau(nn \rightarrow \text{inv.}) > 1.2 \times 10^{25}$ 年 (90% C. L.). 又如 Borxino test facility 采用 4.2 吨的 C16H18 液体闪烁探测器探测 ^{12}C 核的核子衰变,也给出了核中核子衰变寿命的新下限. GIUNT-I 组 [12] 也正在着手准备此核子衰变通道的研究.

鉴于核子的衰变寿命很长,其下限至少大于 10^{23} 年 [35], 所以为了提高测量精度,对于观测核中核子衰变为中微子通道的模式,必须使用大规模探测器或超大规模探测器来研究重子数是否守恒的问题,所需要的经费是非常庞大的. 而观测核中核子衰变到不可见通道的模式,虽可采用地下较小型实验装置,较经济,也可获得较好结果. 但其实验的关键问题是: (1) 提高灵敏度,采用源器合一,而且待测核的同位素丰度要高; (2) 观测时采用子核伴随衰变放出的电子和光子作符合测量法来观测,将可显著地抑制本底; (3) 利用地下实验室低宇宙线本底,结合主动、被动屏蔽措施,将可极大地降低本底,从而进一步提高测量精度和灵敏度,以期获取此核子衰变模式的新结果.

关于重子数主要实验的基本探测结果见表 1.

表 1 目前重子数实验简况

衰变通道	核子寿命下限	实验名称	实验简介
$p \rightarrow e^+ + \pi^0$	8.2×10^{33} 年 (90% C. L.)	Super-Kamiokande	5 万吨水的水切连科夫探测器; 探测 e^+ 和 2 个 γ 光子等 3 个切连科夫光信号; 总曝光量达 14 万吨年
$p \rightarrow k^+ + \bar{\nu}$	2.8×10^{33} 年 (90% C. L.)	Super-Kamiokande	实验同上
$n \rightarrow \nu \bar{\nu} \nu$	1.2×10^{26} 年	Frejus	700 吨含铁的径迹量能探测器; 探测核子衰变产生的中微子; 总曝光量达 2 千吨年
$nn \rightarrow \nu \bar{\nu}$	6.0×10^{24} 年	Frejus	实验同上
$n \rightarrow \nu \bar{\nu} \nu$	2.3×10^{27} 年 (90% C. L.)	Kamiokande	2 千吨水的水切连科夫探测器; 探测核子衰变产生的中微子; 总曝光量达 7.7 千吨年
$n \rightarrow \text{inv.}$	5.8×10^{29} 年 (90% C. L.)	KAMLAND	大型液体闪烁探测器; 通过对母核 ^{12}C 衰变后的子核 ^{11}C 的再衰变产物 (n 或 n, r) 的探测; 总曝光量达 838 吨年
$nn \rightarrow \text{inv.}$	1.4×10^{30} 年 (90% C. L.)	KAMLAND	实验同上
$n \rightarrow \text{inv.}$	1.9×10^{29} 年 (90% C. L.)	SNO	大型 D_2O 探测器; 通过对母核 ^{16}O 衰变后的子核 ^{15}O 的退激 γ 射线的探测; 总曝光量达 $7 \times 10^8 \text{cm}^3 \times 254$ 天
$p \rightarrow \text{inv.}$	2.1×10^{29} 年 (90% C. L.)	SNO	实验同上
$p \rightarrow \text{inv.}$	1.9×10^{24} 年 (90% C. L.)	DAMA/LXe	6.5 kg 的液态氙闪烁探测器; 通过对母核 ^{129}Xe 衰变后的子核 ^{128}I 的再衰变产物的探测; 总曝光量达 2258 kgdays
$pp \rightarrow \text{inv.}$	5.5×10^{23} 年 (90% C. L.)	DAMA/LXe	实验同上
$nn \rightarrow \text{inv.}$	1.2×10^{25} 年 (90% C. L.)	DAMA/LXe	实验同上

4 展望

除了现有的这些实验继续观测核中核子的衰变外,有更多的探测暗物质的地下实验将投入运行,同时来观测质子衰变事例. 双 β 观测实验也将兼顾探测核中核子的衰变,将给出更高的核子衰变寿命下限. 随着理论研究的不断深入和探测器技术的进一步提高,新的更有效的探测方法将得到论证,并将应用于更大规模探测器的设计制造中^[36,37]. 我们深信,揭开诸如重子数起源、反物质消失、宇宙的形成及未来等众多科学之谜的日子已经不远了.

参考文献

- [1] Albrecht A, Steinhardt P J. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48: 1220
- [2] Pati J C. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2003, 18: 4135
- [3] Babu K S, Pati J C, Wilczek F. *Phys. Lett. B*, 1998, 423: 337
- [4] Babu K S, Pati J C, Wilczek F. *Nucl. Phys. B*, 2000, 566: 33
- [5] Dimopoulos S, Georgi H. *Nucl. Phys. B*, 1981, 193: 150
- [6] Sakai S, Yanagida T. *Nucl. Phys. B*, 1982, 197: 533
- [7] Hisano J, Murayama H, Yanagida T. *Nucl. Phys. B*, 1993, 402: 46
- [8] Dubovsky S L. *Journal of High Energy Physics*, 2002, 1: 12
- [9] Pati J C *et al.* *Phys. Rev. D*, 1984, 29: 1549
- [10] Pati J C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 31: 661
- [11] Feinberg G *et al.* *Phys. Rev. D*, 1978, 18: 1602
- [12] Langacker P. *Phys. Report*, 1981, 71: 185
- [13] Goldhaber M *et al.* *Science*, 1980, 210: 851
- [14] Klapdor-Kleingrothaus H V, Staudt A. *Non-accelerator Particle Physics*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1995. 146
- [15] Reines F, Cowan C L, Goldhaber M. *Phys. Rev.*, 1954, 96: 1157
- [16] Adarkar H, Hayashi Y *et al.* arXiv: hep-ex/0008074v1, 2000 (http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/0008/0008074v1.pdf)
- [17] Battistoni G, Campana P, Chiarella V *et al.* Results on Nucleon Decay in the Mont Blanc NUSEX Experiment. In: Proceedings of the 18th ICRC. Bangalore, India, 1983, 174
- [18] Berger C *et al.* *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1987, 262: 463
- [19] Berger C *et al.* *Phys. Lett. B*, 1991, 269: 227
- [20] Thron J L. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1989, 283: 642
- [21] Goodman M for SOUDAN 2 Collaboration, Nucleon decay in Soudan 2. In: Proceedings of the 26th ICRC. Salt Lake City, Utah, USA, 1999, 364
- [22] Becker-Szendy R *et al.* *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1993, 324: 363
- [23] Koshiba M, Kamioka Nucleon Decay Experiment; Kamio-kande Collaboration. Lecture given at SLAC Summer Institute, July 1988
- [24] Fukuda Y *et al.* *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2003, 501: 418
- [25] Kaneyuki K. Results of nucleon decay search in Super-Kamio-kande-I + II. In: The Eleventh International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP), Roma, July 2009 (<http://taup2009.lngs.infn.it/slides/jul4/kaneyuki.pdf>)
- [26] Rubbia A. *Nuclear Physics B: Proceedings Supplements*, 2001, 91(1-3): 223
- [27] Bueno A. Presented at NNN00 Fermilab Nucleon Decay and Neutrino Detector workshop, FNAL, August 2000
- [28] David B C. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2003, 503: 136
- [29] Caso C *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 1998, 3: 1
- [30] Glicenstein J F. *Phys. Lett. B*, 1997, 411: 326
- [31] Araki T. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 101802
- [32] Ahmed S N. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 102004
- [33] Bernabei R *et al.* *Phys. Lett. B*, 2000, 493: 12
- [34] Back H O *et al.* *Phys. Lett. B*, 2003, 563: 23
- [35] Masina L S *et al.* *Phys. Lett. B*, 2004, 579: 99
- [36] Rubbia A. Very massive underground detectors for proton decay searches. In: The XI International Conference on Calorimetry in High Energy Physics-CALOR2004, Perugia, Italy, 2004 (arXiv: hep-ph/0407297v1)
- [37] Senjanovic G. Proton decay and grand unification. In: the SU-SY09 and PASCOS09 Conferences, 2009 (arXiv: 0912.5375v1 [hep-ph])