

集萃_1

题1

定义：三维欧氏空间中的点称为整点，当且仅当 x, y, z 坐标都是整数，例如 $(1, 1, 2)$, $(-2, 6, -2)$ 。从空间中任取 n 个整点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ ，再从它们之中任取两个不同的点 $P_i, P_j (i \neq j)$ ， P_i, P_j 的中点**不会**是整点。问： n 的最大值为_____

答案：8

解析：

如果两个整点的中点还是整点，说明 x, y, z 坐标的奇偶性相同（因为奇加奇得偶，偶加偶得偶，而偶数除以二一定是整数）。 x, y, z 的奇偶性一共能组合出8种情况：(奇, 奇, 奇), (奇, 偶, 奇), (偶, 奇, 奇), (奇, 奇, 偶), (奇, 偶, 偶), (偶, 偶, 奇), (偶, 奇, 偶), (偶, 偶, 偶)。那么 $n > 8$ 时，也就是任取空间中至少9个整点时，其中必然存在两个整点的奇偶性相同，从而它们两个的中点也是整点。现在题目要求所有的中点都不能是整点，所以 n 最大为8(也就是取遍了所有奇偶性的组合)。

题2

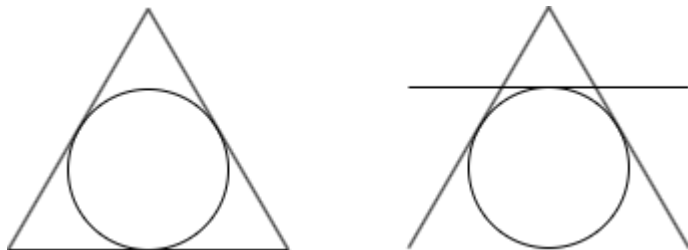
平面直角坐标系中有三条直线：

$l_1 : \cos \theta_1 \cdot x + \sin \theta_1 \cdot y = 1, l_2 : \cos \theta_2 \cdot x + \sin \theta_2 \cdot y = 1, l_3 : \cos \theta_3 \cdot x + \sin \theta_3 \cdot y = 1$ ，其中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \theta_3$ 。若 l_1, l_2, l_3 围成一个等边三角形，其面积为 S ，则 S 的取值集合为_____

答案： $\{\frac{\sqrt{3}}{3}, 3\sqrt{3}\}$

解析：

观察三条直线的结构，容易注意到它们到原点的距离都为1。所以，它们都是单位圆的切线。又因为围成了等边三角形，所以有两种情形：要么单位圆作为等边三角形的内切圆，要么单位圆作为等边三角形的外切圆(注意不是外接圆)。如下图所示：



题3

任取一户有两个孩子的家庭，已知其中一个女孩，则另一个是女孩的概率为_____

答案： $\frac{1}{2}$还是 $\frac{1}{3}$?

本题是一道争议很大的题目，被称为两孩悖论。在著名的概率论科普读物《醉汉的脚步》中，作者认为本题的答案是 $\frac{1}{3}$ ，同时他还得到了一个更加违反常识的结论：如果把条件“已知其中一个是女孩”改为“已知其中一个是女孩，名字叫佛罗里达”，则结果变成 $\frac{1}{2}$ 。

我知道，第一次看到上面的答案时，你会感到惊讶。实际上，上面的答案虽然有一定的道理，但也并不完全正确。迄今为止，包括《醉汉的脚步》作者蒙洛迪诺在内的很多人都对上面的答案提出了质疑。

我们先来看看蒙洛迪诺在书中写提出的解法：

- 这是一个古典概型问题，考虑出生顺序，样本空间为{男，男}，{男，女}，{女，男}，{女，女}，现在已知有一个是女孩，那么{男，男}这种情况就不可能了，样本空间缩小为{女，女}，{男，女}，{女，男}，因此概率为 $\frac{1}{3}$ 。
- 如果把条件改成“已知其中一个是女孩，名字叫佛罗里达”，我们可以用女F表示叫佛罗里达的女孩，女NF表示不叫佛罗里达的女孩，这样样本空间就变成{男，男}，{女F，男}，{男，女F}，{女NF，男}，{男，女NF}，{女F，女NF}，{女NF，女F}，现在已知有一个叫佛罗里达的女孩，那么样本空间缩小为{女F，男}，{男，女F}，{女F，女NF}，{女NF，女F}，因此概率为 $\frac{1}{2}$ 。

上面的解答看起来天衣无缝，但得到的结果非常违反直觉。到底错在哪？

严格来说，本题的题干是模糊不清的，因而对题干的不同理解，会导出不同的答案。

如果你认为本题的答案是 $\frac{1}{2}$ ，你应该是这么想的：这是一个古典概型问题，不考虑出生顺序，样本空间为{男，男}，{男，女}，{女，女}，现在已知有一个是女孩，那么{男，男}这种情况就不可能了，样本空间变成{女，女}，{男，女}，因此概率为 $\frac{1}{2}$ 。

问题在于样本空间上面，究竟有没有先后顺序之分？

在本题中，这个争议是解决不了的，因为本题的条件：“已知其中一个是女孩”叙述模糊，不管是从中文来理解，还是从英文原文来理解，都无从确定是否“特指”。

题4

设 n 个随机事件 A_1, A_2, \dots, A_n ，发生的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_n ，满足 $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ ，其中 $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n$ ，并且 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 都是 $\frac{1}{2}$ 的幂。

证明： $p_1 = p_2$ 。

解析：

我们设

\$\$

\$\$

$$p_i = \left(\frac{1}{2}\right)^{k_i}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

应有 $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_n$ ，我们要证明 $k_1 = k_2$ 。根据 $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ ，有

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{k_1} + \left(\frac{1}{2}\right)^{k_2} + \dots + \left(\frac{1}{2}\right)^{k_n} = 1$$

我们把它写成

$$1 + 2^{k_1-k_2} + 2^{k_1-k_3} + \dots + 2^{k_1-k_n} = 2^{k_1}$$

注意到右边是偶数，所以左边也是偶数。那么 $2^{k_1-k_2} + 2^{k_1-k_3} + \dots + 2^{k_1-k_n}$ 就应该是奇数，说明其中有指数为0的项（有奇数个，总之至少有一个）。因此至少我们知道 $k_1 - k_2$ 为0（因为它是的指数），从而 $k_1 = k_2$ 。即

$$p_1 = p_2。$$

注：这个问题看似单薄，实则背景深厚。所有概率均为 $\frac{1}{2}$ 的幂，这样的情况非常特别，在很多地方都有应用。就我所知道的而言，计算机科学中的*Huffman*编码就是在这样的情况下，取到平均编码长度的下界。

题5

设 $a, b \in \mathbb{R}$ ，若对于任意 $x \in [-1, 1]$ ，都有 $|x^2 + ax + b| \leq 1$ ，则 a 的取值范围是_____

答案： $[2 - 2\sqrt{2}, -2 + 2\sqrt{2}]$

解析：

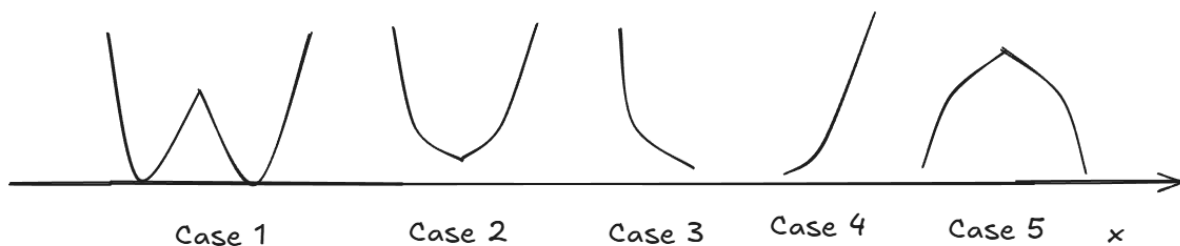
这道题目可谓是把数学“**题干越短，题目越难**”的特点展现得淋漓尽致。没有接触过数学竞赛的正常高中生，如果能独立地做出这道题，可以说是非常非常不错的了。

曾经，浙江卷自主命题的时候，其一大特点就是层出不穷的绝对值。绝对值，这个数学概念看似简单，实则深奥无比，在绝对值上大做文章的难题比比皆是。

本题就是这样一道绝对值难题，它其实有一个背景，称为“**切比雪夫最佳逼近**”，只不过这个背景实在是过于深邃，没有一定竞赛基础的话很难真正弄懂，所以，我就以最通俗易懂的高中数学方法来解决这道题目。

设 $f(x) = x^2 + ax + b, x \in [-1, 1]$ ，根据题目条件， $|f(x)|$ 的最大值为1。那么很自然的想到，要把 $|f(x)|$ 的图像给画出来。

这是个什么样的函数？二次函数套绝对值，它在 $[-1, 1]$ 内的图像应该有5种情况：



我们先来考虑最复杂的Case 1：

要想出现这样的图像，说明 $f(x)$ 的对称轴在 $[-1, 1]$ 内，并且 $f(x)$ 的最小值要小于0，把这两个条件转换成数学语言，就是：

$$-1 < -\frac{a}{2} < 1 \quad (1)$$

$$\frac{4b - a^2}{4} < 0 \quad (2)$$

也就是

\$\$

\$\$

$$-2 < a < 2$$

$$b < \frac{a^2}{4}$$

此时 $|f(x)|$ 的最大值等于 $\max\{f(-1), f(-\frac{a}{2}), f(1)\}$, 即

$$\begin{aligned}\max_{[-1,1]}|f(x)| &= \max\{f(-1), f(-\frac{a}{2}), f(1)\} \\ &= \max\{-a + b + 1, \frac{4b - a^2}{4}, a + b + 1\}\end{aligned}$$

根据题意, 上面这个最大值小于等于 1 , 说明

$$-a + b + 1 \leq 1$$

$$\frac{a^2 - 4b}{4} \leq 1$$

$$a + b + 1 \leq 1$$

化简上面的式子, 并结合 (1), (2) , 我们有

$$b \leq a \quad (3)$$

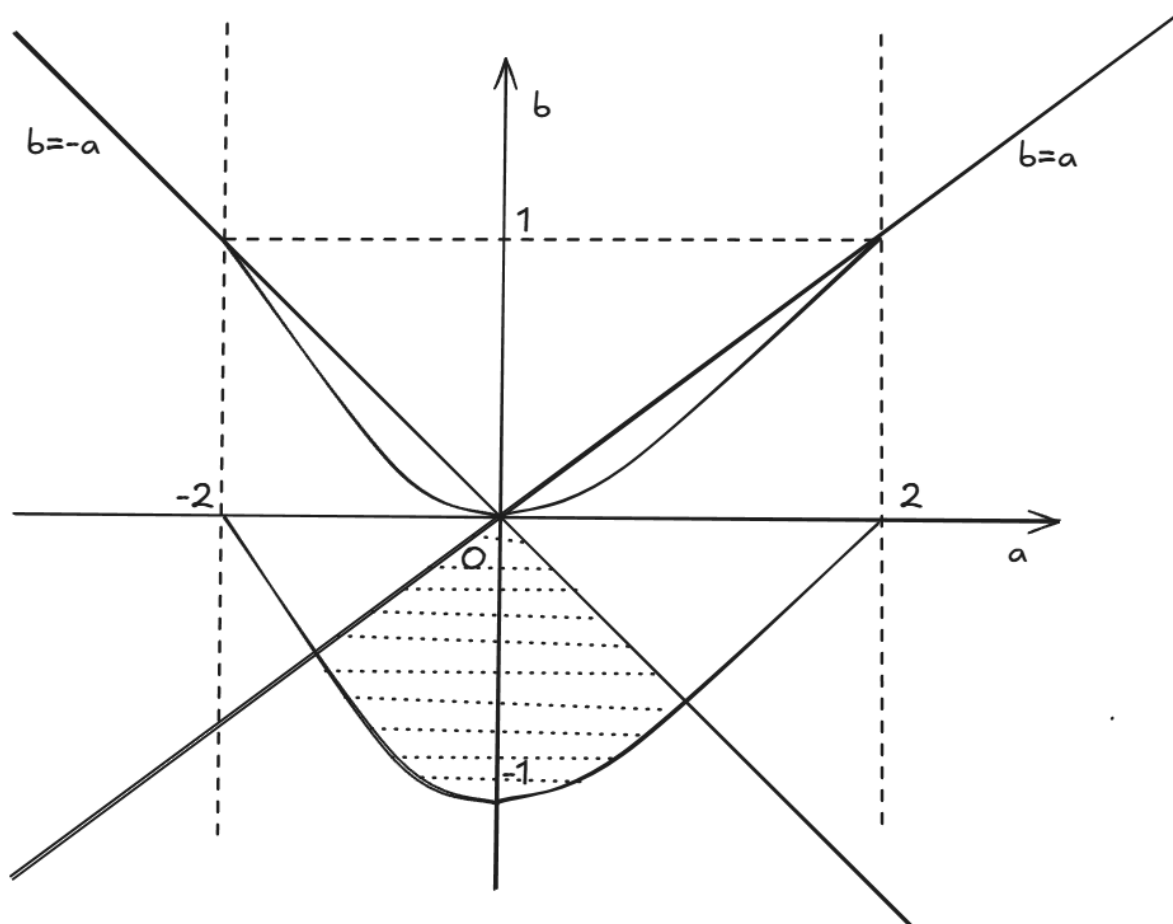
$$b \geq \frac{a^2}{4} - 1 \quad (4)$$

$$b \leq -a \quad (5)$$

$$-2 < a < 2 \quad (6)$$

$$b \leq \frac{a^2}{4} \quad (7)$$

上面这个不等式组, 已经指明了 a, b 的范围。我们在平面直角坐标系中画出该不等式组表示的的区域:



如图，点 (a, b) 的范围用点线描绘了出来。它是由 $b = \frac{a^2}{2}, b = \frac{a^2}{4} - 1, b = a, b = -a$ 四条曲线/直线包围出来的区域，包括边界。因此 $2 - 2\sqrt{2} \leq a \leq 2\sqrt{2} - 2$ 。

对于其它 4 种情况，做法是一样的，留给读者自行解决。

题6

- (1) 证明：不存在 7 条棱的多面体。
- (2) 证明：正多面体的面数只能是 4, 6, 8, 12, 20。

解析：

- (1) 反证法。假设存在一个 7 条棱的多面体，它的面数为 ϕ ，顶点数为 v ，边数为 $\varepsilon = 7$ 。

因为每个面上至少有 3 条边，所以 $3\phi \leq 2v = 14$ ，所以 $\phi \leq 4$ ，又因为 $\phi \geq 4$ ，故 $\phi = 4$ 。但是四面体的边数为 6，故假设不成立，也就是不存在 7 条棱的多面体。

- (2) 设正多面体的面数为 ϕ ，顶点数为 v ，边数为 ε ，从每个顶点连出的边数为 δ ，每个面都是正 n 边形，则：

$$v + \phi - \varepsilon = 2$$

$$n \cdot \phi = 2\varepsilon$$

$$\delta \cdot v = 2\varepsilon$$

解得

$$(2n + 2\delta - \delta n)\phi = 4\delta$$

分下面几种情况讨论：

- $\delta = 3$, 则 $(6 - n)\phi = 12$
 - $n = 3$, $\phi = 4$, 即正四面体, 每个面都是正三角形
 - $n = 4$, $\phi = 6$, 即正六面体, 每个面都是正四边形
 - $n = 5$, $\phi = 12$, 即正十二面体, 每个面都是正五边形
- $\delta = 4$, 则 $(8 - 2n)\phi = 16$
 - $n = 3$, $\phi = 8$, 即正八面体, 每个面都是正三角形
- $\delta = 5$, 则 $(10 - 3n)\phi = 20$
 - $n = 3$, $\phi = 20$, 即正二十面体, 每个面都是正三角形
- $\delta > 5$, 这种情况是不成立的。

证毕!