BGR-1 C-0 C-1

**BGR-1 C-0 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# General instructions
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# G0-1

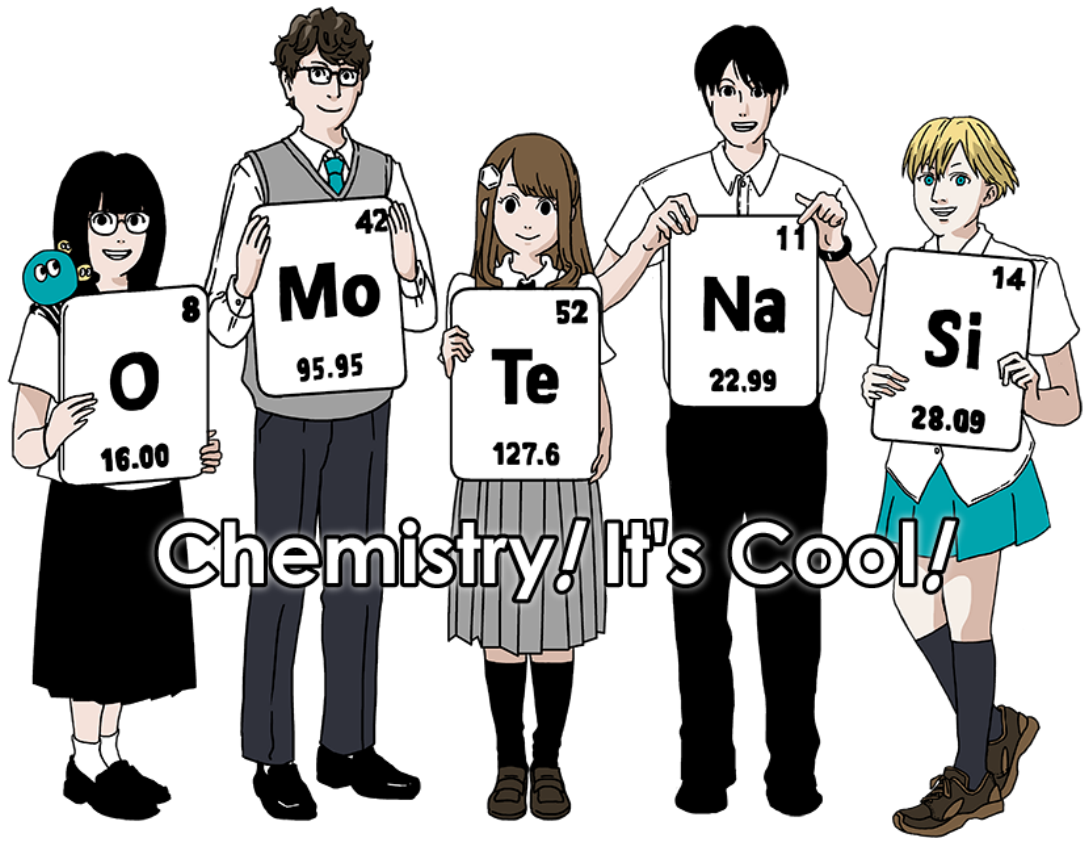
Bulgarian (Bulgaria)

**Международна олимпиада по химия 2021 Япония**

**53та MOX2021 Япония**

**25 юли – 2 август, 2021**

**https://www.icho2021.org**



## Общи указания

- Можете да използвате само химикалка, за да записвате отговорите.
- Вашият калкулатор трябва да бъде непрограмируем.
- Изпитът съдържа **9 задачи**.
- Можете да решавате задачите в произволен ред.
- Разполагате с **5 часа,** за да решите всички задачи.
- Можете да **започнете** работа, само след като е дадена командата **СТАРТ**.
- Всички резултати трябва да бъдат написани с химикал в съответните полета за отговори на **answer sheets**. Използвайте гърба на листовете с въпросите, ако имате нужда от чернова. Не забравяйте, че отговорите, написани извън полетата за отговори, няма да бъдат оценявани.
- Напишете вашите изчисления в предоставените полета, когато е необходимо. Ще получите пълен брой точки за правилен отговор, само когато вашите изчисления са написани.
- Квесторът ще Ви уведомеди, когато останат **30-минути** до командата **STOP**.
- Вие **трябва да спрете** работа, когато е дадена командата **СТОП**. Отказът да спрете работа, ще доведе до анулиране на Вашия изпит.
- Официалната версия на английски език ще Ви бъде предостаена при поискване само за до-изясняване.
- Нямате право да напускате работното си място без разрешение. Ако имате нужда от някаква помощ (повреден калкулатор, необходимост да посетите тоалетната и т.н.), вдигнете ръка и изчакайте, докато пристигне квесторът.

**УСПЕХ!**

## Задачи и информация за оценяването

| | Заглавие | Общ брой точки | Процент |
|---|---|---|---|
| **1** | Водород на метална повърхност | **24** | **11** |
| **2** | Изотопна капсула за време | **35** | **11** |
| **3** | Закон на Lambert–Beer? | **22** | **8** |
| **4** | Редокс химия на цинк | **32** | **11** |
| **5** | Загадъчният силиций | **60** | **12** |
| **6** | Химия на твърдото състояние на преходни метали | **45** | **13** |
| **7** | Игра с небензоидна ароматност | **36** | **13** |
| **8** | Динамични молекули и тяхната хиралност | **26** | **11** |
| **9** | Харесване и нехаресване на капсули | **23** | **10** |
| | | **Общо** | **100** |

## Физични константи и уравнения

### Константи

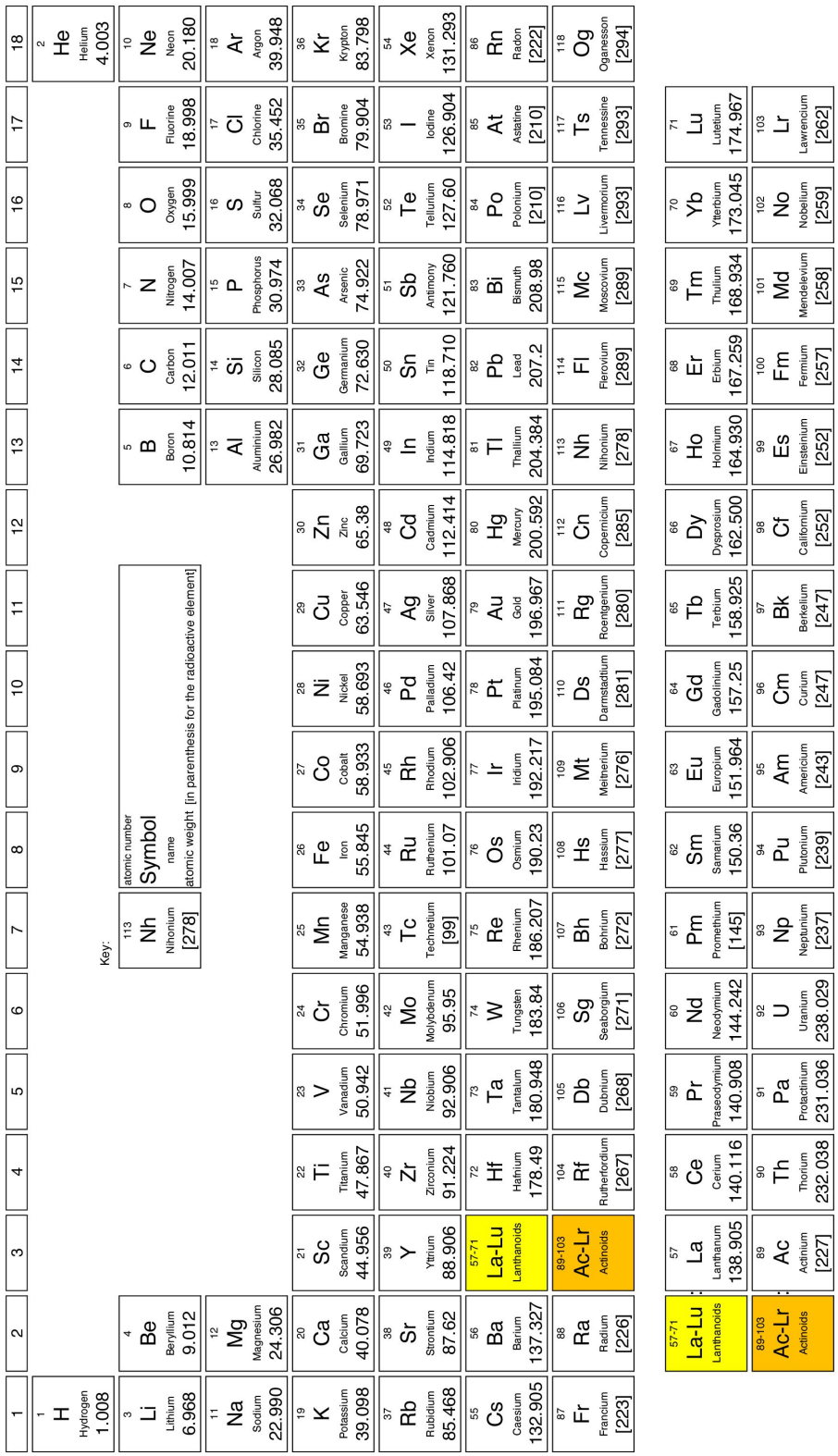
| | |
|---|---|
| Speed of light in vacuum | $c = 2.99792458 \times 10^{8}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ |
| Planck constant | $h = 6.62607015 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\ s}$ |
| Elementary charge | $e = 1.602176634 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$ |
| Electron mass | $m_{\mathrm{e}} = 9.10938370 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$ |
| Electric constant (permittivity of vacuum) | $\varepsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12}\ \mathrm{F\ m^{-1}}$ |
| Avogadro constant | $N_{\mathrm{A}} = 6.02214076 \times 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$ |
| Boltzmann constant | $k_{\mathrm{B}} = 1.380649 \times 10^{-23}\ \mathrm{J\ K^{-1}}$ |
| Faraday constant | $F = N_{\mathrm{A}} \times e = 9.64853321233100184 \times 10^{4}\ \mathrm{C\ mol^{-1}}$ |
| Gas constant | $R = N_{\mathrm{A}} \times k_{\mathrm{B}} = 8.31446261815324\ \mathrm{J\ K^{-1}\ mol^{-1}}$ $= 8.2057366081 \times 10^{-2}\ \mathrm{L\ atm\ K^{-1}\ mol^{-1}}$ |
| Unified atomic mass unit | $u = 1\ \mathrm{Da} = 1.66053907 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$ |
| Standard pressure | $p = 1\ \mathrm{bar} = 10^{5}\ \mathrm{Pa}$ |
| Atmospheric pressure | $p_{\mathrm{atm}} = 1.01325 \times 10^{5}\ \mathrm{Pa}$ |
| Zero degree Celsius | $0\ ^{\circ}\mathrm{C} = 273.15\ \mathrm{K}$ |
| Ångstrom | $1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \mathrm{m}$ |
| Picometer | $1\ \mathrm{pm} = 10^{-12}\ \mathrm{m}$ |
| Electronvolt | $1\ \mathrm{eV} = 1.602176634 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$ |
| Part-per-million | $1\ \mathrm{ppm} = 10^{-6}$ |
| Part-per-billion | $1\ \mathrm{ppb} = 10^{-9}$ |
| Part-per-trillion | $1\ \mathrm{ppt} = 10^{-12}$ |
| pi | $\pi = 3.141592653589793$ |
| The base of the natural logarithm (Euler's number) | $e = 2.718281828459045$ |

**Уравнения**

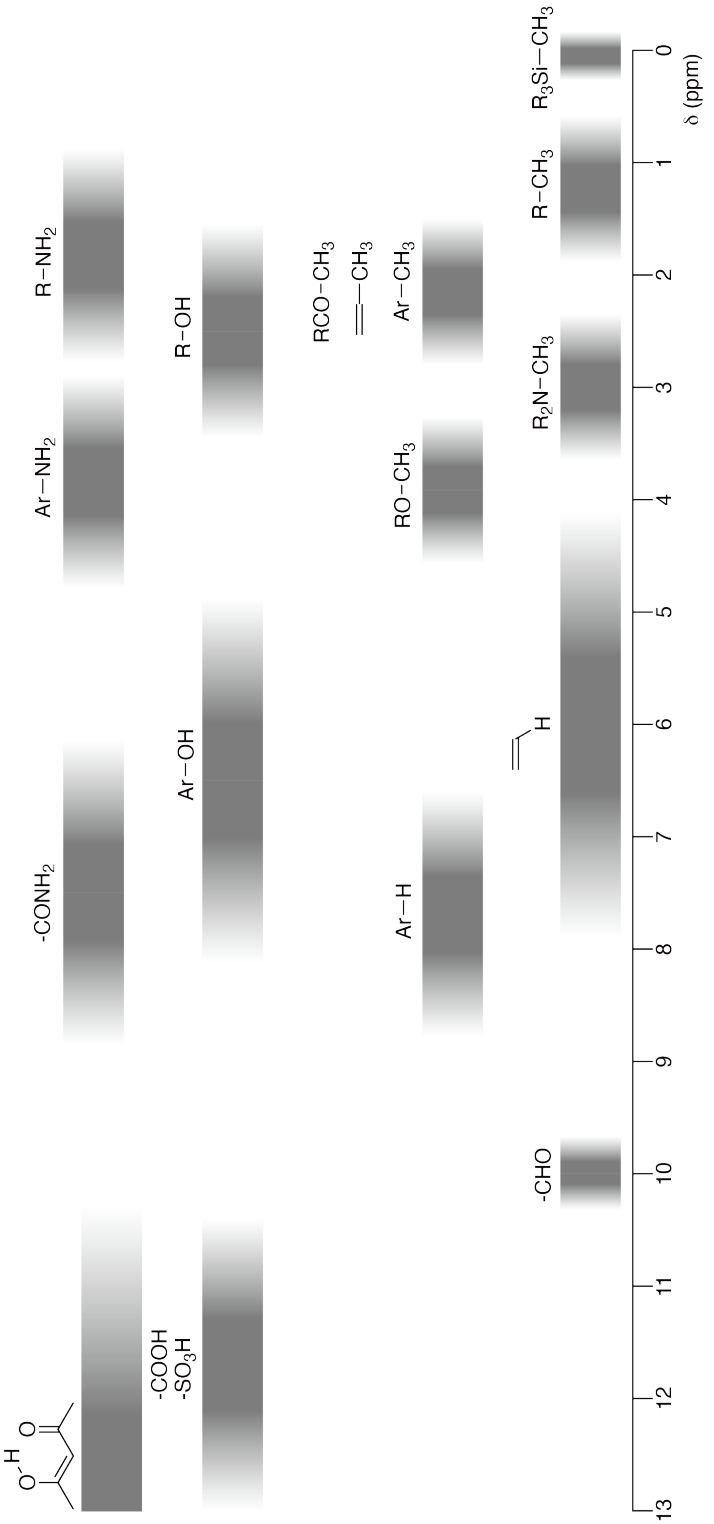
| | |
|---|---|
| The ideal gas law | $PV = nRT$<br>, where $P$ is the pressure, $V$ is the volume, $n$ is the amount of substance, $T$ is the absolute temperature of ideal gas. |
| Coulomb's law | $F = k_\mathrm{e}\frac{q_1 q_2}{r^2}$<br>, where $F$ is the electrostatic force, $k_\mathrm{e} (\simeq 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\,m^2\,C^{-2}})$ is Coulomb's constant, $q_1$ and $q_2$ are the magnitudes of the charges, and $r$ is the distance between the charges. |
| The first law of thermodynamics | $\Delta U = q + w$<br>, where $\Delta U$ is the change in the internal energy, $q$ is the heat supplied, $w$ is the work done. |
| Enthalpy $H$ | $H = U + PV$ |
| Entropy based on Boltzmann's principle $S$ | $S = k_\mathrm{B} \ln W$<br>, where $W$ is the number of microstates. |
| The change of entropy $\Delta S$ | $\Delta S = \frac{q_\mathrm{rev}}{T}$<br>, where $q_\mathrm{rev}$ is the heat for the reversible process. |
| Gibbs free energy $G$ | $G = H - TS$<br>$\Delta_\mathrm{r} G^\circ = -RT \ln K = -zFE^\circ$<br>, where $K$ is the equilibrium constant, $z$ is the number of electrons, $E^\circ$ is the standard electrode potential. |
| Reaction quotient $Q$ | $\Delta_\mathrm{r} G = \Delta_\mathrm{r} G^\circ + RT \ln Q$<br>For a reaction<br>$a\mathrm{A} + b\mathrm{B} \rightleftharpoons c\mathrm{C} + d\mathrm{D}$<br>$Q = \frac{[\mathrm{C}]^c [\mathrm{D}]^d}{[\mathrm{A}]^a [\mathrm{B}]^b}$<br>, where $[\mathrm{A}]$ is the concentration of A. |

| | |
|---|---|
| Heat change $\Delta q$ | $\Delta q = nc_{\mathrm{m}}\Delta T$<br>, where $c_{\mathrm{m}}$ is the temperature-independent molar heat capacity. |
| Nernst equation for redox reaction | $E = E^{\circ} + \frac{RT}{zF}\ln\frac{C_{\mathrm{ox}}}{C_{\mathrm{red}}}$<br>, where $C_{\mathrm{ox}}$ is the concentration of oxidized substance, $C_{\mathrm{red}}$ is the concentration of reduced substance. |
| Arrhenius equation | $k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$<br>, where $k$ is the rate constant, $A$ is the pre-exponential factor, $E_a$ is the activation energy.<br>$\exp(x) = e^x$ |
| Lambert–Beer equation | $A = \varepsilon l c$<br>, where $A$ is the absorbance, $\varepsilon$ is the molar absorption coefficient, $l$ is the optical path length, $c$ is the concentration of the solution. |
| Henderson–Hasselbalch equation | For an equilibrium<br>$\mathrm{HA} \rightleftharpoons \mathrm{H^+} + \mathrm{A^-}$<br>, where equilibrium constant is $K_{\mathrm{a}}$,<br>$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_{\mathrm{a}} + \log\left(\frac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}\right)$ |
| Energy of a photon | $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$<br>, where $\nu$ is the frequency, $\lambda$ is the wavelength of the light. |
| The sum of a geometric series | When $x \neq 1$,<br>$1 + x + x^2 + \cdots + x^n = \sum_{i=0}^{n} x^i = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}$ |
| Approximation equation that can be used to solve problems | When $x \ll 1$,<br>$\frac{1}{1-x} \simeq 1 + x$ |

## Периодична таблица



## $^1$H ЯМР Химични отмествания



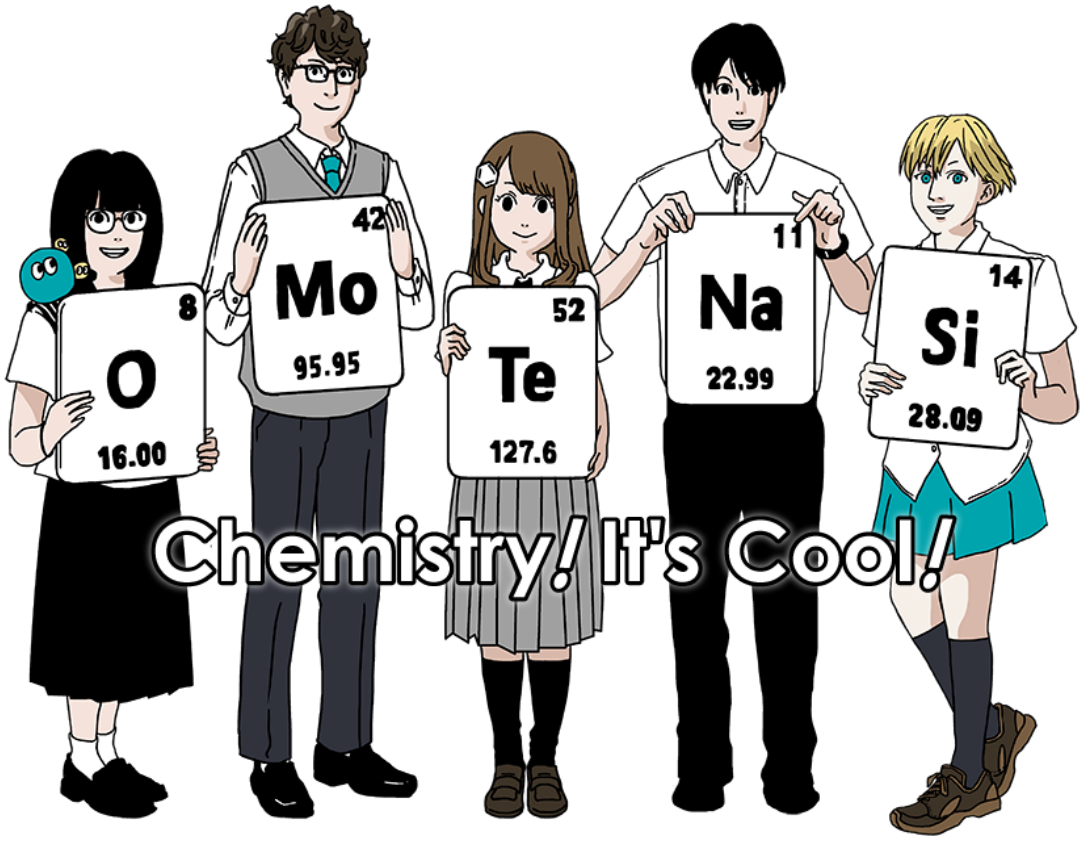

$\Delta\delta$ for one alkyl group-substitution: *ca.* +0.4 ppm

**International Chemistry Olympiad 2021 Japan**

**53rd IChO2021 Japan**

**25th July – 2nd August, 2021**

**https://www.icho2021.org**



## General Instruction

- You are allowed to use only pen to write the answer.
- Your calculator must be non-programmable.
- This examination has **9 problems**.
- You can solve the problems in any order.
- You will have **5 hours** to solve all problems.
- You can **begin** working only after the **START** command is given.
- All results must be written in the appropriate answer boxes with pen on the **answer sheets**. Use the back of the question sheets if you need scratch paper. Remember that answers written outside the answer boxes will not be graded.
- Write relevant calculations in the appropriate boxes when necessary. Full marks will be given for correct answers only when your work is shown.
- The invigilator will announce a **30-minute** warning before the **STOP** command.
- You **must stop** working when the **STOP** command is given. Failure to stop writing will lead to the nullification of your examination.
- The official English version of this examination is available on request only for clarification.
- You are not allowed to leave your working place without permission. If you need any assistance (broken calculator, need to visit a restroom, etc), raise your hand and wait until an invigilator arrives.

**GOOD LUCK!**

## Problems and Grading Information

| | Title | Total Score | Percentage |
|---|---|---|---|
| **1** | Hydrogen at a Metal Surface | **24** | **11** |
| **2** | Isotope Time Capsule | **35** | **11** |
| **3** | Lambert–Beer Law? | **22** | **8** |
| **4** | The Redox Chemistry of Zinc | **32** | **11** |
| **5** | Mysterious Silicon | **60** | **12** |
| **6** | The Solid-State Chemistry of Transition Metals | **45** | **13** |
| **7** | Playing with Non-benzenoid Aromaticity | **36** | **13** |
| **8** | Dynamic Organic Molecules and Their Chirality | **26** | **11** |
| **9** | Likes and Dislikes of Capsules | **23** | **10** |
| | | **Total** | **100** |

## Physical Constants and Equations

### Constants

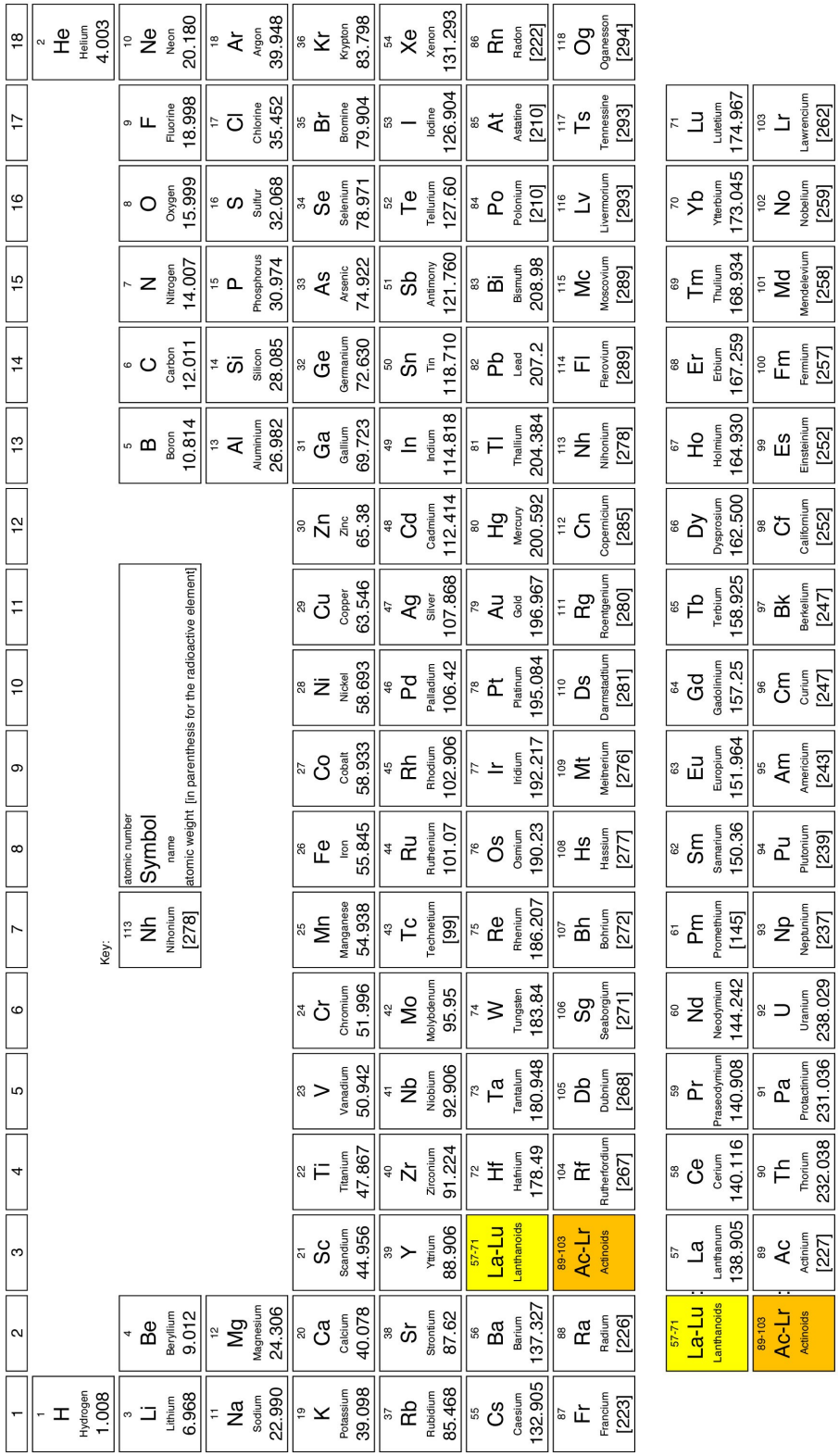
| | |
|---|---|
| Speed of light in vacuum | $c = 2.99792458 \times 10^{8}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ |
| Planck constant | $h = 6.62607015 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\ s}$ |
| Elementary charge | $e = 1.602176634 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$ |
| Electron mass | $m_{\mathrm{e}} = 9.10938370 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$ |
| Electric constant (permittivity of vacuum) | $\varepsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12}\ \mathrm{F\ m^{-1}}$ |
| Avogadro constant | $N_{\mathrm{A}} = 6.02214076 \times 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$ |
| Boltzmann constant | $k_{\mathrm{B}} = 1.380649 \times 10^{-23}\ \mathrm{J\ K^{-1}}$ |
| Faraday constant | $F = N_{\mathrm{A}} \times e = 9.64853321233100184 \times 10^{4}\ \mathrm{C\ mol^{-1}}$ |
| Gas constant | $R = N_{\mathrm{A}} \times k_{\mathrm{B}} = 8.31446261815324\ \mathrm{J\ K^{-1}\ mol^{-1}}$ $= 8.2057366081 \times 10^{-2}\ \mathrm{L\ atm\ K^{-1}\ mol^{-1}}$ |
| Unified atomic mass unit | $u = 1\ \mathrm{Da} = 1.66053907 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$ |
| Standard pressure | $p = 1\ \mathrm{bar} = 10^{5}\ \mathrm{Pa}$ |
| Atmospheric pressure | $p_{\mathrm{atm}} = 1.01325 \times 10^{5}\ \mathrm{Pa}$ |
| Zero degree Celsius | $0\ ^{\circ}\mathrm{C} = 273.15\ \mathrm{K}$ |
| Ångstrom | $1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \mathrm{m}$ |
| Picometer | $1\ \mathrm{pm} = 10^{-12}\ \mathrm{m}$ |
| Electronvolt | $1\ \mathrm{eV} = 1.602176634 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$ |
| Part-per-million | $1\ \mathrm{ppm} = 10^{-6}$ |
| Part-per-billion | $1\ \mathrm{ppb} = 10^{-9}$ |
| Part-per-trillion | $1\ \mathrm{ppt} = 10^{-12}$ |
| pi | $\pi = 3.141592653589793$ |
| The base of the natural logarithm (Euler's number) | $e = 2.718281828459045$ |

**Equations**

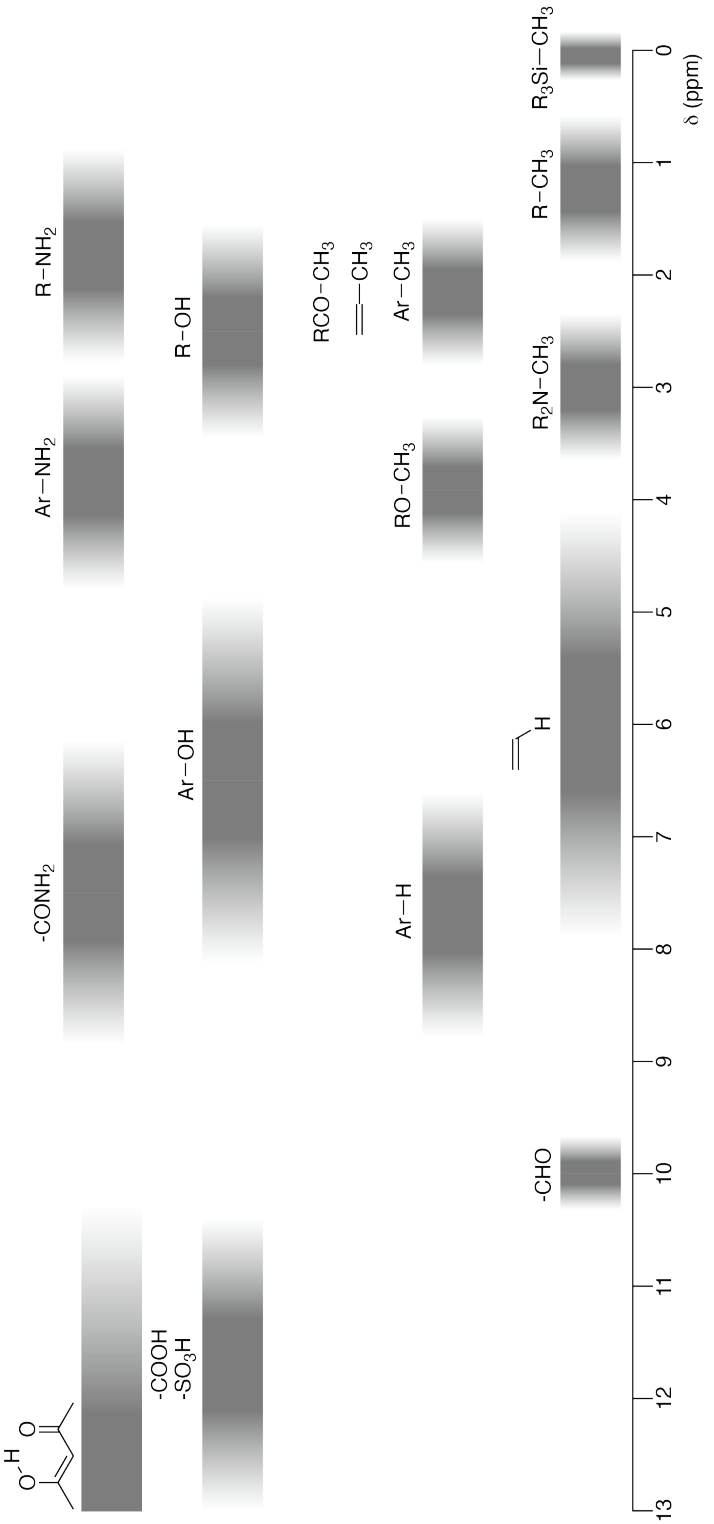
| | |
|---|---|
| The ideal gas law | $PV = nRT$<br>, where $P$ is the pressure, $V$ is the volume, $n$ is the amount of substance, $T$ is the absolute temperature of ideal gas. |
| Coulomb's law | $F = k_\mathrm{e}\frac{q_1 q_2}{r^2}$<br>, where $F$ is the electrostatic force, $k_\mathrm{e} (\simeq 9.0 \times 10^9\ \mathrm{N\,m^2\,C^{-2}})$ is Coulomb's constant, $q_1$ and $q_2$ are the magnitudes of the charges, and $r$ is the distance between the charges. |
| The first law of thermodynamics | $\Delta U = q + w$<br>, where $\Delta U$ is the change in the internal energy, $q$ is the heat supplied, $w$ is the work done. |
| Enthalpy $H$ | $H = U + PV$ |
| Entropy based on Boltzmann's principle $S$ | $S = k_\mathrm{B} \ln W$<br>, where $W$ is the number of microstates. |
| The change of entropy $\Delta S$ | $\Delta S = \frac{q_\mathrm{rev}}{T}$<br>, where $q_\mathrm{rev}$ is the heat for the reversible process. |
| Gibbs free energy $G$ | $G = H - TS$<br>$\Delta_\mathrm{r} G^\circ = -RT \ln K = -zFE^\circ$<br>, where $K$ is the equilibrium constant, $z$ is the number of electrons, $E^\circ$ is the standard electrode potential. |
| Reaction quotient $Q$ | $\Delta_\mathrm{r} G = \Delta_\mathrm{r} G^\circ + RT \ln Q$<br>For a reaction<br>$a\mathrm{A} + b\mathrm{B} \rightleftharpoons c\mathrm{C} + d\mathrm{D}$<br>$Q = \frac{[\mathrm{C}]^c [\mathrm{D}]^d}{[\mathrm{A}]^a [\mathrm{B}]^b}$<br>, where $[\mathrm{A}]$ is the concentration of A. |

| | |
|---|---|
| Heat change $\Delta q$ | $\Delta q = nc_{\mathrm{m}}\Delta T$<br>, where $c_{\mathrm{m}}$ is the temperature-independent molar heat capacity. |
| Nernst equation for redox reaction | $E = E^{\circ} + \dfrac{RT}{zF}\ln\dfrac{C_{\mathrm{ox}}}{C_{\mathrm{red}}}$<br>, where $C_{\mathrm{ox}}$ is the concentration of oxidized substance, $C_{\mathrm{red}}$ is the concentration of reduced substance. |
| Arrhenius equation | $k = A\exp\left(-\dfrac{E_a}{RT}\right)$<br>, where $k$ is the rate constant, $A$ is the pre-exponential factor, $E_a$ is the activation energy.<br>$\exp(x) = e^x$ |
| Lambert–Beer equation | $A = \varepsilon l c$<br>, where $A$ is the absorbance, $\varepsilon$ is the molar absorption coefficient, $l$ is the optical path length, $c$ is the concentration of the solution. |
| Henderson–Hasselbalch equation | For an equilibrium<br>$\mathrm{HA} \rightleftharpoons \mathrm{H^+} + \mathrm{A^-}$<br>, where equilibrium constant is $K_{\mathrm{a}}$,<br>$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_{\mathrm{a}} + \log\left(\dfrac{[\mathrm{A^-}]}{[\mathrm{HA}]}\right)$ |
| Energy of a photon | $E = h\nu = h\dfrac{c}{\lambda}$<br>, where $\nu$ is the frequency, $\lambda$ is the wavelength of the light. |
| The sum of a geometric series | When $x \neq 1$,<br>$1 + x + x^2 + \cdots + x^n = \sum_{i=0}^{n} x^i = \dfrac{1 - x^{n+1}}{1 - x}$ |
| Approximation equation that can be used to solve problems | When $x \ll 1$,<br>$\dfrac{1}{1-x} \simeq 1 + x$ |

## Periodic Table



## $^1$H NMR Chemical Shifts




$\Delta\delta$ for one alkyl group-substitution: *ca.* +0.4 ppm

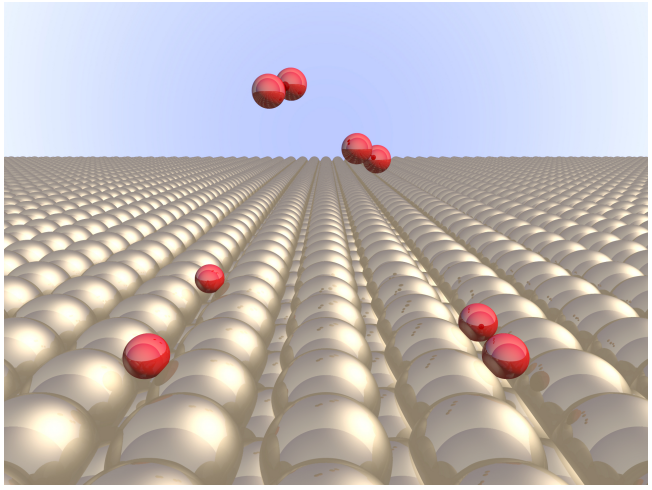
**BGR-1 C-1 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 1
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Водород на метална повърхност

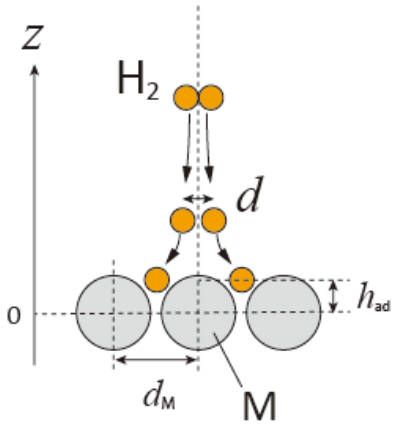
| 11 % от общия брой точки | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | **Общо** |
| Точки | 6 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | **24** |
| Резултат | | | | | | | |



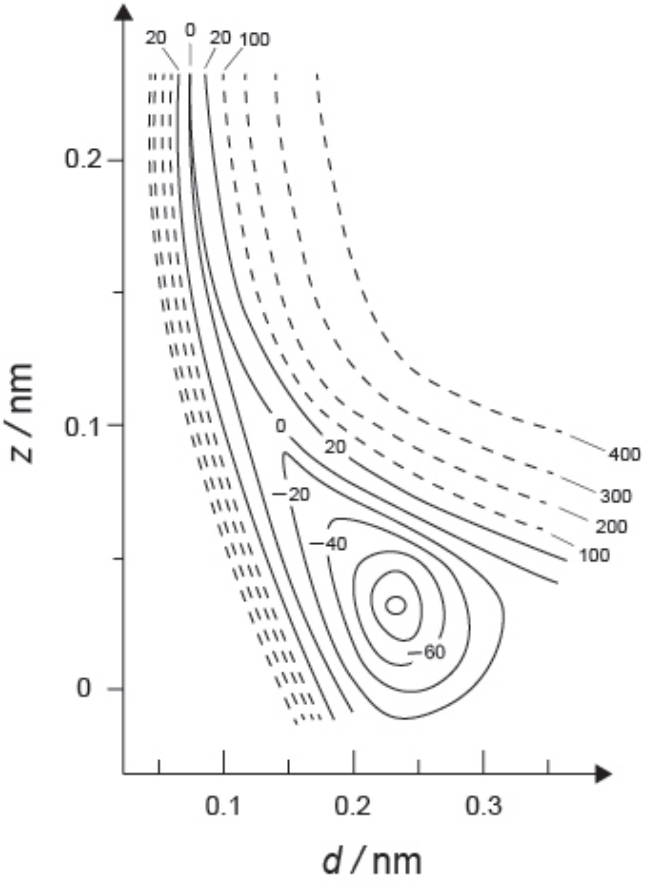
Очаква се водородът да бъде бъдещ енергиен източник, който не зависи от изкопаемите горива. Тук ще разгледаме процеса на съхранение на водород в метал, който е свързан с технологията за транспорт и съхранение на водород.

## Част А

Тъй като водородът се абсорбира в обема на метала през повърхността му, нека първо да разгледаме процеса на адсорбция на водород на металната повърхност, $H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$, където газообразните и адсорбираните състояния на водорода са представени съответно като (g) и (ad). Водородните молекули ($H_2$), които достигат металната повърхност (M), се дисоциират на повърхността и се адсорбират като H атоми (Фиг. 1). Тук потенциалната енергия на $H_2$ се представя от две променливи: междуатомното разстояние, $d$, и височината спрямо повърхностния метален атом, $z$. Предполага се, че оста, свързваща двата H-атома, е успоредна на повърхността, и че центърът на тежестта винаги е на вертикалната пунктирана линия на Фиг. 1. Фиг. 2 показва контурна схема на потенциалната енергия за дисоциацията на повърхността. Числените стойности представляват потенциалната енергия в kJ за мол $H_2$. Разстоянието между плътните линии е 20 kJ mol$^{-1}$, разстоянието между пунктирани линии е 100 kJ mol$^{-1}$, и разстоянието между плътна и пунктирана линии е 80 kJ mol$^{-1}$. Нулевата вибрационна енергия се игнорира.




Фиг.1 Дефиниция на променливите величини. Чертежът не е в мащаб.




Фиг.2

**A.1** За всяка от следните величини (i)–(iii), **изберете** най-близката стойност от A–G. 6pt

(i) Междуатомното разстояние за газообразна $H_2$ молекула
(ii) Междуатомното разстояние между металните атоми ($d_M$ във Фиг. 1)
(iii) Разстоянието на адсорбираните H атоми от повърхността ($h_{ad}$ във Фиг. 1)

| | | | |
|---|---|---|---|
| A. 0.03 nm | B. 0.07 nm | C. 0.11 nm | D. 0.15 nm |
| E. 0.19 nm | F. 0.23 nm | G. 0.27 nm | |

**A.2** За всяка от следните величини (i)–(ii), **изберете** най-близката стойност от A–H. 4pt

(i) енергията, необходима за дисоциацията на газообразен $H_2$ до газообразен H
[$H_2(g) \rightarrow 2H(g)$]
(ii) енергията, отделена при адсорбцията на газообразен $H_2$ [$H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$]

| | | | |
|---|---|---|---|
| A. 20 kJ mol$^{-1}$ | B. 40 kJ mol$^{-1}$ | C. 60 kJ mol$^{-1}$ | D. 100 kJ mol$^{-1}$ |
| E. 150 kJ mol$^{-1}$ | F. 200 kJ mol$^{-1}$ | G. 300 kJ mol$^{-1}$ | H. 400 kJ mol$^{-1}$ |

## Част B

След това адсорбираните водородни атоми или се абсорбират в обема, или се рекомбинират и десорбират обратно в газовата фаза, както е показано в реакциите (1a) и (1b). H(ab) представлява водороден атом, абсорбиран в обема.

$$\mathrm{H_2(g)} \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} 2\mathrm{H(ad)} \tag{1a}$$

$$\mathrm{H(ad)} \xrightarrow{k_3} \mathrm{H(ab)} \tag{1b}$$

Реакционните скорости на адсорбция, десорбция и абсорбция за повърхностно място са съответно $r_1[\mathrm{s}^{-1}], r_2[\mathrm{s}^{-1}]$ и $r_3[\mathrm{s}^{-1}]$. Те се изразяват като:

$$r_1 = k_1 P_{\mathrm{H_2}} (1-\theta)^2 \tag{2}$$

$$r_2 = k_2 \theta^2 \tag{3}$$

$$r_3 = k_3 \theta \tag{4}$$

където $k_1\,[\mathrm{s}^{-1}\,\mathrm{Pa}^{-1}], k_2\,[\mathrm{s}^{-1}]$ и $k_3\,[\mathrm{s}^{-1}]$ са реакционните скоростни константи и $P_{\mathrm{H_2}}$ е налягането на $\mathrm{H_2}$. Сред наличните места на повърхността, $\theta$ ($0 \leq \theta \leq 1$) е частта, заета от H атоми. Предполага се, че адсорбцията и десорбцията са бързи в сравнение с абсорбцията ($r_1, r_2 \gg r_3$) и че $\theta$ остава постоянна.

**B.1** $r_3$ може да се изрази като: 5pt

$$r_3 = \frac{k_3}{1 + \sqrt{\dfrac{1}{P_{\mathrm{H_2}} C}}} \tag{5}$$

**Изразете** $C$ като използвате $k_1$ и $k_2$.

# Q1-5

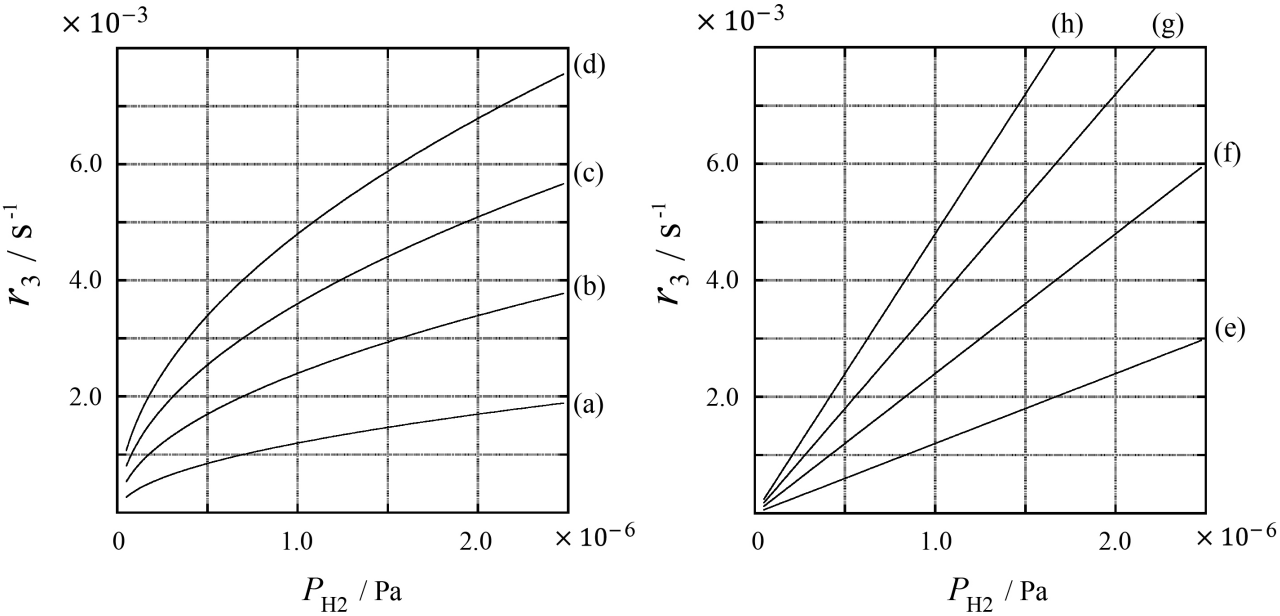
Bulgarian (Bulgaria)

Метална проба с повърхностна площ $S = 1.0 \times 10^{-3}$ m$^2$ е поставена в контейнер (1L = $1.0 \times 10^{-3}$ m$^3$) с $H_2$ ($P_{H_2} = 1.0 \times 10^2$ Pa ). Плътността на местата за адсорбция на водородни атоми на повърхността е $N = 1.3 \times 10^{18}$ m$^{-2}$. Температурата на повърхността се поддържа $T = 400$ K. С протичането на реакцията (1), $P_{H_2}$ намалява с постоянна скорост $v = 4.0 \times 10^{-4}$ Pa s$^{-1}$. Приемете, че $H_2$ е идеален газ и че обемът на металната проба е незначителен.

**B.2** **Изчислете** количеството H атоми в молове, абсорбирани за единица площ на повърхността за единица време, $A$ [mol s$^{-1}$ m$^{-2}$]. 3pt

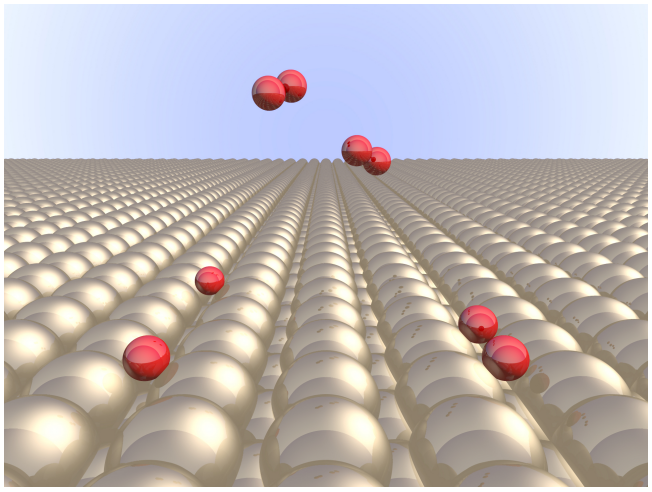
**B.3** При $T = 400$ K, $C$ е равно на $1.0 \times 10^2$ Pa$^{-1}$. **Изчислете** стойността на $k_3$ при 400 K. Ако не сте получили отговора на **B.2**, използвайте $A = 3.6 \times 10^{-7}$ mol s$^{-1}$ m$^{-2}$. 3pt

**B.4** При различна $T$, са дадени $C = 2.5 \times 10^3$ Pa$^{-1}$ и $k_3 = 4.8 \times 10^{-2}$ s$^{-1}$ . За $r_3$ като функция от $P_{H_2}$ при тази температура, **изберете** правилната графика от (a)–(h). 3pt



# Hydrogen at a Metal Surface

| 11 % of the total | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | **Total** |
| Points | 6 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | **24** |
| Score | | | | | | | |



Hydrogen is expected to be a future energy source that does not depend on fossil fuels. Here, we will consider the hydrogen-storage process in a metal, which is related to hydrogen-transport and -storage technology.

## Part A

As hydrogen is absorbed into the bulk of a metal via its surface, let us first consider the adsorption process of hydrogen at the metal surface, $H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$, where the gaseous and adsorbed states of hydrogen are represented as (g) and (ad), respectively. Hydrogen molecules ($H_2$) that reach the metal surface (M) dissociate at the surface and are adsorbed as H atoms (Fig. 1). Here, the potential energy of $H_2$ is represented by two variables: the interatomic distance, $d$, and the height relative to the surface metal atom, $z$. It is assumed that the axis along the two H atoms is parallel to the surface and that the center of gravity is always on the vertical dotted line in Fig. 1. Fig. 2 shows the potential energy contour plot for the dissociation at the surface. The numerical values represent the potential energy in units of kJ per mole of $H_2$. The solid line spacing is 20 kJ mol$^{-1}$, the dashed line spacing is 100 kJ mol$^{-1}$, and the spacing between solid and dashed lines is 80 kJ mol$^{-1}$. The zero-point vibration energy is ignored.

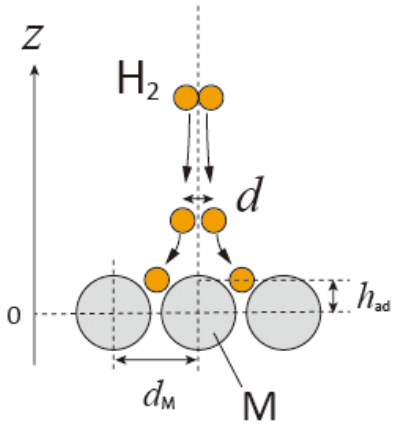



Fig.1 Definition of variables. Drawing is not in scale.

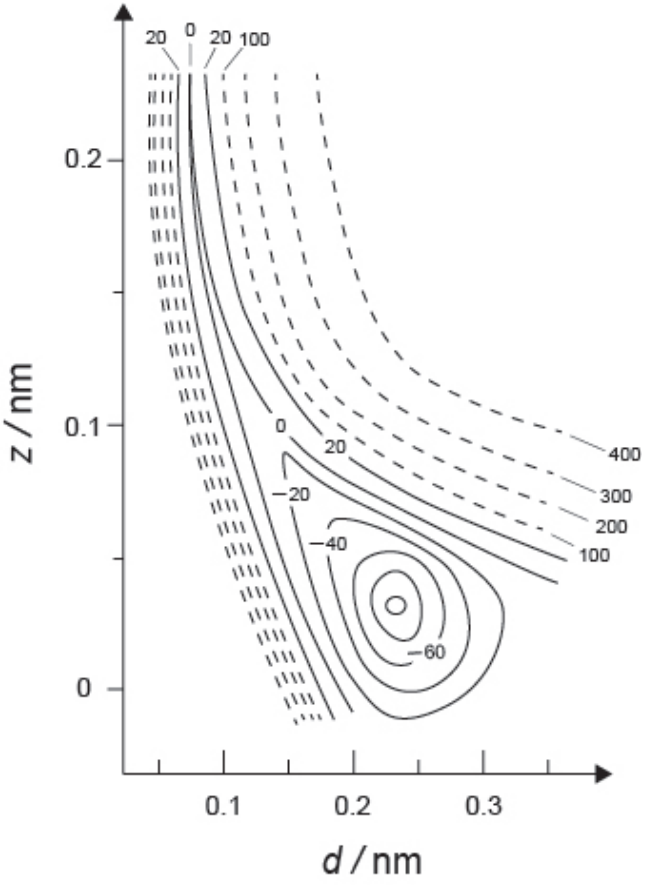



Fig.2

**A.1** For each of the following items (i)–(iii), **select** the closest value from A–G. 6pt

(i) The interatomic distance for a gaseous $H_2$ molecule
(ii) The interatomic distance between metal atoms ($d_M$ in Fig. 1)
(iii) The distance of adsorbed H atoms from the surface ($h_{ad}$ in Fig. 1)

| | | | |
|---|---|---|---|
| A. 0.03 nm | B. 0.07 nm | C. 0.11 nm | D. 0.15 nm |
| E. 0.19 nm | F. 0.23 nm | G. 0.27 nm | |

**A.2** For each of the following items (i)–(ii), **select** the closest value from A–H. 4pt

(i) the energy required for the dissociation of gaseous $H_2$ to gaseous H [$H_2(g) \rightarrow 2H(g)$]
(ii) the energy released during the adsorption of a gaseous $H_2$ [$H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$]

| | | | |
|---|---|---|---|
| A. 20 kJ mol$^{-1}$ | B. 40 kJ mol$^{-1}$ | C. 60 kJ mol$^{-1}$ | D. 100 kJ mol$^{-1}$ |
| E. 150 kJ mol$^{-1}$ | F. 200 kJ mol$^{-1}$ | G. 300 kJ mol$^{-1}$ | H. 400 kJ mol$^{-1}$ |

## Part B

The adsorbed hydrogen atoms are then either absorbed into the bulk, or recombine and desorb back into the gas phase, as shown in the reactions (1a) and (1b). H(ab) represents a hydrogen atom absorbed in the bulk.

$$\mathrm{H_2(g)} \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} \mathrm{2H(ad)} \tag{1a}$$

$$\mathrm{H(ad)} \xrightarrow{k_3} \mathrm{H(ab)} \tag{1b}$$

The reaction rates per surface site for adsorption, desorption, and absorption are $r_1[\mathrm{s}^{-1}], r_2[\mathrm{s}^{-1}]$ and $r_3[\mathrm{s}^{-1}]$ , respectively. They are expressed as:

$$r_1 = k_1 P_{\mathrm{H_2}} (1-\theta)^2 \tag{2}$$

$$r_2 = k_2 \theta^2 \tag{3}$$

$$r_3 = k_3 \theta \tag{4}$$

where $k_1\,[\mathrm{s}^{-1}\,\mathrm{Pa}^{-1}], k_2\,[\mathrm{s}^{-1}]$ and $k_3\,[\mathrm{s}^{-1}]$ are the reaction rate constants and $P_{\mathrm{H_2}}$ is the pressure of $\mathrm{H_2}$. Among the sites available on the surface, $\theta$ ($0 \leq \theta \leq 1$) is the fraction occupied by H atoms. It is assumed that adsorption and desorption are fast compared to absorption ($r_1, r_2 \gg r_3$) and that $\theta$ remains constant.

**B.1** $r_3$ can be expressed as: 5pt

$$r_3 = \frac{k_3}{1 + \sqrt{\dfrac{1}{P_{\mathrm{H_2}} C}}} \tag{5}$$

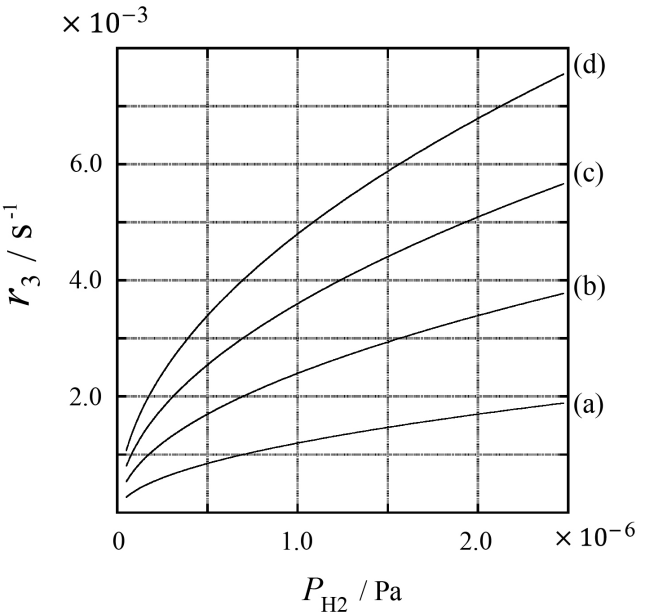
**Express** $C$ using $k_1$ and $k_2$.

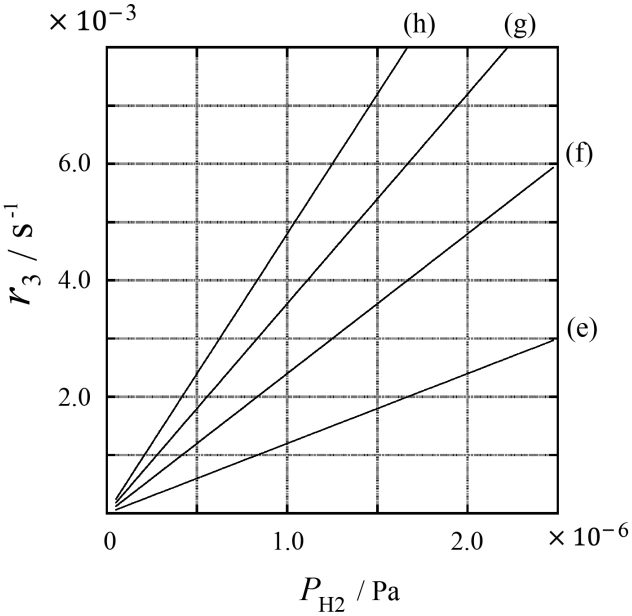
A metal sample with a surface area of $S = 1.0 \times 10^{-3}$ m$^2$ was placed in a container (1L = $1.0 \times 10^{-3}$ m$^3$) with $H_2$ ($P_{H_2} = 1.0 \times 10^2$ Pa ). The density of hydrogen-atom adsorption sites on the surface was $N = 1.3 \times 10^{18}$ m$^{-2}$. The surface temperature was kept at $T = 400$ K. As the reaction (1) proceeded, $P_{H_2}$ decreased at a constant rate of $v = 4.0 \times 10^{-4}$ Pa s$^{-1}$. Assume that $H_2$ is an ideal gas and that the volume of the metal sample is negligible.

**B.2** **Calculate** the amount of H atoms in moles absorbed per unit area of the surface per unit time, $A$ [mol s$^{-1}$ m$^{-2}$]. 3pt

**B.3** At $T = 400$ K, $C$ equals $1.0 \times 10^2$ Pa$^{-1}$. **Calculate** the value of $k_3$ at 400 K. If you did not obtain the answer to **B.2**, use $A = 3.6 \times 10^{-7}$ mol s$^{-1}$ m$^{-2}$. 3pt

**B.4** At a different $T$, $C = 2.5 \times 10^3$ Pa$^{-1}$ and $k_3 = 4.8 \times 10^{-2}$ s$^{-1}$ are given. For $r_3$ as a function of $P_{H_2}$ at this temperature, **select** the correct plot from (a)–(h). 3pt



# Водород на метална повърхност

## Част А

**A.1** (6 pt)

| (i) | (ii) | (iii) |
|---|---|---|
| | | |

**A.2** (4 pt)

| (i) | (ii) |
|---|---|
| | |

## Част B

**B.1** (5 pt)

$C =$ _____

**B.2** (3 pt)

$A =$ _____ $\text{mol s}^{-1}\,\text{m}^{-2}$

**B.3** (3 pt)

$k_3 =$ _____ $s^{-1}$

**B.4** (3 pt)

_____

BGR-1 C-2 C-1

**BGR-1 C-2 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 2
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Изотопна капсула за време

| 11 % от общия брой точки | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | **Общо** |
| Точки | 8 | 8 | 10 | 9 | **35** |
| Резултат | | | | | |



Молекулни образувания, които се различават само по изотопен състав, като напр. $CH_4$ и $CH_3D$, се наричат изотополози. Счита се, че изотополозите имат едни и същи химични характеристики. В природата обаче има малка разлика.

Да приемем, че всички вещества в този въпрос са в газова фаза.

Нека разгледаме следното равновесие:

$$^{12}C^{16}O_2 + {}^{12}C^{18}O_2 \rightleftharpoons 2\,{}^{12}C^{16}O^{18}O \qquad K = \frac{[{}^{12}C^{16}O^{18}O]^2}{[{}^{12}C^{16}O_2][{}^{12}C^{18}O_2]} \tag{1}$$

Ентропията, $S$, нараства с увеличаване на броя на възможните микросъстояния на системата, $W$:

$$S = k_B \ln W \tag{2}$$

$W = 1$ за $^{12}C^{16}O_2$ и $^{12}C^{18}O_2$. За разлика от тях, $W = 2$ за молекула $^{12}C^{16}O^{18}O$, защото кислородните атоми се различават в тази молекула. Понеже в дясната страна на равновесието, показано в ур. 1, има две молекули $^{12}C^{16}O^{18}O$ , $W = 2^2 = 4$.

**A.1** Изменението на енталпията, $\Delta H$, на ур. 3 е положително, независимо от температурата. 8pt

$$H_2 + DI \rightleftharpoons HD + HI \quad (3)$$

**Изчислете** стойностите на равновесната константа, $K$,за ур. 3 при много ниска ($T \rightarrow 0$) и много висока ($T \rightarrow +\infty$) температури. Приемете, че реакцията остава непроменена при тези температури и че $\Delta H$ клони към постоянна стойност за високи температури.

Δ*H* на следния процес може да се обясни с молекулни вибрации.

$$2HD \rightleftharpoons H_2 + D_2 \qquad K = \frac{[H_2][D_2]}{[HD]^2} \quad (4)$$

При $T$ = 0 K, вибрационната енергия на двуатомна молекула, чиято вибрационна честота е $\nu$ [$s^{-1}$] се изразява като:

$$E = \frac{1}{2}h\nu \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (6)$$

където $k$ е силовата константа и $\mu$ е редуцираната маса, която се изразява чрез масата на двата атома в двуатомната молекула, $m_1$ и $m_2$, в съответствие с:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

**A.2** Вибрацията на $H_2$ е при 4161.0 $cm^{-1}$, когато се отчита като вълново число. **Изчислете** $\Delta H$ за следното уравнение при $T$ = 0 K в единици J $mol^{-1}$. 8pt

$$2HD \rightarrow H_2 + D_2 \quad (8)$$

Приемете, че:

- само вибрационната енергия допринася за $\Delta H$.
- стойностите на $k$ за $H_2$, HD, и $D_2$ са идентични.
- масата на H е 1 Da и масата на D е 2 Da.

Молната част на $H_2$, HD, и $D_2$ зависи от температурата на системата в състояние на равновесие. Тук $\Delta_{D_2}$ се дефинира като промяната на молната част на $D_2$.

$$\Delta_{D_2} = \frac{R_{D_2}}{R^*_{D_2}} - 1 \tag{9}$$

Тук $R_{D_2}$ се отнася до $\frac{[D_2]}{[H_2]}$ в пробата и $R^*_{D_2}$ до $\frac{[D_2]}{[H_2]}$ при $T \to +\infty$. Трябва да се отбележи, че разпределението на изотопите при $T \to +\infty$ е случайно.

**A.3** **Изчислете** $\Delta_{D_2}$ с частта на D в природата, когато изотопният обмен е в равновесие при температурата, за която $K$ в ур. 4 е 0.300. Приемете, че частта на D и H в природата е съответно $1.5576 \times 10^{-4}$ и $1 - 1.5576 \times 10^{-4}$. 10pt

По принцип, молната част на двойно заместения изотополог, който съдържа два тежки изотопни атоми в една молекула, нараства с понижаване на температурата. Нека разгледаме молната част на молекулите $CO_2$ с молни маси 44 и 47, които са описани по-долу като $CO_2[44]$ и $CO_2[47]$ . Величината $\Delta_{47}$ се дефинира като:

$$\Delta_{47} = \frac{R_{47}}{R^*_{47}} - 1 \tag{10}$$

$R_{47}$ се отнася до $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$ в пробата и $R^*_{47}$ до $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$ при $T \to +\infty$. Частите на въглеродните и кислородните атоми в природата са показани по-долу; игнорирайте изотопите, които не са показани тук .

| | $^{12}C$ | $^{13}C$ |
|---|---|---|
| Част в природата | 0.988888 | 0.011112 |

| | $^{16}O$ | $^{17}O$ | $^{18}O$ |
|---|---|---|---|
| Част в природата | 0.997621 | 0.0003790 | 0.0020000 |

Температурната зависимост на $\Delta_{47}$ е дадена по-долу, където $T$ е абсолютна температура в K:

$$\Delta_{47} = \frac{36.2}{T^2} + 2.920 \times 10^{-4} \tag{11}$$

**A.4** $R_{47}$ на фосилен планктон, получен от морското дъно на Антарктика, е $4.50865 \times 10^{-5}$. **Изчислете** температурата, като използвате това $R_{47}$. Тази температура се тълкува като температура на въздуха през ерата, в която е живял планктонът. В изчислението разгледайте само най-често срещания изотополог на $CO_2[47]$. 9pt

# Isotope Time Capsule

| 11 % of the total | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | **Total** |
| Points | 8 | 8 | 10 | 9 | **35** |
| Score | | | | | |



Molecular entities that differ only in isotopic composition, such as $CH_4$ and $CH_3D$, are called isotopologues. Isotopologues are considered to have the same chemical characteristics. In nature, however, there exists a slight difference.

Assume that all of the substances shown in this Question are in a gas phase.

Let us consider the following equilibrium:

$$^{12}C^{16}O_2 + {}^{12}C^{18}O_2 \rightleftharpoons 2\,{}^{12}C^{16}O^{18}O \qquad K = \frac{[{}^{12}C^{16}O^{18}O]^2}{[{}^{12}C^{16}O_2][{}^{12}C^{18}O_2]} \tag{1}$$

The entropy, $S$, increases with increasing the number of possible microscopic states of a system, $W$:

$$S = k_B \ln W \tag{2}$$

$W = 1$ for $^{12}C^{16}O_2$ and $^{12}C^{18}O_2$. In contrast, $W = 2$ for a $^{12}C^{16}O^{18}O$ molecule because the oxygen atoms are distinguishable in this molecule. As the right-hand side of the equilibrium shown in eq. 1 has two $^{12}C^{16}O^{18}O$ molecules, $W = 2^2 = 4$.

**A.1** The enthalpy change, $\Delta H$, of eq. 3 is positive regardless of the temperature. 8pt

$$H_2 + DI \rightleftharpoons HD + HI \quad (3)$$

**Calculate** the equilibrium constants, $K$, for eq. 3 at very low (think of $T \to 0$) and very high (think of $T \to +\infty$) temperatures. Assume that the reaction remains unchanged at these temperatures and that $\Delta H$ converges to a constant value for high temperatures.

The Δ*H* of the following process can be explained by molecular vibrations.

$$2HD \rightleftharpoons H_2 + D_2 \qquad K = \frac{[H_2][D_2]}{[HD]^2} \quad (4)$$

At $T$ = 0 K, the vibrational energy of a diatomic molecule whose vibration frequency is $\nu$ [$s^{-1}$] is expressed as:

$$E = \frac{1}{2}h\nu \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (6)$$

Wherein $k$ is the force constant and $\mu$ the reduced mass, which is expressed in terms of the mass of the two atoms in the diatomic molecule, $m_1$ and $m_2$, according to:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

**A.2** The vibration of $H_2$ is at 4161.0 $cm^{-1}$ when reported as a wavenumber. 8pt
**Calculate** the $\Delta H$ of the following equation at $T$ = 0 K in units of J $mol^{-1}$.

$$2HD \to H_2 + D_2 \quad (8)$$

Assume that:
- only the vibrational energy contributes to the $\Delta H$.
- the $k$ values for $H_2$, HD, and $D_2$ are identical.
- the mass of H to be 1 Da and the mass of D to be 2 Da.

The molar ratio of $H_2$, HD, and $D_2$ depends on the temperature in a system in equilibrium. Here, $\Delta_{D_2}$ is defined as the change of the molar ratio of $D_2$.

$$\Delta_{D_2} = \frac{R_{D_2}}{R^*_{D_2}} - 1 \tag{9}$$

Here, $R_{D_2}$ refers to $\frac{[D_2]}{[H_2]}$ in the sample and $R^*_{D_2}$ to $\frac{[D_2]}{[H_2]}$ at $T \to +\infty$. It should be noted here that the distribution of isotopes becomes random at $T \to +\infty$.

**A.3** **Calculate** $\Delta_{D_2}$ with natural D abundance when the isotopic exchange is in equilibrium at the temperature where $K$ in eq. 4 is 0.300. Assume that the natural abundance ratios of D and H are $1.5576 \times 10^{-4}$ and $1 - 1.5576 \times 10^{-4}$, respectively. 10pt

In general, the molar ratio of the doubly substituted isotopologue, which contains two heavy isotope atoms in one molecule, increases with decreasing temperature. Let us consider the molar ratio of $CO_2$ molecules with molecular weights of 44 and 47, which are described as $CO_2[44]$ and $CO_2[47]$ below. The quantity $\Delta_{47}$ is defined as:

$$\Delta_{47} = \frac{R_{47}}{R_{47}^*} - 1 \tag{10}$$

$R_{47}$ refers to $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$ in the sample and $R_{47}^*$ to $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$ at $T \to +\infty$. The natural abundances of carbon and oxygen atoms are shown below; ignore isotopes that are not shown here.

| | $^{12}C$ | $^{13}C$ |
|---|---|---|
| natural abundance | 0.988888 | 0.011112 |

| | $^{16}O$ | $^{17}O$ | $^{18}O$ |
|---|---|---|---|
| natural abundance | 0.997621 | 0.0003790 | 0.0020000 |

The temperature dependence of $\Delta_{47}$ is determined as follows, where $T$ is given as the absolute temperature in units of K:

$$\Delta_{47} = \frac{36.2}{T^2} + 2.920 \times 10^{-4} \tag{11}$$

**A.4** The $R_{47}$ of fossil plankton obtained from the Antarctic seabed was $4.50865 \times 10^{-5}$. **Estimate** the temperature using this $R_{47}$. This temperature is interpreted as the air temperature during the era in which the plankton lived. Consider only the most common isotopologue of $CO_2[47]$ for the calculation. 9pt

# Изотопна капсула за време

**A.1** (8 pt)

$T \to 0 : K =$ _____ , $T \to +\infty : K =$ _____

**A.2** (8 pt)

$\Delta H =$ _____ J mol$^{-1}$

**A.3** (10 pt)

$\Delta_{D_2} =$ _____

**A.4** (9 pt)

$T =$ _____ K

BGR-1 C-3 C-1

**BGR-1 C-3 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 3
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Закон на Lambert–Beer?

| 8 % от общия брой точки | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | B.1 | B.2 | **Общо** |
| Точки | 10 | 6 | 6 | **22** |
| Резултат | | | | |

В този проблем игнорирайте абсорбцията на клетката и разтворителя. Температурите на всички разтвори и газове се поддържат постоянни при 25 °C.

## Част A

Воден разтвор **X** е приготвен от HA и NaA. Концентрациите на$[A^-]$, [HA], и $[H^+]$ в разтвор **X** са съответно $1.00 \times 10^{-2}$ mol $L^{-1}$, $1.00 \times 10^{-3}$ mol $L^{-1}$, и $1.00 \times 10^{-4}$ mol $L^{-1}$, които са свързани чрез следното киселинно-основно равновесие:

$$HA \rightleftharpoons A^- + H^+ \qquad K = \frac{[A^-][H^+]}{[HA]} \tag{1}$$

Дължината на оптичния път е $l$ в Част A. Игнорирайте промяната на плътността при разреждане. Приемете, че не протичат никакви химични реакции, различни от ур. 1.

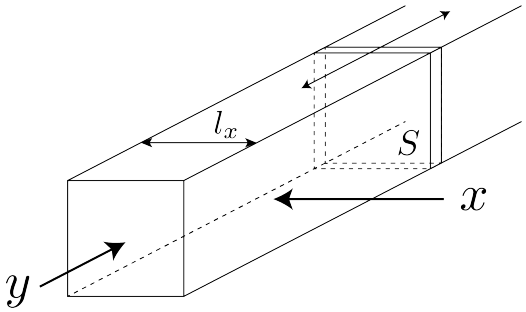
**A.1** Абсорбцията на **X** е $A_1$ при дължина на вълната $\lambda_1$. След това, разтвор **X** се разрежда двукратно спрямо първоначалния си обем, като се използва солна киселина с pH = 2.500. След разреждането абсорбцията е все още $A_1$ при $\lambda_1$. **Определете** отношението $\varepsilon_{HA}/\varepsilon_{A^-}$, където $\varepsilon_{HA}$ и $\varepsilon_{A^-}$ представляват абсорбционните коефициенти съответно на HA и $A^-$ при $\lambda_1$. 10pt

## Част B

Нека разгледаме следното равновесие в газова фаза.

$$\mathrm{D} \rightleftharpoons 2\mathrm{M} \tag{2}$$

Чист газ D е поставен в контейнер с форма на куб, който има прозрачна подвижна стена с напречно сечение $S$ (вижте фигурата по-долу) при налягане $P$, и се установява равновесие, като общото налягане се поддържа $P$. Абсорбцията на газа е $A = \varepsilon(n/V)l$, където $\varepsilon$, $n$, $V$, и $l$ са съответно абсорбционният коефициент, количеството на газа в молове, обемът на газа и дължината на оптичния път. Приемете, че всички компоненти на газовата смес имат поведение на идеални газове.




Използвайте следните дефиниции, ако е необходимо.

| | Начално състояние | | След равновесие | |
|---|---|---|---|---|
| | D | M | D | M |
| Парциално налягане | $P$ | $0$ | $p_{\mathrm{D}}$ | $p_{\mathrm{M}}$ |
| Количество в молове | $n_0$ | $0$ | $n_{\mathrm{D}}$ | $n_{\mathrm{M}}$ |
| Обем | $V_0$ | | $V$ | |

**B.1** Абсорбцията на газа при $\lambda_{\mathrm{B1}}$, измерена по направлението $x$ ($l = l_x$), е $A_{\mathrm{B1}}$, както в началното състояние, така и след установяване на равновесие. **Определете** отношението $\varepsilon_{\mathrm{D}}/\varepsilon_{\mathrm{M}}$ при $\lambda_{\mathrm{B1}}$, където $\varepsilon_{\mathrm{D}}$ и $\varepsilon_{\mathrm{M}}$ представляват съответно абсорбционните коефициенти на D и M. 6pt

**B.2** Абсорбцията на газа при $\lambda_{\mathrm{B2}}$, измерена по направлението $y$ , е $A_{\mathrm{B2}}$ както в началното състояние ($l = l_{y0}$), така и след установяване на равновесие ($l = l_y$). **Определете** отношението $\varepsilon_{\mathrm{D}}/\varepsilon_{\mathrm{M}}$ при $\lambda_{\mathrm{B2}}$. 6pt

# Lambert–Beer Law?

| 8 % of the total | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | B.1 | B.2 | **Total** |
| Points | 10 | 6 | 6 | **22** |
| Score | | | | |

In this problem, ignore the absorption of the cell and the solvent. The temperatures of all solutions and gases are kept constant at 25 °C.

## Part A

An aqueous solution **X** was prepared using HA and NaA. The concentrations $[A^-]$, $[HA]$, and $[H^+]$ in solution **X** are $1.00 \times 10^{-2}$ mol $L^{-1}$, $1.00 \times 10^{-3}$ mol $L^{-1}$, and $1.00 \times 10^{-4}$ mol $L^{-1}$, respectively, which are correlated via the following acid-base equilibrium:

$$HA \rightleftharpoons A^- + H^+ \qquad K = \frac{[A^-][H^+]}{[HA]} \tag{1}$$

The optical path length is $l$ in Part A. Ignore the density change upon dilution. Assume that no chemical reactions other than eq 1 occur.

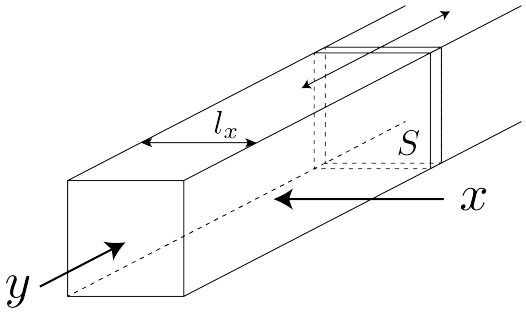
**A.1** The absorbance of **X** was $A_1$ at a wavelength of $\lambda_1$. Then, solution **X** was diluted to twice its initial volume using hydrochloric acid with pH = 2.500. After the dilution, the absorbance was still $A_1$ at $\lambda_1$. **Determine** the ratio $\varepsilon_{HA}/\varepsilon_{A^-}$, where $\varepsilon_{HA}$ and $\varepsilon_{A^-}$ represent the absorption coefficients of HA and of $A^-$, respectively, at $\lambda_1$. 10pt

## Part B

Let us consider the following equilibrium in the gas phase.

$$\mathrm{D} \rightleftharpoons 2\mathrm{M} \tag{2}$$

Pure gas D is filled into a cuboid container that has a transparent movable wall with a cross-section of $S$ (see the figure below) at a pressure $P$, and equilibrium is established while the total pressure is kept at $P$. The absorbance of the gas is $A = \varepsilon(n/V)l$, where $\varepsilon$, $n$, $V$, and $l$ are the absorption coefficient, amount of the gas in moles, volume of the gas, and optical path length, respectively. Assume that all components of the gas mixture behave as ideal gases.




Use the following definitions if necessary.

| | Initial state | | After equilibrium | |
|---|---|---|---|---|
| | D | M | D | M |
| Partial pressure | $P$ | $0$ | $p_{\mathrm{D}}$ | $p_{\mathrm{M}}$ |
| Amount in moles | $n_0$ | $0$ | $n_{\mathrm{D}}$ | $n_{\mathrm{M}}$ |
| Volume | $V_0$ | | $V$ | |

**B.1** The absorbance of the gas at $\lambda_{\mathrm{B1}}$ measured from direction $x$ ($l = l_x$) was $A_{\mathrm{B1}}$ both at the initial state and after the equilibrium. **Determine** the ratio $\varepsilon_{\mathrm{D}}/\varepsilon_{\mathrm{M}}$ at $\lambda_{\mathrm{B1}}$, where $\varepsilon_{\mathrm{D}}$ and $\varepsilon_{\mathrm{M}}$ represent the absorption coefficients of D and of M, respectively. 6pt

**B.2** The absorbance of the gas at $\lambda_{\mathrm{B2}}$ measured from direction $y$ was $A_{\mathrm{B2}}$ both at the initial state ($l = l_{y0}$) and after the equilibrium ($l = l_y$). **Determine** the ratio $\varepsilon_{\mathrm{D}}/\varepsilon_{\mathrm{M}}$ at $\lambda_{\mathrm{B2}}$. 6pt

# Закон на Lambert–Beer?

## Част А

**A.1** (10 pt)

(Продължава на следващата страница)

**A.1 (cont.)**

$\varepsilon_{HA}/\varepsilon_{A^-} =$ _____

## Част B

**B.1** (6 pt)

$\varepsilon_D/\varepsilon_M =$ _____

**B.2** (6 pt)

$\varepsilon_D/\varepsilon_M =$ _____

BGR-1 C-4 C-1

**BGR-1 C-4 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 4
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Редокс химия на цинк

| 11 % от общия брой точки | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | **Общо** |
| Точки | 6 | 5 | 4 | 3 | 5 | 9 | **32** |
| Резултат | | | | | | | |



Цинкът отдавна се използва като компонент на сплави за месингови и стоманени материали. Цинкът, който се съдържа в промишлените отпадни води, се отделя чрез утаяване за детоксикация на водата и получената утайка се редуцира, за да се извлече и използва повторно металът цинк.

## Част А

Равновесието на разтваряне на цинков дихидроксид $Zn(OH)_2(s)$ при 25 °C и съответните равновесни константи са дадени в ур. 1–4.

$$Zn(OH)_2(s) \rightleftharpoons Zn^{2+}(aq) + 2OH^-(aq) \qquad K_{sp} = 1.74 \times 10^{-17} \tag{1}$$

$$Zn(OH)_2(s) \rightleftharpoons Zn(OH)_2(aq) \qquad K_1 = 2.62 \times 10^{-6} \tag{2}$$

$$Zn(OH)_2(s) + 2OH^-(aq) \rightleftharpoons Zn(OH)_4^{2-}(aq) \qquad K_2 = 6.47 \times 10^{-2} \tag{3}$$

$$H_2O(l) \rightleftharpoons H^+(aq) + OH^-(aq) \qquad K_w = 1.00 \times 10^{-14} \tag{4}$$

Разтворимостта, $S$, на цинк (концентрация на цинк в наситен воден разтвор) е дадена в ур. 5.

$$S = [Zn^{2+}(aq)] + [Zn(OH)_2(aq)] + [Zn(OH)_4^{2-}(aq)] \quad (5)$$

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | Когато равновесията в ур. 1–4 се установят, **<u>изчислете</u>** pH интервала, в който концентрацията $[Zn(OH)_2(aq)]$ е най-висока сред концентрациите $[Zn^{2+}(aq)]$, $[Zn(OH)_2(aq)]$ и $[Zn(OH)_4^{2-}(aq)]$. | 6pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | Приготвен е наситен разтвор на $Zn(OH)_2(s)$ с pH = 7.00, след което е филтруван. Към филтрата е прибавена NaOH , за да се повиши pH до 12.00. **<u>Изчислете</u>** молният процент на цинк, който се утаява при повишаване на pH от 7,00 на 12,00. Игнорирайте промените в обема и температурата. | 5pt |

## Част B

След това извлеченият цинков хидроксид се нагрява, за да се получи цинков оксид, съгласно реакцията по-долу:

$$Zn(OH)_2(s) \rightarrow ZnO(s) + H_2O(l) \quad (6)$$

След това цинковият оксид се редуцира до метален цинк чрез взаимодействие с водород:

$$ZnO(s) + H_2(g) \rightarrow Zn(s) + H_2O(g) \quad (7)$$

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | За да протече реакция (7) при постоянно налягане на водорода - 1 bar, е необходимо да се намали парциалното налягане на образуваните водни пари. **<u>Изчислете</u>** горната граница на парциалното налягане на водните пари, за която реакция (7) може да протече при 300 °C. Тук енергиите на Гибс за образуване на цинков оксид и водни пари при 300 °C и 1 bar за всички газообразни химични видове са съответно $\Delta G_{ZnO}(300°C) = -2.90 \times 10^2$ kJ mol$^{-1}$ и $\Delta G_{H_2O}(300°C) = -2.20 \times 10^2$ kJ mol$^{-1}$. | 4pt |

Металният цинк се използва като материал за отрицателен електрод (анод) на батерии метал-въздух. Електродът се състои от Zn и ZnO. Протича следната окислително-редукционна реакция, за да се генерира електричество с електродвижеща сила (electromotive force - e.m.f.) при 25 °C и налягане 1 bar, $E°$.

$$Zn(s) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow ZnO(s) \qquad E° = 1.65\,V \quad (8)$$

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | Батерия цинк-въздух се разрежда при 20 mA за 24 часа. **<u>Изчислете</u>** промяната в масата на отрицателния електрод (анод) на батерията. | 3pt |



Планината Фуджи

**B.3** Да разгледаме промяната на e.m.f. на батерията цинк-въздух в зависимост от околната среда. **Изчислете** e.m.f. на върха на планината Фуджи, където температурата и надморската височина са съответно $-38\,^{\circ}$C (Февруари) and 3776 m. Атмосферното налягане е представено с 5pt

$$P\,[\text{bar}] = 1.013 \times \left(1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15}\right)^{5.257} \quad (9)$$

при надморска височина $h$ [m] и температура $T$ [°C]. Молната част на кислорода в атмосферата е $21\%$. Изменението на енергията на Гибс за реакция (8) е $\Delta G_{\text{ZnO}}(-38^{\circ}\text{C}) = -3.26 \times 10^2$ kJ mol$^{-1}$ при $-38\,^{\circ}$C и 1 bar.

**B.4** **Изчислете** изменението на енергията на Гибс за реакция (6) при $25\,^{\circ}$C. Имайте предвид, че стандартните редукционни потенциали, $E^{\circ}(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn})$ и $E^{\circ}(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$ при $25\,^{\circ}$C и 1 bar са дадени съответно като (10) и (11). 9pt

$$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn} \qquad E^{\circ}(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0.77\,\text{V} \quad (10)$$

$$\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} \qquad E^{\circ}(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1.23\,\text{V} \quad (11)$$

# The Redox Chemistry of Zinc

| 11 % of the total | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | **Total** |
| Points | 6 | 5 | 4 | 3 | 5 | 9 | **32** |
| Score | | | | | | | |



Zinc has long been used as alloys for brass and steel materials. The zinc contained in industrial wastewater is separated by precipitation to detoxify the water, and the obtained precipitate is reduced to recover and reuse it as metallic zinc.

## Part A

The dissolution equilibrium of zinc hydroxide $Zn(OH)_2(s)$ at 25 °C and the relevant equilibrium constants are given in eq. 1–4.

$$Zn(OH)_2(s) \rightleftharpoons Zn^{2+}(aq) + 2OH^-(aq) \qquad K_{sp} = 1.74 \times 10^{-17} \tag{1}$$

$$Zn(OH)_2(s) \rightleftharpoons Zn(OH)_2(aq) \qquad K_1 = 2.62 \times 10^{-6} \tag{2}$$

$$Zn(OH)_2(s) + 2OH^-(aq) \rightleftharpoons Zn(OH)_4^{2-}(aq) \qquad K_2 = 6.47 \times 10^{-2} \tag{3}$$

$$H_2O(l) \rightleftharpoons H^+(aq) + OH^-(aq) \qquad K_w = 1.00 \times 10^{-14} \tag{4}$$

The solubility, $S$, of zinc (concentration of zinc in a saturated aqueous solution) is given in eq. 5.

$$S = [\mathrm{Zn^{2+}(aq)}] + [\mathrm{Zn(OH)_2(aq)}] + [\mathrm{Zn(OH)_4^{2-}(aq)}] \tag{5}$$

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | When the equilibria in eq. 1–4 are established, **<u>calculate</u>** the pH range in which $[\mathrm{Zn(OH)_2(aq)}]$ is the greatest among $[\mathrm{Zn^{2+}(aq)}]$, $[\mathrm{Zn(OH)_2(aq)}]$ and $[\mathrm{Zn(OH)_4^{2-}(aq)}]$. | 6pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | A saturated aqueous solution of $\mathrm{Zn(OH)_2(s)}$ with pH = 7.00 was prepared and filtered. NaOH was added to this filtrate to increase its pH to 12.00. **<u>Calculate</u>** the molar percentage of zinc that precipitates when increasing the pH from 7.00 to 12.00. Ignore the volume and temperature changes. | 5pt |

## Part B

Next, the recovered zinc hydroxide is heated to obtain zinc oxide according to the reaction below:

$$\mathrm{Zn(OH)_2(s)} \rightarrow \mathrm{ZnO(s)} + \mathrm{H_2O(l)} \tag{6}$$

The zinc oxide is then reduced to metallic zinc by reaction with hydrogen:

$$\mathrm{ZnO(s)} + \mathrm{H_2(g)} \rightarrow \mathrm{Zn(s)} + \mathrm{H_2O(g)} \tag{7}$$

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | In order for reaction (7) to proceed at a hydrogen pressure kept at 1 bar, it is necessary to reduce the partial pressure of the generated water vapor. **<u>Calculate</u>** the upper limit for the partial pressure of water vapor to allow reaction (7) to proceed at 300 °C. Here, the Gibbs formation energies of zinc oxide and water vapor at 300 °C and 1 bar for all gaseous species are $\Delta G_{\mathrm{ZnO}}(300^\circ\mathrm{C}) = -2.90 \times 10^2\ \mathrm{kJ\,mol^{-1}}$ and $\Delta G_{\mathrm{H_2O}}(300^\circ\mathrm{C}) = -2.20 \times 10^2\ \mathrm{kJ\,mol^{-1}}$, respectively. | 4pt |

Metallic zinc is used as a negative electrode (anode) material for metal-air batteries. The electrode consists of Zn and ZnO. It uses the following redox reaction to generate electricity with the electromotive force (e.m.f.) at 25 °C and pressure of 1 bar, $E^\circ$.

$$\mathrm{Zn(s)} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2(g)} \rightarrow \mathrm{ZnO(s)} \qquad E^\circ = 1.65\,\mathrm{V} \tag{8}$$

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | A zinc–air battery was discharged at 20 mA for 24 hours. **<u>Calculate</u>** the change in mass of the negative electrode (anode) of the battery. | 3pt |



Mt. Fuji

**B.3** Consider the change of e.m.f. of a zinc–air battery depending on the environment. **Calculate** the e.m.f. at the summit of Mt. Fuji, where the temperature and altitude are $-38\,^{\circ}\mathrm{C}$ (February) and 3776 m, respectively. The atmospheric pressure is represented by 5pt

$$P\,[\mathrm{bar}] = 1.013 \times \left(1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15}\right)^{5.257} \tag{9}$$

at altitude $h\,[\mathrm{m}]$ and temperature $T\,[^{\circ}\mathrm{C}]$. The molar ratio of oxygen in the atmosphere is $21\%$. The Gibbs energy change of reaction (8) is $\Delta G_{\mathrm{ZnO}}(-38^{\circ}\mathrm{C}) = -3.26 \times 10^2\,\mathrm{kJ\,mol^{-1}}$ at $-38\,^{\circ}\mathrm{C}$ and 1 bar.

**B.4** **Calculate** the Gibbs energy change for reaction (6) at $25\,^{\circ}\mathrm{C}$. Note that the standard reduction potentials, $E^{\circ}(\mathrm{Zn^{2+}/Zn})$ and $E^{\circ}(\mathrm{O_2/H_2O})$ at $25\,^{\circ}\mathrm{C}$ and 1 bar are given as (10) and (11), respectively. 9pt

$$\mathrm{Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn} \qquad E^{\circ}(\mathrm{Zn^{2+}/Zn}) = -0.77\,\mathrm{V} \tag{10}$$

$$\mathrm{O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O} \qquad E^{\circ}(\mathrm{O_2/H_2O}) = 1.23\,\mathrm{V} \tag{11}$$

# Редокс химия на цинк

## Част А

**A.1** (6 pt)

_____ < pH < _____

**A.2** (5 pt)

_____ %

## Част В

**B.1** (4 pt)

$p_{H_2O=}$ _____ bar

**B.2** (3 pt)

_____ g

**B.3** (5 pt)

V

**B.4** (9 pt)

$\Delta G^\circ =$ _____ $\mathrm{J\,mol^{-1}}$

BGR-1 C-5 C-1

**BGR-1 C-5 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 5
## Cover sheet

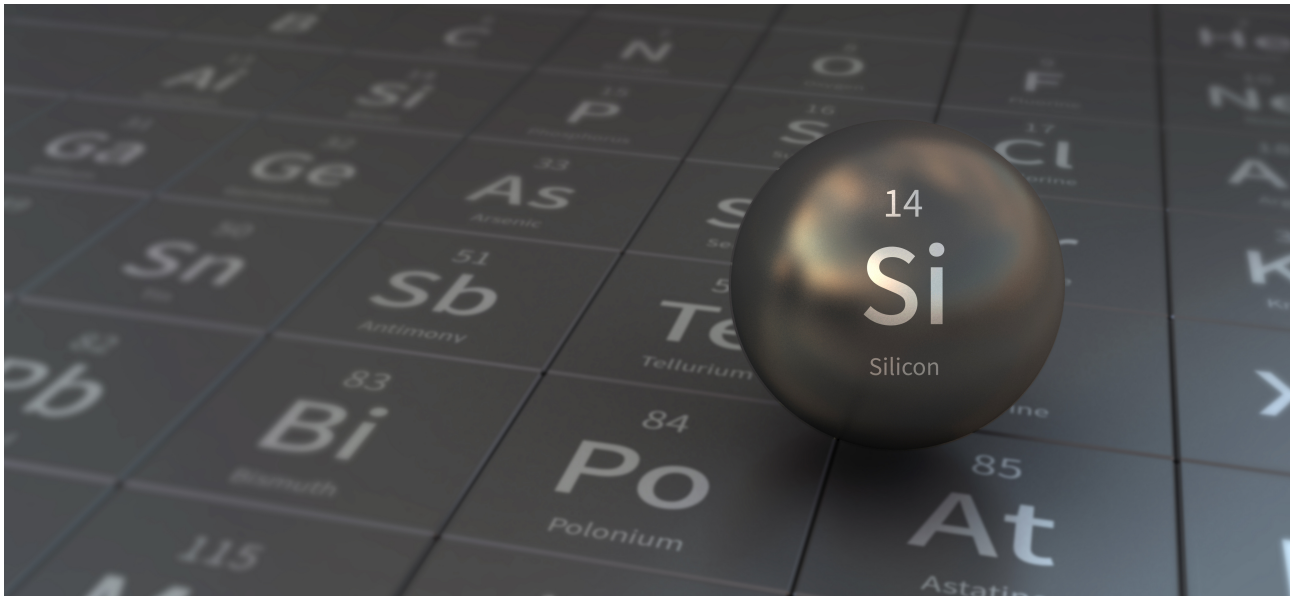
Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Q5-1

Bulgarian (Bulgaria)

## Загадъчният силиций

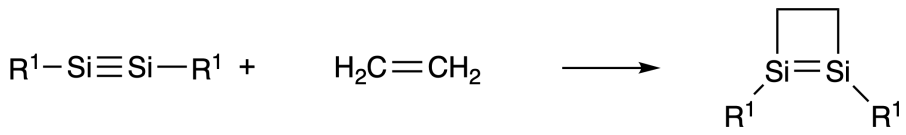
| 12 % общия брой точки | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | B.1 | B.2 | B.3 | **Общо** |
| Точки | 9 | 7 | 6 | 10 | 5 | 15 | 8 | **60** |
| Резултат | | | | | | | | |




Въпреки че силицият, подобно на въглерода, е елемент от 14 група, техните свойства се различават значително.

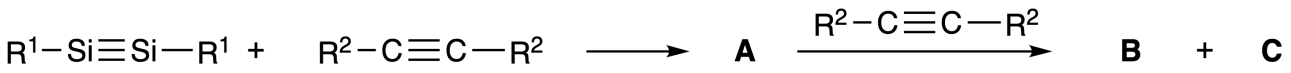
### Част A

За разлика от тройната връзка въглерод-въглерод, тройната връзка силиций-силиций в съединение, описано с формулата $R^1–Si \equiv Si–R^1$ (R: органичен заместител) е изключително реактивоспособна. Например, съединението реагира с етилен, като образува цикличен продукт, който съдържа четиричленен пръстен.




Когато $R^1–Si \equiv Si–R^1$ реагира с алкин ($R^2–C \equiv C–R^2$),като начален интермедиат се получава четиричленно циклично съединения **A** . Следващата реакция на друга молекула $R^2–C \equiv C–R^2$ с **A** дава

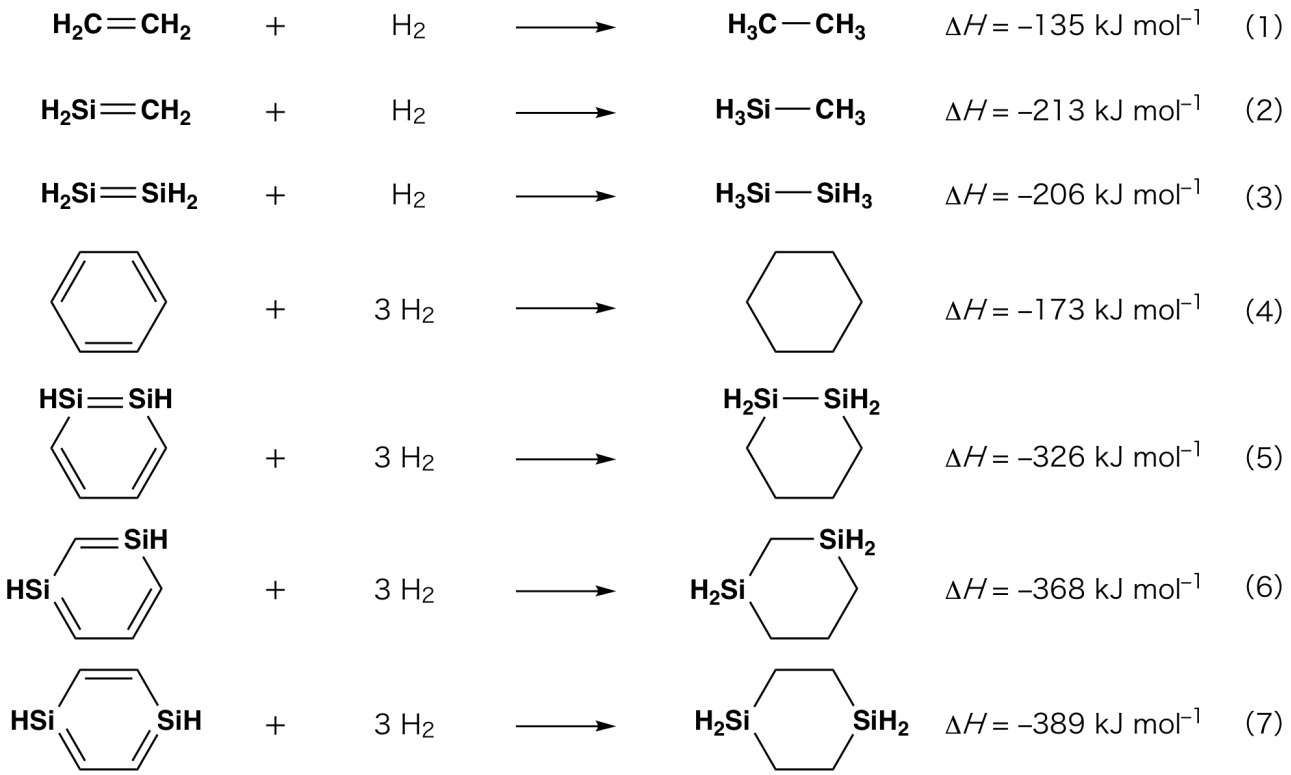
изомерите **B** и **C**, всеки от които има подобна на бензена циклична спрегната структура, т. нар. 'disilabenzenes', които съдържат шестчленен цикъл и могат да бъдат описани като $(R^1{-}Si)_2(R^2{-}C)_4$.




$^{13}C$ ЯМР анализът на съответните шестчленни циклични структури $Si_2C_4$ показва два сигнала за **B** и един сигнал за **C**.

**A.1** **Напишете** структурните формули на **A**, **B** и **C** с една от възможните резонансни структури, като използвате означенията $R^1$, $R^2$, Si и C. 9pt

**A.2** **Изчислете** енергията на ароматна стабилизация (aromatic stabilization energy - ASE) за бензен и за **C** (в случая на $R^1 = R^2 = H$) като положителни стойности, като имате предвид промяната на енталпията на някои реакции на хидрогениране на ненаситени системи, показани по-долу (Фиг. 1). 7pt




Фиг. 1

При нагряване на **C** в разтвор с разтворител ксилен, **C** претърпява изомеризация и се получава равновесна смес от съединенията **D** и **E**. Молните отношения са: **D** : **E** = 1 : 40.0 при 50.0 ˚C и **D** : **E** = 1 : 20.0 при 120.0 ˚C.

**A.3** **Изчислете** $\Delta H$ за превръщането на **D** в **E**. Приемете, че $\Delta H$ не зависи от температурата. 6pt

Изомеризацията на **C** в **D** и **E** протича чрез трансформация на $\pi$-връзки в $\sigma$-връзки, без да се разкъсват никакви $\sigma$-връзки. $^{13}$C ЯМР анализът показва един сигнал за скелета на $Si_2C_4$ на **D** и два сигнала за този на **E**. Скелетът на **D** не съдържа тричленни пръстени, докато **E** има два тричленни пръстени, които имат общ ръб.

**A.4** **Напишете** структурните формули на **D** и **E,** като използвате $R^1$, $R^2$, Si и C. 10pt

## Част B

Силицият има способността да образува високо координирани съединения (> четири заместителя) с електроотрицателни елементи като флуор. Както металните флуориди често се използват като флуориращи реагенти, така и високо координираните силициеви флуориди, също действат като флуориращи реагенти.

Реакцията на флуориране на $CCl_4$ при използване на $Na_2SiF_6$ е проведена, както следва.

- **Стандартизиране на разтвор на $Na_2SiF_6$** :

· Приготвяне

Воден разтвор **F**: 0.855 g $Na_2SiF_6$ (188.053 g mol$^{-1}$), разтворени във вода (общ обем: 200 mL).

Воден разтвор **G**: 6.86 g $Ce_2(SO_4)_3$ (568.424 g mol$^{-1}$), разтворени във вода (общ обем: 200 mL).

· Процедура

Утаечно титруване на разтвор **F** (50.0 mL) чрез прикапване на разтвор **G** в присъствие на xylenol orange като индикатор, който се координира към $Ce^{3+}$. След добавяне на 18.8 mL разтвор **G**, цветът на разтвора се променя от жълт в пурпурно-червен. Образуваната утайка е бинерно съединение, което съдържа $Ce^{3+}$, а единственото получено силициево съединение е $Si(OH)_4$.

**B.1** **Напишете** изравнено уравнение за реакцията на $Na_2SiF_6$ с $Ce_2(SO_4)_3$. 5pt

- **Реакция на $CCl_4$с $Na_2SiF_6$:**

(Загубите на вещества, напр. чрез изпарение, са незначителни при следващите операции.)

$Na_2SiF_6$($x$ [g]) се добавя към $CCl_4$ (500.0 g) и се нагрява до 300˚C в херметически затворен, устойчив на налягане реакционен съд. Нереагиралият $Na_2SiF_6$ и образуваният NaCl се отстраняват чрез филтруване. Филтратът се разрежда с $CCl_4$ до общ обем 1.00 L (разтвор **H**). $^{29}$Si и $^{19}$F ЯМР спектрите на разтвора **H** показват $SiF_4$ като единствено силициево съединение. В $^{19}$F ЯМР спектъра в допълнение на $SiF_4$, са наблюдавани сигнали, съответстващи на $CFCl_3$, $CF_2Cl_2$, $CF_3Cl$ и $CF_4$ (*вж.* Таблица 1). Интегралните отношения в $^{19}$F ЯМР спектъра са пропорционални на броя на флуорните ядра.

Таблица 1

| $^{19}$F ЯМР данни | $CFCl_3$ | $CF_2Cl_2$ | $CF_3Cl$ | $CF_4$ |
|---|---|---|---|---|
| Интегрално отношение | 45.0 | 65.0 | 18.0 | 2.0 |

$SiF_4$ се хидролизира и образува $H_2SiF_6$ съгласно следващото уравнение 8:

$$3SiF_4 + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2SiF_6 \quad (8)$$

Разтвор **H** (10 mL) се прибавя към излишък от вода, което води до пълна хидролиза на $SiF_4$. След разделяне, образуваният при хидролизата в водния разтвор $H_2SiF_6$ се неутрализира и напълно превръща в $Na_2SiF_6$ (воден разтвор **J**).

Утайката от нереагиралите $Na_2SiF_6$и NaCl, която беше отстранена чрез филтруване в началната стъпка (подчертани), се разтваря напълно във вода, за да се получи воден разтвор (разтвор **K**; 10.0 L).

След това са проведени допълнителни утаечни титрувания с използване на разтвор **G** и крайните точки на титруване с **G** са както следва:

·За разтвор **J** (целият разтвор): 61.6 mL.

·За 100 mL от разтвор **K**: 44.4 mL.

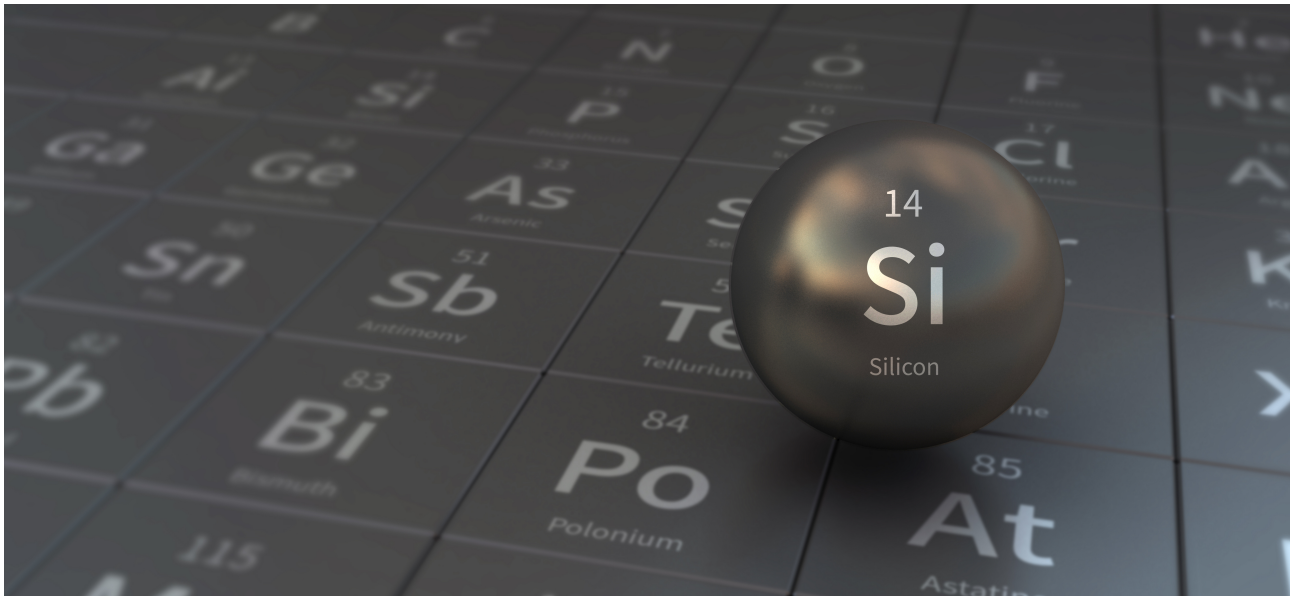
Трябва да се отбележи, че едновременното присъствие на NaCl или $SiO_2$ не влияе на утаечното титруване.

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | **Изчислете** масата на NaCl, получен в реакционния съд (информацията е подчертана), и **изчислете** масата ($x$ [g]) на $Na_2SiF_6$, използван като изходен материал. | 15pt |

| | | |
|---|---|---|
| **B.3** | 77.8% от използвания като изходен материал $CCl_4$, е нереагирал. **Изчислете** масата на образувания $CF_3Cl$. | 8pt |

# Mysterious Silicon

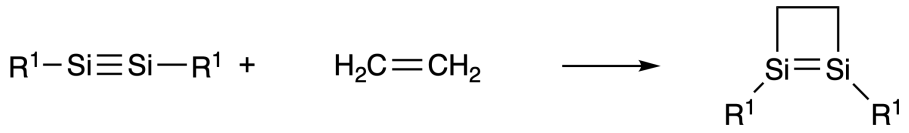
| 12 % of the total | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | B.1 | B.2 | B.3 | **Total** |
| Points | 9 | 7 | 6 | 10 | 5 | 15 | 8 | **60** |
| Score | | | | | | | | |



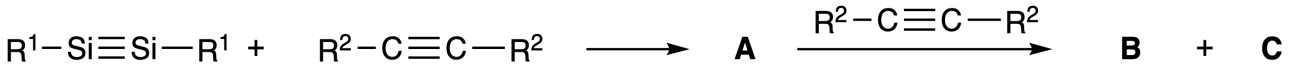

Although silicon is also a group 14 element like carbon, their properties differ significantly.

## Part A

Unlike the carbon–carbon triple bond, the silicon–silicon triple bond in a compound formulated as $R^1$–Si ≡ Si–$R^1$ (R: organic substituent) is extremely reactive. For example, it reacts with ethylene to form a cyclic product that contains a four-membered ring.




When $R^1$–Si ≡ Si–$R^1$ is treated with an alkyne ($R^2$–C ≡ C–$R^2$), the four-membered-ring compound **A** is formed as an initial intermediate. Further reaction of another molecule of $R^2$–C ≡ C–$R^2$ with **A** affords isomers **B** and **C**, both of which have benzene-like cyclic conjugated structures, so-called 'disilabenzenes' that contain a six-membered ring and can be formulated as $(R^1\text{–Si})_2(R^2\text{–C})_4$.




The $^{13}C$ NMR analysis of the corresponding six-membered ring skeletons $Si_2C_4$ shows two signals for **B** and one signal for **C**.

**A.1** **Draw** the structural formulae of **A**, **B**, and **C** using $R^1$, $R^2$, Si, and C, with one of the possible resonance structures. 9pt

**A.2** **Calculate** the aromatic stabilization energy (ASE) for benzene and **C** (in the case of $R^1 = R^2 = H$) as positive values, considering the enthalpy change in some hydrogenation reactions of unsaturated systems shown below (Fig. 1). 7pt

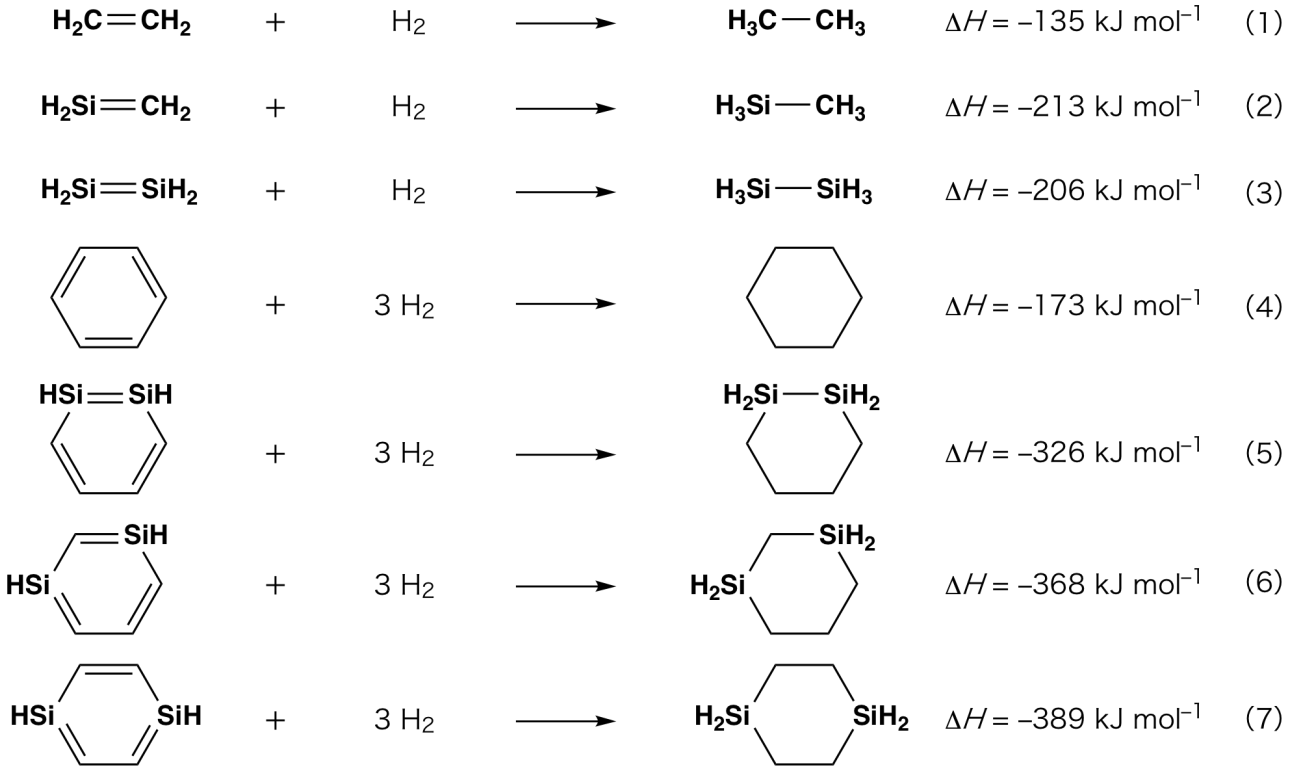



Fig. 1

When a xylene solution of **C** is heated, it undergoes isomerization to give an equilibrium mixture of compounds **D** and **E**. The molar ratio is **D** : **E** = 1 : 40.0 at 50.0 ˚C and **D** : **E** = 1 : 20.0 at 120.0 ˚C.

**A.3** **Calculate** $\Delta H$ for the transformation of **D** to **E**. Assume that $\Delta H$ does not depend on temperature. 6pt

The isomerization from **C** to **D** and to **E** proceeds via transformations of $\pi$-bonds into $\sigma$-bonds without breaking any $\sigma$-bonds. A $^{13}C$ NMR analysis revealed one signal for the $Si_2C_4$ skeleton of **D** and two signals for that of **E**. The skeleton of **D** does not contain any three-membered rings, while **E** has two three-membered rings that share an edge.

**A.4** **Draw** the structural formulae of **D** and **E** using $R^1$, $R^2$, Si, and C. 10pt

## Part B

Silicon is able to form highly coordinated compounds (> four substituents) with electronegative elements such as fluorine. As metal fluorides are often used as fluorination reagents, highly coordinated silicon fluorides also act as fluorination reagents.

The fluorination reaction of $CCl_4$ using $Na_2SiF_6$ was carried out as follows.

- **Standardization of $Na_2SiF_6$ solution** :

· Preparation

Aqueous solution **F**: 0.855 g of $Na_2SiF_6$ (188.053 g mol$^{-1}$) dissolved in water (total volume: 200 mL).

Aqueous solution **G**: 6.86 g of $Ce_2(SO_4)_3$ (568.424 g mol$^{-1}$) dissolved in water (total volume: 200 mL).

· Procedure

Precipitation titration of a solution **F** (50.0 mL) by dropwise adding solution **G** in the presence of xylenol orange, which coordinates to $Ce^{3+}$, as an indicator. After adding 18.8 mL of solution **G**, the color of the solution changes from yellow to magenta. The generated precipitate is a binary compound that contains $Ce^{3+}$, and the only resulting silicon compound is $Si(OH)_4$.

**B.1** **Write** the balanced equation for the reaction of $Na_2SiF_6$ with $Ce_2(SO_4)_3$. 5pt

- **Reaction of $CCl_4$ with $Na_2SiF_6$:**

(Substance losses by *e.g.* evaporation are negligible during the following operations.)

$Na_2SiF_6$($x$ [g]) was added to $CCl_4$ (500.0 g) and heated to 300˚C in a sealed pressure-resistant reaction vessel. The unreacted $Na_2SiF_6$ and generated NaCl were removed by filtration. The filtrate was diluted to a total volume of 1.00 L with $CCl_4$ (solution **H**). The $^{29}Si$ and $^{19}F$ NMR spectra of solution **H** showed $SiF_4$ as the only silicon compound. In the $^{19}F$ NMR spectrum, in addition to $SiF_4$, signals corresponding to $CFCl_3$, $CF_2Cl_2$, $CF_3Cl$, and $CF_4$ were observed (*cf.* Table 1). The integration ratios in the $^{19}F$ NMR spectrum are proportional to the number of fluorine nuclei.

Table 1

| $^{19}F$ NMR data | $CFCl_3$ | $CF_2Cl_2$ | $CF_3Cl$ | $CF_4$ |
|---|---|---|---|---|
| Integration ratio | 45.0 | 65.0 | 18.0 | 2.0 |

$SiF_4$ is hydrolyzed to form $H_2SiF_6$ according to the following eq. 8:

$$3SiF_4 + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2SiF_6 \quad (8)$$

Solution **H** (10 mL) was added to an excess amount of water, which resulted in the complete hydrolysis of $SiF_4$. After separation, the $H_2SiF_6$ generated from the hydrolysis in the aqueous solution was neutralized and completely converted to $Na_2SiF_6$ (aqueous solution **J**).

The precipitate of unreacted $Na_2SiF_6$ and NaCl, which was removed by filtration in the initial step (underlined), was completely dissolved in water to give an aqueous solution (solution **K**; 10.0 L).

Then, additional precipitation titrations using solution **G** were carried out, and the endpoints of the titrations with **G** were as follows:

·For solution **J** (entire amount): 61.6 mL.

·For 100 mL of solution **K**: 44.4 mL.

It should be noted here that the coexistence of NaCl or $SiO_2$ has no effect on the precipitation titration.

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | **Calculate** the mass of the NaCl produced in the reaction vessel (information underlined), and **calculate** the mass ($x$ [g]) of the $Na_2SiF_6$ used as a starting material. | 15pt |

| | | |
|---|---|---|
| **B.3** | 77.8% of the $CCl_4$ used as a starting material was unreacted. **Calculate** the mass of $CF_3Cl$ generated. | 8pt |

# Загадъчният силиций

## Част А

**A.1** (9 pt)

| **A** (3 pt) | **B** (3 pt) | **C** (3 pt) |
|---|---|---|
| | | |

**A.2** (7 pt)

$C_6H_6$ : kJ mol$^{-1}$, **C** : kJ mol$^{-1}$

**A.3** (6 pt)

$\Delta H$ = _____ kJ mol$^{-1}$

**A.4** (10 pt)

| **D** (5 pt) | **E** (5 pt) |
|---|---|
| | |

## Част B

**B.1** (5 pt)

_____

**B.2** (15 pt)

(продължава на следващата страница)

**B.2 (cont.)**

NaCl : _____ g, $Na_2SiF_6$ : _____ g

**B.3** (8 pt)

$CF_3Cl$ : _____ g

**BGR-1 C-6 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 6
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Q6-1

Bulgarian (Bulgaria)

# Химия на твърдото състояние на преходни метали

| 13 % от общия брой точки | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | C.1 | C.2 | C.3 | **Общо** |
| Точки | 6 | 3 | 3 | 6 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | **45** |
| Резултат | | | | | | | | | | | |



Вулкан на остров Сакураджима

## Част A

Япония е една от страните с най-голям брой вулкани в света. Когато силикатните минерали кристализират от магмата, част от йоните на преходните метали ($M^{n+}$) в магмата се включват в силикатните минерали. Изследваните в задачата $M^{n+}$ йони се координират от оксидни йони ($O^{2-}$) и придобиват четири-координирана тетраедрична ($T_d$) геометрия в магмата и шест-координирана октаедрична ($O_h$) геометрия в силикатните минерали, като и двете геометрии имат високо-спинова електронна конфигурация. Коефициентът на разпределение на $M^{n+}$ между силикатните минерали и магмата, $D$, може да се изрази с:

$$D = \frac{[\mathrm{M}]_s}{[\mathrm{M}]_l}$$

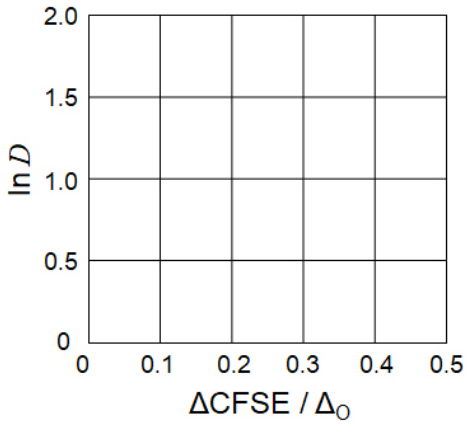
където $[M]_s$ и $[M]_l$ са концентрациите на $M^{n+}$ съответно в силикатните минерали и магмата. Таблицата по-долу показва стойностите на $D$ за $Cr^{2+}$ и $Mn^{2+}$ като примери.

| | $Cr^{2+}$ | $Mn^{2+}$ |
|---|---|---|
| $D$ | 7.2 | 1.1 |

Нека $\Delta_O$ и $CFSE^O$ са съответно параметърът на разцепване на d-орбиталите на $M^{n+}$ по енергия и енергията на стабилизация на кристалното поле в $O_h$ поле. Нека $\Delta_T$ и $CFSE^T$ са същите величини, но за $T_d$ поле.

**A.1** **Изчислете** $|CFSE^O - CFSE^T| = \Delta CFSE$ като функция на $\Delta_O$ за $Cr^{2+}$, $Mn^{2+}$ и $Co^{2+}$; приемете $\Delta_T = 4/9\Delta_O$. 6pt

**A.2** Наблюдава се линейна зависимост, като се начертае графика на $\ln D$ от $\Delta CFSE / \Delta_O$ в Декартова координатна система, показана по-долу. 3pt
**Оценете** $D$ за $Co^{2+}$.



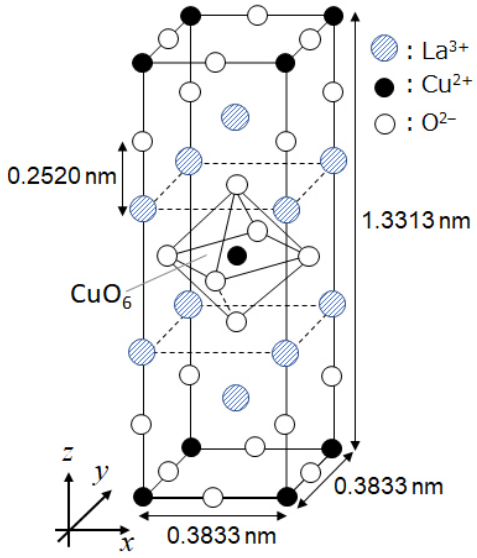

Металните оксиди MO (M: Ca, Ti, V, Mn или Co) кристализират в структурата на каменна сол, при което йоните $M^{n+}$ придобиват $O_h$ геометрия с високоспинова електронна конфигурация. Решетъчната енталпия на тези оксиди се управлява главно от кулоновите взаимодействия, базирани на радиуса и заряда на йоните, и някои приноси от CFSE на $M^{n+}$ в $O_h$ поле.

**A.3** **Изберете** подходящия набор решетъчни енталпии [kJ mol$^{-1}$] в един от отговорите от (a) до (f). 3pt

| | CaO | TiO | VO | MnO | CoO |
|---|---|---|---|---|---|
| **(a)** | 3460 | 3878 | 3913 | 3810 | 3916 |
| **(b)** | 3460 | 3916 | 3878 | 3810 | 3913 |
| **(c)** | 3460 | 3913 | 3916 | 3810 | 3878 |
| **(d)** | 3810 | 3878 | 3913 | 3460 | 3916 |
| **(e)** | 3810 | 3916 | 3878 | 3460 | 3913 |
| **(f)** | 3810 | 3913 | 3916 | 3460 | 3878 |

## Част B

Смесен оксид **A**, който съдържа $La^{3+}$ и $Cu^{2+}$, кристализира в тетрагонална елементарна клетка, показана във Фиг.1. В $[CuO_6]$ октаедър, дължината Cu–O по *z*-оста ($l_z$) е по-голяма от тази по *x*-оста ($l_x$), и $[CuO_6]$ е деформиран спрямо правилната $O_h$ геометрия. Тази деформация снема израждането на $e_g$ орбиталите ($d_{x^2-y^2}$ и $d_{z^2}$).




Фиг. 1

**A** може да се синтезира чрез термично разлагане (пиролиза) на комплекс **B**, който се образува чрез смесване на метални хлориди в разреден воден разтвор на амоняк, съдържащ квадратна киселина $C_4H_2O_4$, т.е., двуосновна киселина. При пиролиза на **B** в сух въздух се наблюдава 29,1% загуба на тегло до 200 °C , поради загуба на кристализационна вода, последвано от друга загуба на тегло до 700 °C, поради отделяне на $CO_2$. Общата загуба на тегло по време на образуването на **A** от **B** е 63.6%. Трябва да се отбележи, че в реакцията на пиролиза се отделят само вода и $CO_2$.

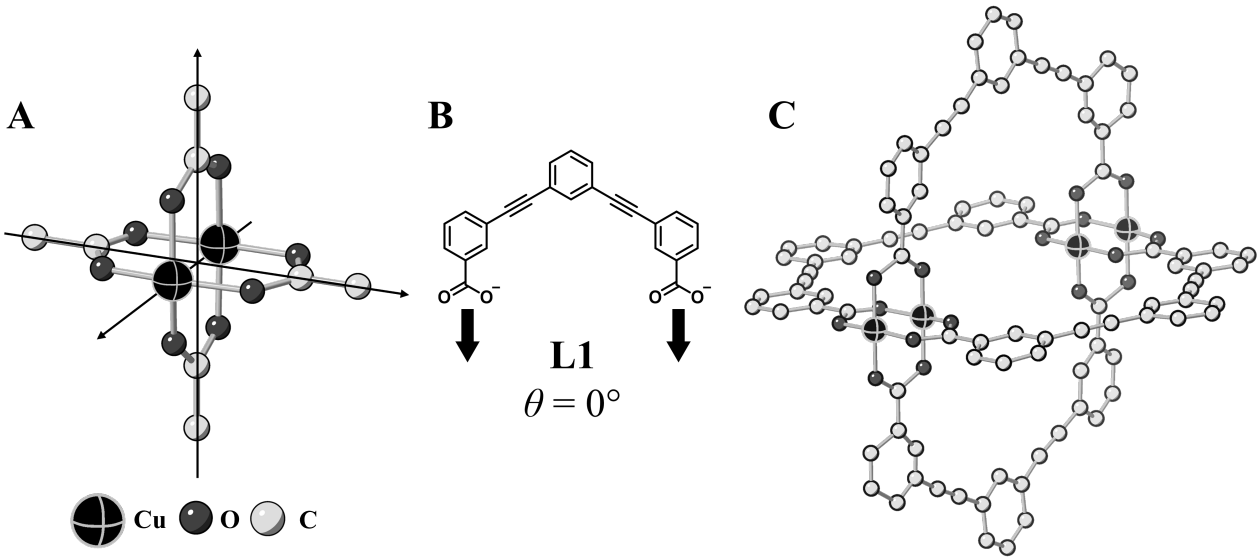
| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **Напишете** химичните формули на **A** и **B**. | 6pt |
| **B.2** | **Изчислете** $l_x$ и $l_z$, като използвате Фиг. 1. | 4pt |
| **B.3** | За $Cu^{2+}$ в деформирания $[CuO_6]$ октаедър в **A** на Фиг. 1, **напишете** имената на разцепените $e_g$ орбитали ($d_{x^2-y^2}$ и $d_{z^2}$) в (i) и (ii), и **нарисувайте** електронната конфигурация в пунктираното поле във вашия answer sheet. | 4pt |

**A** е изолатор. Когато един $La^{3+}$ е заместен с един $Sr^{2+}$, в кристалната решетка се генерира една дупка, която може да провежда електричество. Като резултат, **A**, дотирано със $Sr^{2+}$, показва свръхпроводимост под 38 K. Когато се проведе заместителна реакция за **A**, се образуват $2.05 \times 10^{27}$ дупки $m^{-3}$ .

| | | |
|---|---|---|
| **B.4** | **Изчислете** процента на йоните $Sr^{2+}$, които заместват йоните $La^{3+}$, въз основа на молното отношение в заместителната реакция. Имайте предвид, че валентностите на съставните йони и кристалната структура не се променят при реакцията на заместване. | 4pt |

## Част C

$Cu_2(CH_3CO_2)_4$ се състои от четири $CH_3CO_2^-$, координирани към два $Cu^{2+}$ (Фиг. 2A). $Cu_2(CH_3CO_2)_4$ показва високи нива на структурна симетрия, с две оси, преминаващи през въглеродните атоми на четирите $CH_3CO_2^-$ и ос, преминаваща през двата $Cu^{2+}$, като всички те са ориентирани ортогонално една спрямо друга. Когато вместо $CH_3CO_2^-$ се използва дикарбоксилатен лиганд, се образува „cage комплекс". "Cage" комплексът $Cu_4(\mathbf{L1})_4$ е съставен от равнинен дикарбоксилат **L1** (Фиг. 2B) и $Cu^{2+}$ (Фиг. 2C). Ъгълът $\theta$ между направленията на координация на двата карбоксилата, означени със стрелките в Фиг. 2B, определя структурата на "Cage" комплекса. Ъгълът $\theta$ е 0° за **L1**. Имайте предвид, че водородните атоми не са показани на Фиг. 2.

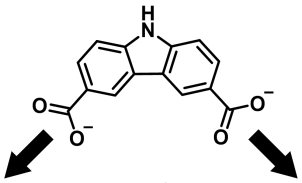



Фиг. 2

# Q6-5

Bulgarian (Bulgaria)

**C.1** Ъгълът $\theta$ на равнинния дикарбоксилат **L2**, показан по-долу, е 90˚. Ако съставът на "Cage" комплекса, образуван от **L2** и $Cu^{2+}$ е $Cu_n(\mathbf{L2})_m$, **напишете** комбинация от най-малките цели числа за *n* и *m*. Приемете, че само групи $CO_2^-$ на **L2** участват в координативна връзка с йони $Cu^{2+}$. 5pt



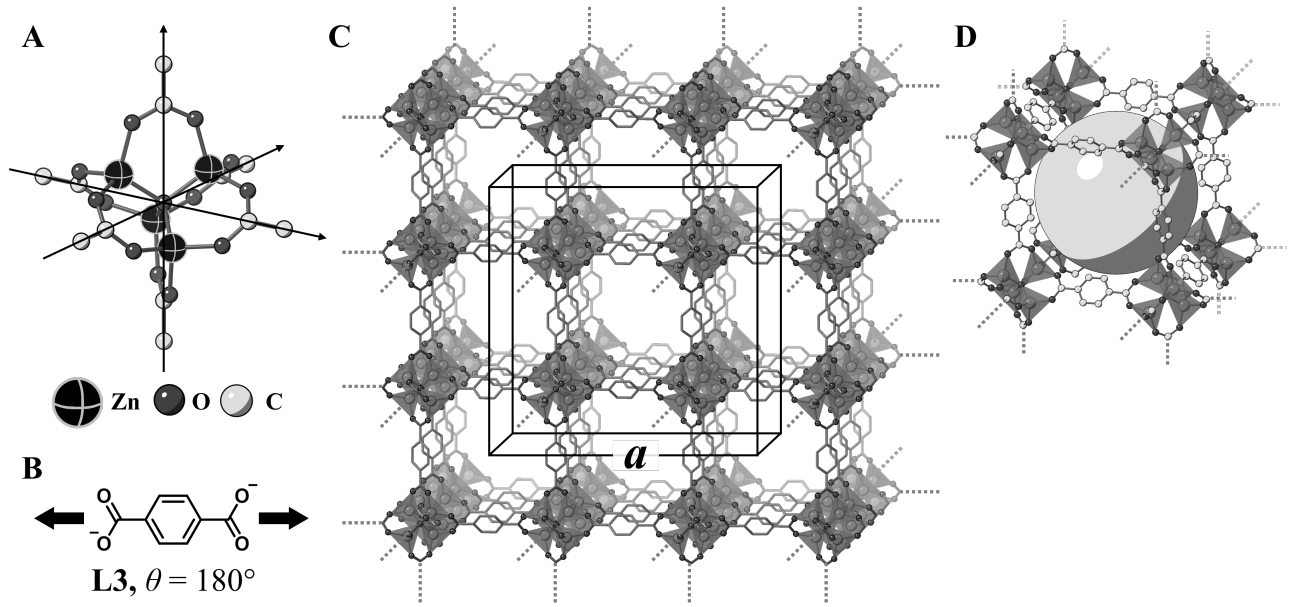
**L2**

$\theta = 90°$

# Q6-6

Bulgarian (Bulgaria)

Комплекс на цинк, $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$, съдържа четири тетраедрични $Zn^{2+}$, шест $CH_3CO_2^-$, и един $O^{2-}$ (Фиг. 3A). В $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$, йонът $O^{2-}$ е локализиран в координатното начало, и трите оси, преминаващи през въглеродните атоми на $CH_3CO_2^-$, са ориентирани ортогонално една спрямо друга. Когато *p*-benzenedicarboxylate (Фиг. 3B, **L3**, $\theta$ = 180°) се използва вместо $CH_3CO_2^-$, $Zn^{2+}$ клъстерите се свързват помежду си, за да образуват кристално твърдо вещество (**X**) което се нарича „порест координационен полимер“ (Фиг. 3C). Съставът на **X** е $[Zn_4O(\mathbf{L3})_3]_n$, и има кубична кристална структура с наноразмерни пори. Една пора е представена като сфера на Фиг. 3D и всеки тетраедричен $Zn^{2+}$ клъстер е представен като тъмносив многостен във Фиг. 3C и 3D. Имайте предвид, че водородните атоми не са показани във Фиг. 3.




Фиг. 3

| | | |
|---|---|---|
| **C.2** | **X** има кубична елементарна клетка с дължина на страната $a$ (Фиг. 3C) и плътност 0.592 g cm$^{-3}$. **Изчислете** $a$ в [cm]. | 5pt |

| | | |
|---|---|---|
| **C.3** | **X** съдържа значителен брой пори, и 1 g **X** може да събере в порите $3.0 \times 10^2$ mL газообразен $CO_2$ при 1 bar и 25 °C. **Изчислете** средния брой молекули $CO_2$ за една пора. | 5pt |

# The Solid-State Chemistry of Transition Metals

| 13 % of the total | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | B.2 | B.3 | B.4 | C.1 | C.2 | C.3 | **Total** |
| Points | 6 | 3 | 3 | 6 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | **45** |
| Score | | | | | | | | | | | |



Volcano at Sakurajima island

## Part A

Japan is one of the countries with the highest numbers of volcanos worldwide. When silicate minerals crystallize from magma, a part of the transition-metal ions ($M^{n+}$) in the magma is incorporated into the silicate minerals. The $M^{n+}$ studied in the problem are coordinated by oxide ions ($O^{2-}$) and adopt a four-coordinate tetrahedral ($T_d$) geometry in the magma and six-coordinate octahedral ($O_h$) geometry in the silicate minerals, both of which exhibit a high-spin electron configuration. The distribution coefficient of $M^{n+}$ between the silicate minerals and magma, $D$, can be expressed by:

$$D = \frac{[\mathrm{M}]_\mathrm{s}}{[\mathrm{M}]_\mathrm{l}}$$

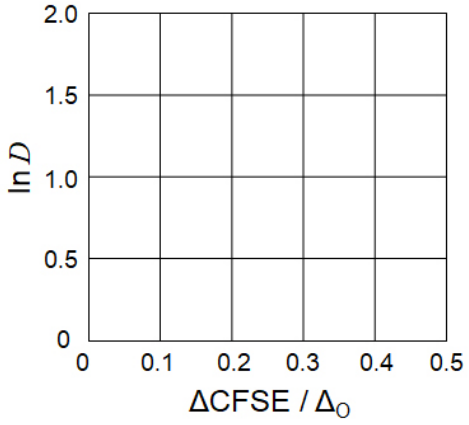
where $[M]_s$ and $[M]_l$ are the concentrations of $M^{n+}$ in the silicate minerals and the magma, respectively. The table below shows the $D$ values of $Cr^{2+}$ and $Mn^{2+}$ as examples.

| | $Cr^{2+}$ | $Mn^{2+}$ |
|---|---|---|
| $D$ | 7.2 | 1.1 |

Let $\Delta_O$ and $CFSE^O$ be the energy separation of the d-orbitals of $M^{n+}$ and the crystal-field stabilization energy in a $O_h$ field, respectively. Let $\Delta_T$ and $CFSE^T$ be those in a $T_d$ field.

**A.1** **Calculate** $|CFSE^O - CFSE^T| = \Delta CFSE$ in terms of $\Delta_O$ for $Cr^{2+}$, $Mn^{2+}$, and $Co^{2+}$; assume $\Delta_T = 4/9\Delta_O$. 6pt

**A.2** A linear relationship is observed by plotting $\ln D$ against $\Delta CFSE / \Delta_O$ in the Cartesian coordinate system shown below. 3pt
**Estimate** $D$ for $Co^{2+}$.




Metal oxides MO (M: Ca, Ti, V, Mn, or Co) crystallize in a rock-salt structure wherein the $M^{n+}$ adopts an $O_h$ geometry with a high-spin electron configuration. The lattice enthalpy of these oxides is mainly governed by the Coulomb interactions based on the radius and charge of the ions and some contributions from the CFSE of $M^{n+}$ in the $O_h$ field.

**A.3** **Choose** the appropriate set of lattice enthalpies [kJ mol$^{-1}$] from one of the options (a) to (f). 3pt

| | CaO | TiO | VO | MnO | CoO |
|---|---|---|---|---|---|
| **(a)** | 3460 | 3878 | 3913 | 3810 | 3916 |
| **(b)** | 3460 | 3916 | 3878 | 3810 | 3913 |
| **(c)** | 3460 | 3913 | 3916 | 3810 | 3878 |
| **(d)** | 3810 | 3878 | 3913 | 3460 | 3916 |
| **(e)** | 3810 | 3916 | 3878 | 3460 | 3913 |
| **(f)** | 3810 | 3913 | 3916 | 3460 | 3878 |

## Part B

A mixed oxide **A**, which contains $La^{3+}$ and $Cu^{2+}$, crystallizes in a tetragonal unit cell shown in Fig.1. In the $[CuO_6]$ octahedron, the Cu–O length along the *z*-axis ($l_z$) is longer than that of the *x*-axis ($l_x$), and $[CuO_6]$ is distorted from the regular $O_h$ geometry. This distortion removes the degeneracy of the $e_g$ orbitals ($d_{x^2-y^2}$ and $d_{z^2}$).

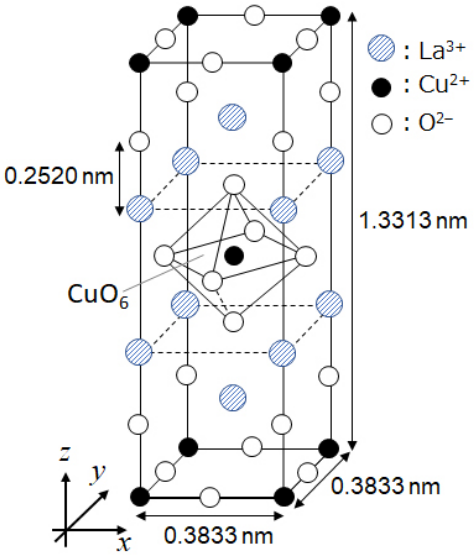



Fig. 1

**A** can be synthesized by thermal decomposition (pyrolysis) of complex **B**, which is formed by mixing metal chlorides in dilute aqueous ammonia solution containing squaric acid $C_4H_2O_4$, i.e., a diacid. The pyrolysis behavior of **B** in dry air shows a weight loss of 29.1% up to 200 °C due to the loss of crystallization water, followed by another weight loss up to 700 °C due to the release of $CO_2$. The total weight loss during the formation of **A** from **B** is 63.6%. It should be noted that only water and $CO_2$ are released in the pyrolysis reaction.

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **Write** the chemical formulae for **A** and **B**. | 6pt |
| **B.2** | **Calculate** $l_x$ and $l_z$ using Fig. 1. | 4pt |
| **B.3** | For $Cu^{2+}$ in the distorted $[CuO_6]$ octahedron in **A** of Fig. 1, **write** the names of the split $e_g$ orbitals ($d_{x^2-y^2}$ and $d_{z^2}$) in (i) and (ii), and **draw** the electron configuration in the dotted box in your answer sheet. | 4pt |

**A** is an insulator. When one $La^{3+}$ is substituted with one $Sr^{2+}$, one hole is generated in the crystal lattice that can conduct electricity. As a result, the $Sr^{2+}$-doped **A** shows superconductivity below 38 K. When a substitution reaction took place for **A**, $2.05 \times 10^{27}$ holes $m^{-3}$ were generated.

| | | |
|---|---|---|
| **B.4** | **Calculate** the percentage of $Sr^{2+}$ substituted for $La^{3+}$ based on the mole ratio in the substitution reaction. Note that the valences of the constituent ions and the crystal structure are not altered by the substitution reaction. | 4pt |

## Part C

$Cu_2(CH_3CO_2)_4$ is composed of four $CH_3CO_2^-$ coordinated to two $Cu^{2+}$ (Fig. 2A). $Cu_2(CH_3CO_2)_4$ exhibits high levels of structural symmetry, with two axes passing through the carbon atoms of the four $CH_3CO_2^-$ and an axis passing through the two $Cu^{2+}$, all of which are oriented orthogonal relative to each other. When a dicarboxylate ligand is used instead of $CH_3CO_2^-$, a "cage complex" is formed. The cage complex $Cu_4(\mathbf{L1})_4$ is composed of planar dicarboxylate **L1** (Fig. 2B) and $Cu^{2+}$ (Fig. 2C). The angle $\theta$ between the coordination directions of the two carboxylates, indicated by the arrows in Fig. 2B, determines the structure of the cage complex. The $\theta$ is 0° for **L1**. Note that hydrogen atoms are not shown in Fig. 2.

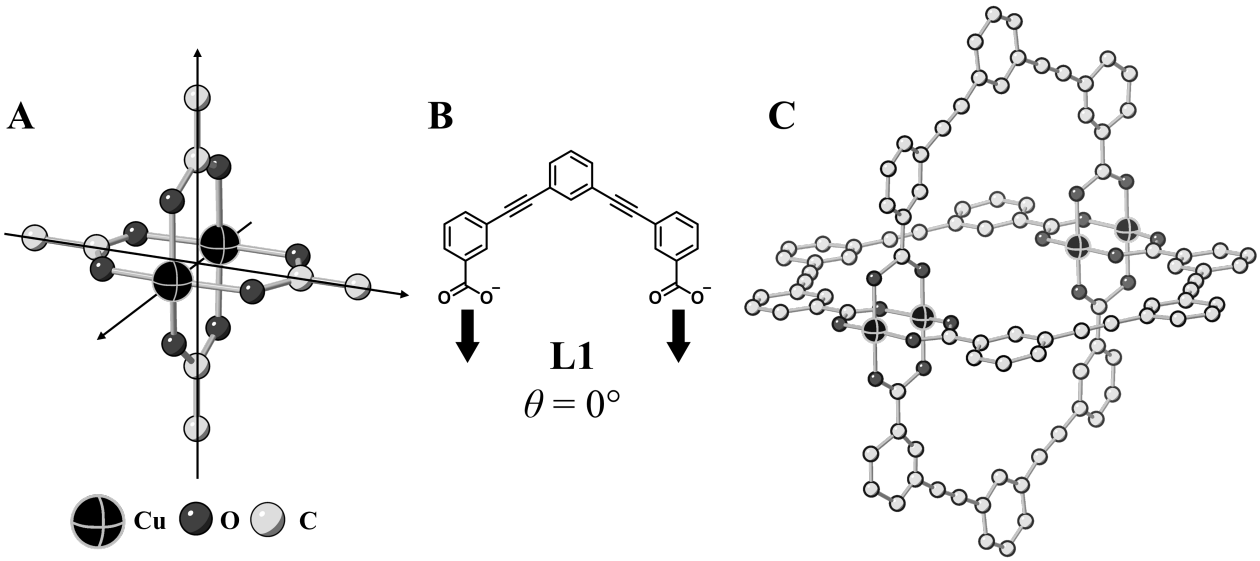
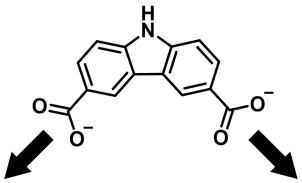



Fig. 2

**C.1** The $\theta$ of the planar dicarboxylate **L2** below is fixed to 90˚. If the composition of the cage complex formed from **L2** and $Cu^{2+}$ is $Cu_n(\mathbf{L2})_m$, **give** the smallest integer combination of *n* and *m*. Assume that only the $CO_2^-$ groups of **L2** form a coordination bond to $Cu^{2+}$ ions. 5pt




**L2**

$\theta = 90°$

A zinc complex, $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$, contains four tetrahedral $Zn^{2+}$, six $CH_3CO_2^-$, and one $O^{2-}$ (Fig. 3A). In $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$, the $O^{2-}$ is located at the origin, and the three axes passing through the carbon atoms of $CH_3CO_2^-$ are oriented orthogonal relative to each other. When *p*-benzenedicarboxylate (Fig. 3B, **L3**, $\theta$ = 180°) is used instead of $CH_3CO_2^-$, the $Zn^{2+}$ clusters are linked to each other to form a crystalline solid (**X**) that is called a "porous coordination polymer" (Fig. 3C). The composition of **X** is $[Zn_4O(\mathbf{L3})_3]_n$, and it has a cubic crystal structure with nano-sized pores. One pore is represented as a sphere in Fig. 3D, and each tetrahedral $Zn^{2+}$ cluster is represented as a dark gray polyhedron in Fig. 3C and 3D. Note that hydrogen atoms are not shown in Fig. 3.

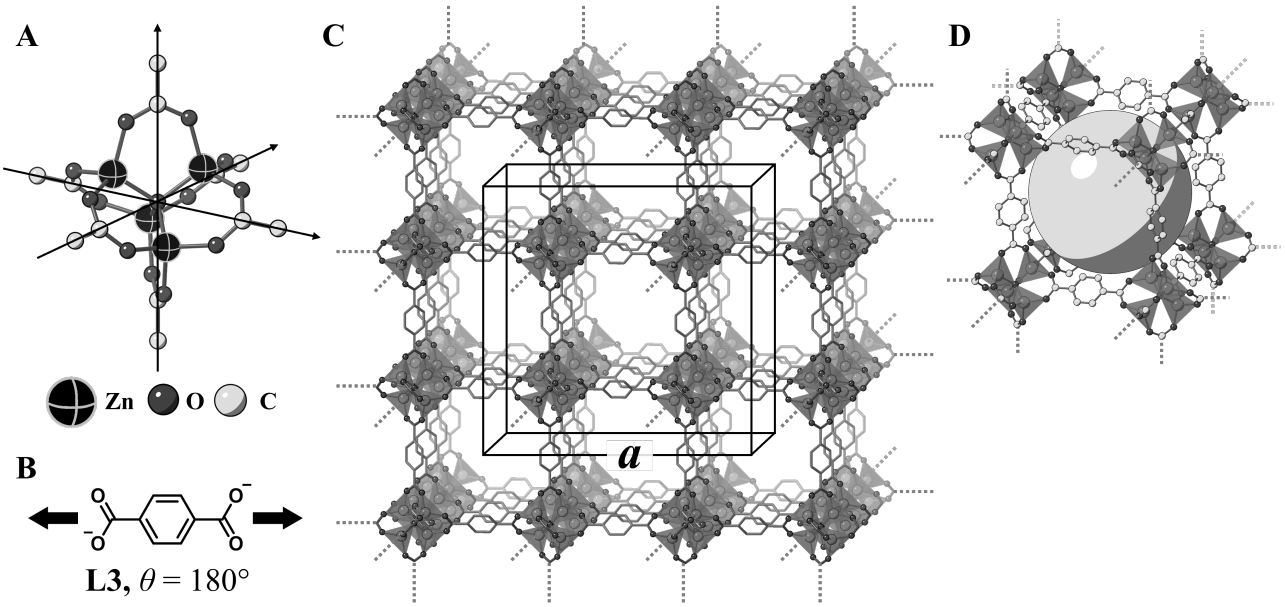



Fig. 3

| | | |
|---|---|---|
| **C.2** | **X** has a cubic unit cell with a side length of $a$ (Fig. 3C) and a density of 0.592 g cm$^{-3}$. **Calculate** $a$ in [cm]. | 5pt |

| | | |
|---|---|---|
| **C.3** | **X** contains a considerable number of pores, and 1 g of **X** can accommodate $3.0 \times 10^2$ mL of $CO_2$ gas in the pores at 1 bar and 25 °C. **Calculate** the average number of $CO_2$ molecules per pore. | 5pt |

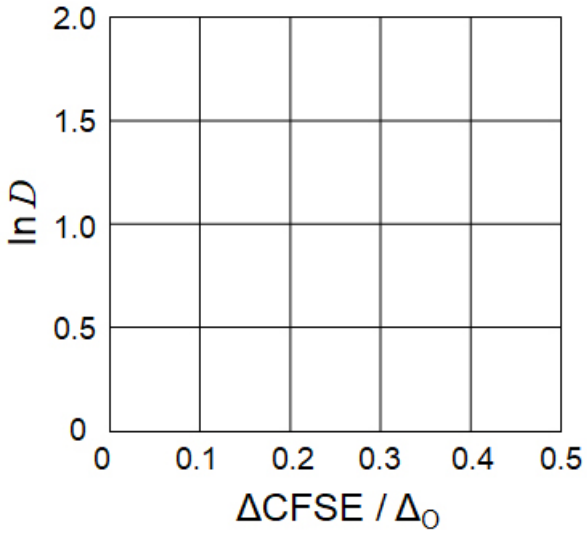
# Химия на твърдото състояние на преходни метали

## Част А

**A.1** (6 pt)

$Cr^{2+}$ : _____ $\Delta_O$, $Mn^{2+}$ : _____ $\Delta_O$ , $Co^{2+}$ : _____ $\Delta_O$

**A.2** (3 pt)




$D$ : _____

**A.3** (3 pt)

_____

## Част В

**B.1** (6 pt)

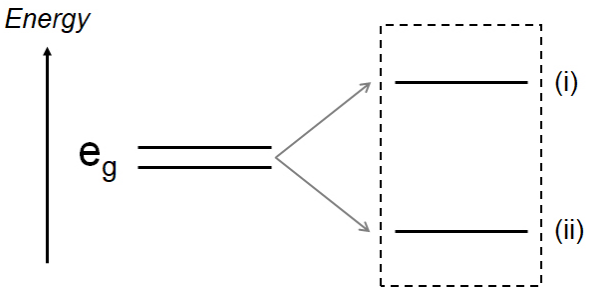
A : _____, B : _____

**B.2** (4 pt)

$l_x =$ _____ nm, $l_z =$ _____ nm

**B.3** (4 pt)

(i) : _____ , (ii) : _____




**B.4** (4 pt)

_____ %

## Част C

**C.1** (5 pt)

$n =$ _____, $m =$ _____

**C.2** (5 pt)

$a =$ _____ cm

**C.3** (5 pt)

BGR-1 C-7 C-1

**BGR-1 C-7 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 7
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Игра с небензоидна ароматност

| 13 % от общия брой точки | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | **Общо** |
| Точки | 5 | 2 | 19 | 10 | **36** |
| Резултат | | | | | |

Prof. Nozoe (1902–1996) поставя началото на изследванията върху небензоидни ароматни съединения, които сега са широко разпространени в органичната химия.



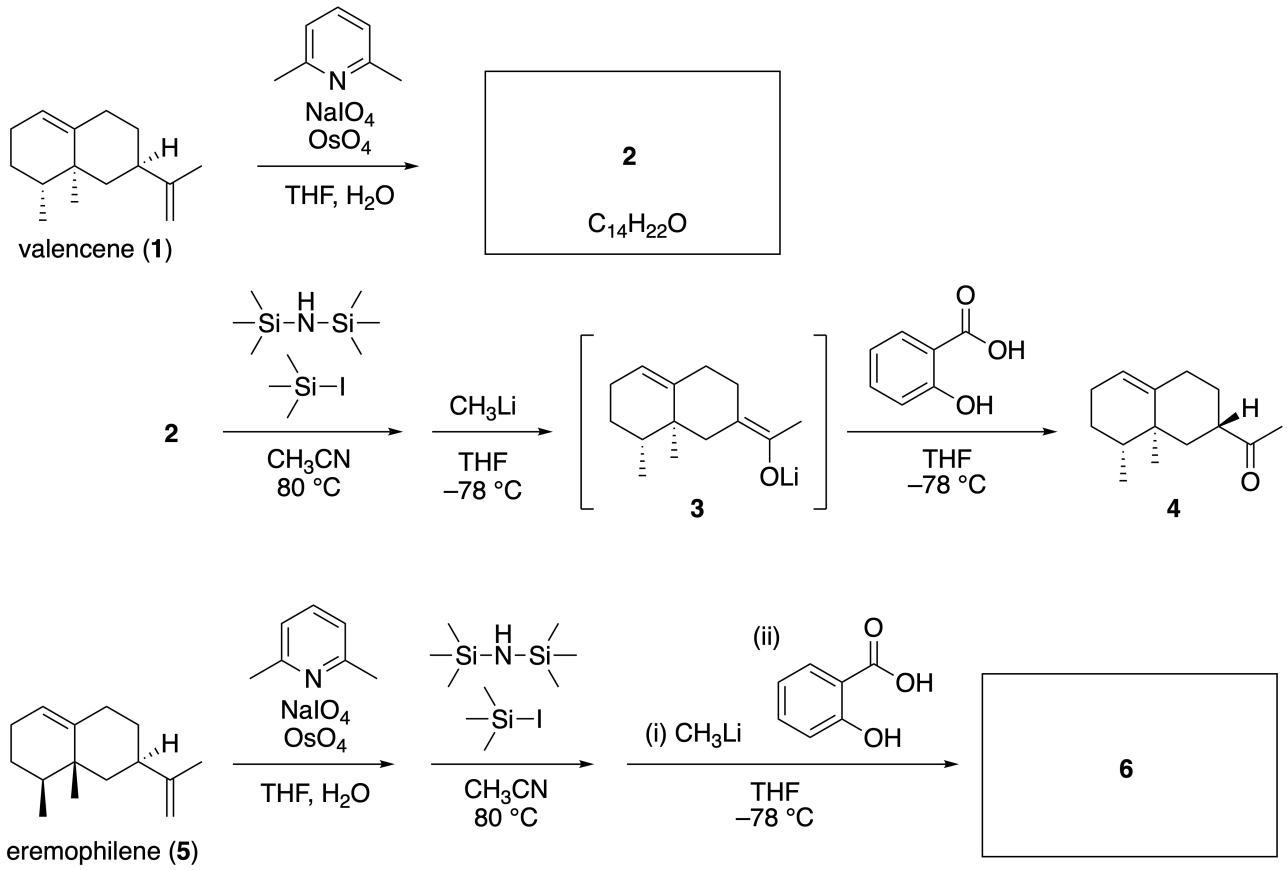
Photo courtesy: Tohoku Univ.

## Част A

Lineariifolianone е природен продукт с уникална структура, който е изолиран от *Inula linariifolia*. От valencene (**1**), при едностадийно превръщане, се получава **2**, преди тристепенно превръщане през **3,** да доведе до образуване на кетона **4**. Eremophilene (**5**) се превръща в **6** чрез осъществяване на същото четиристепенно превръщане.



*Inula linariifolia*



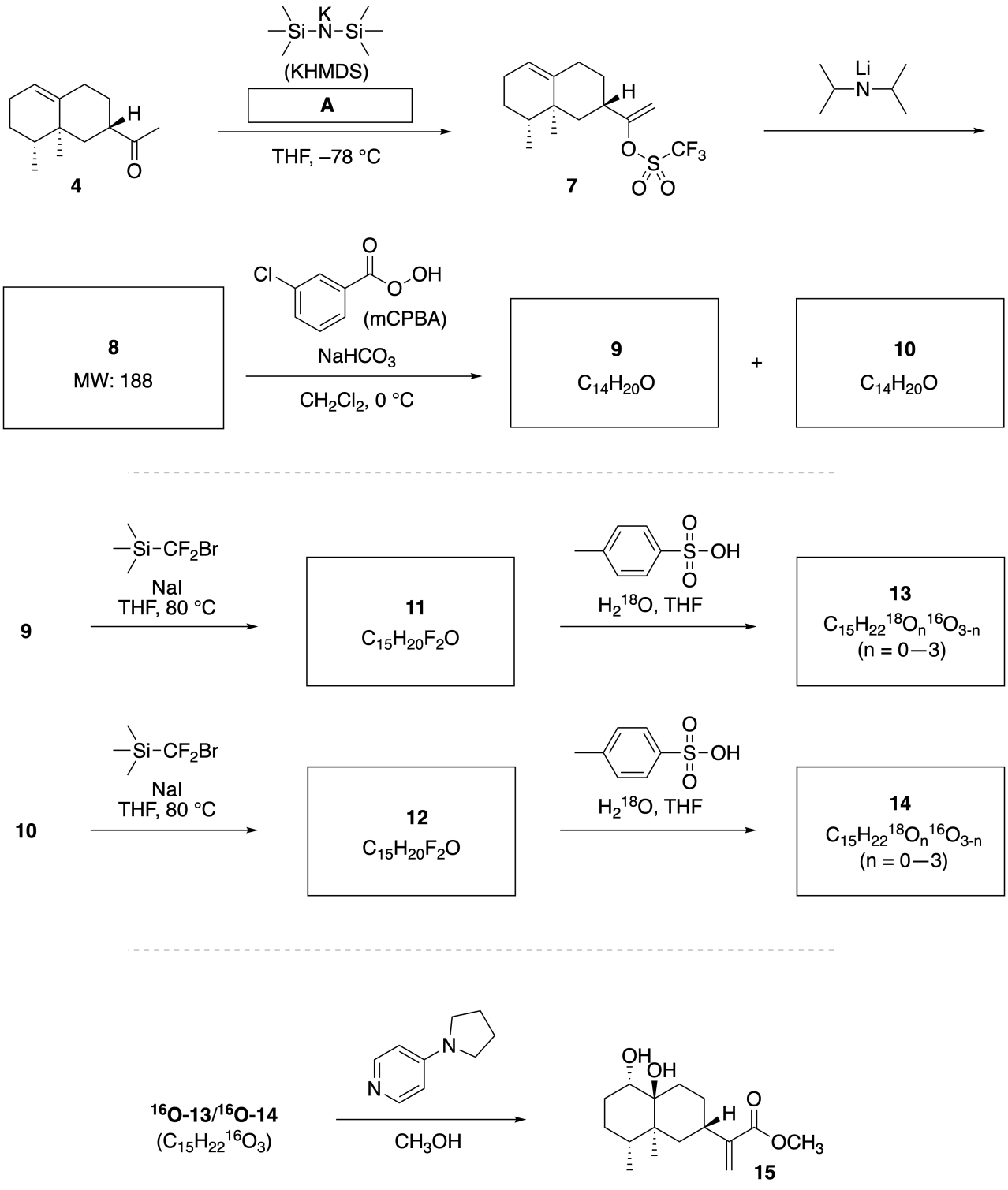

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | **Напишете** структурите на **2** и **6** и ясно означете стереохимията, където е необходимо. | 5pt |

След това кетонът **4** се превръща в естера **15**. Съединението **8** (молекулна маса: 188) запазва всички стереоцентрове на **7**. Съединенията **9** и **10** имат пет стереоцентъра и нямат двойни връзки

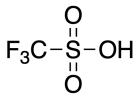
# Q7-3

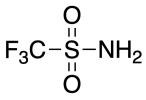
Bulgarian (Bulgaria)

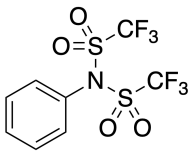
въглерод-въглерод. Приемете, че за синтеза на $^{18}O$–белязани-linearіifolianones **13** и **14** съответно от **11** и **12**, се използва $H_2{}^{18}O$ вместо $H_2{}^{16}O$. Съединенията **13** и **14** са $^{18}O$-белязани изотопомери. Игнорирайки изотопното белязване както **13,** така и **14** дават един и същи продукт **15** с идентична стереохимия.

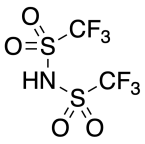


**A.2** **Изберете** подходящата структура за **A**. 2pt

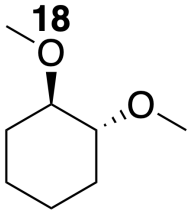
**I** 

**II** 

**III** 

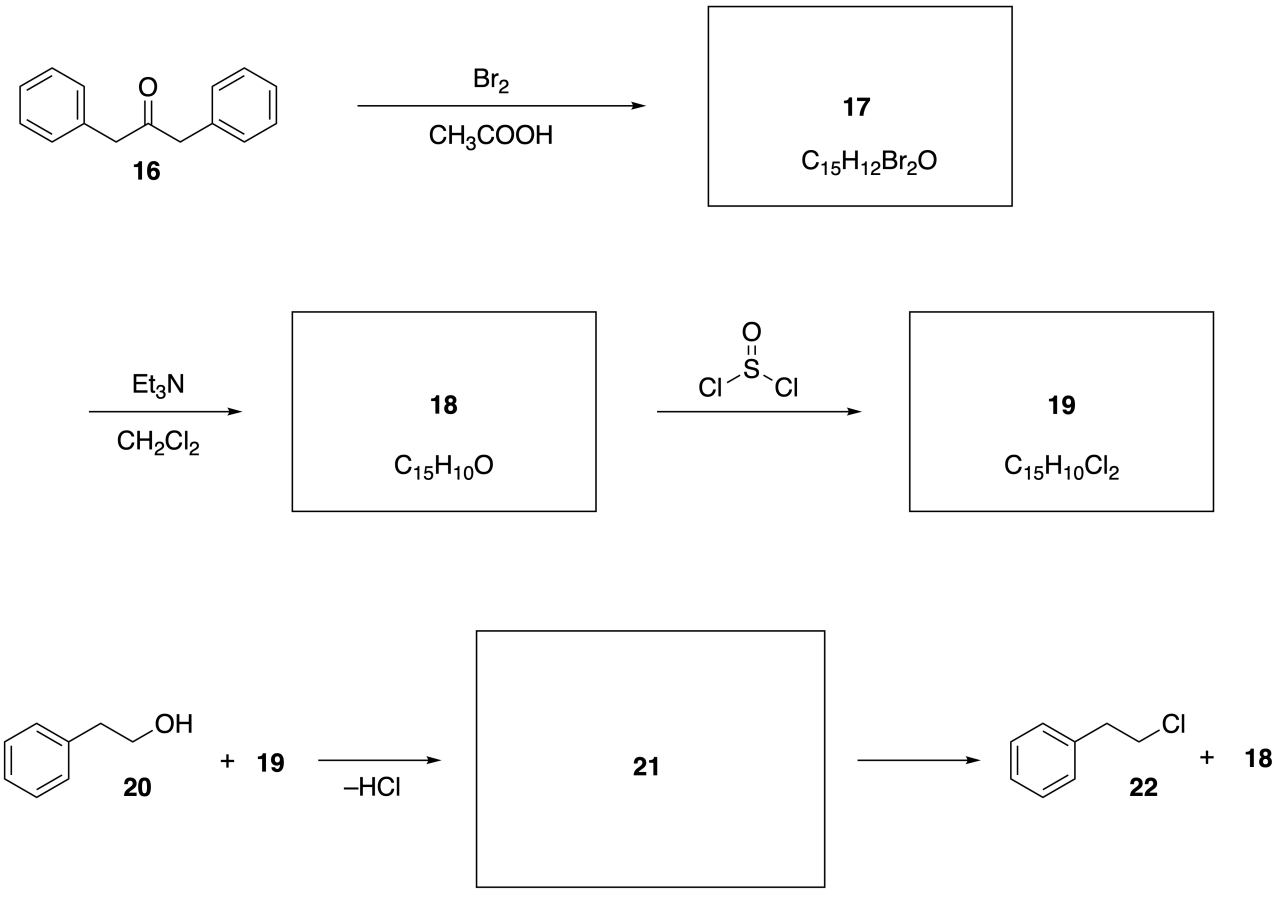
**IV** 

**A.3** **Напишете** структурите на **8**–**14** и означете ясно стереохимията, където е необходимо. Също така **означете** въведените атоми $^{18}O$ за **13** и **14,** както е показано в примера по-долу. 19pt



## Част B

Съединение **19** е синтезирано, както е показано по-долу. Що се отнася за небензоидната ароматност, **19** може да бъде използвано като активатор на алкохоли, и **20** е превърнато в **22** чрез йонна двойка интермедиат **21**. Въпреки че образуването на **21** е наблюдавано с ЯМР, **21** постепенно се разлага до **18** и **22**.




$^1$H NMR ($CD_3CN$, ppm) **20**: $\delta$ 7.4–7.2 (5H), 3.7 (2H), 2.8 (2H), 2.2 (1H)
**21**: $\delta$ 8.5–7.3 (15H), 5.5 (2H), 3.4 (2H)

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **Напишете** структурите на **17**–**19** и **21**. Означаването на стерехимията не е необходимо. | 10pt |

# Playing with Non-benzenoid Aromaticity

| 13 % of the total | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | **Total** |
| Points | 5 | 2 | 19 | 10 | **36** |
| Score | | | | | |

Prof. Nozoe (1902–1996) opened the research field of non-benzenoid aromatic compounds, which are now ubiquitous in organic chemistry.



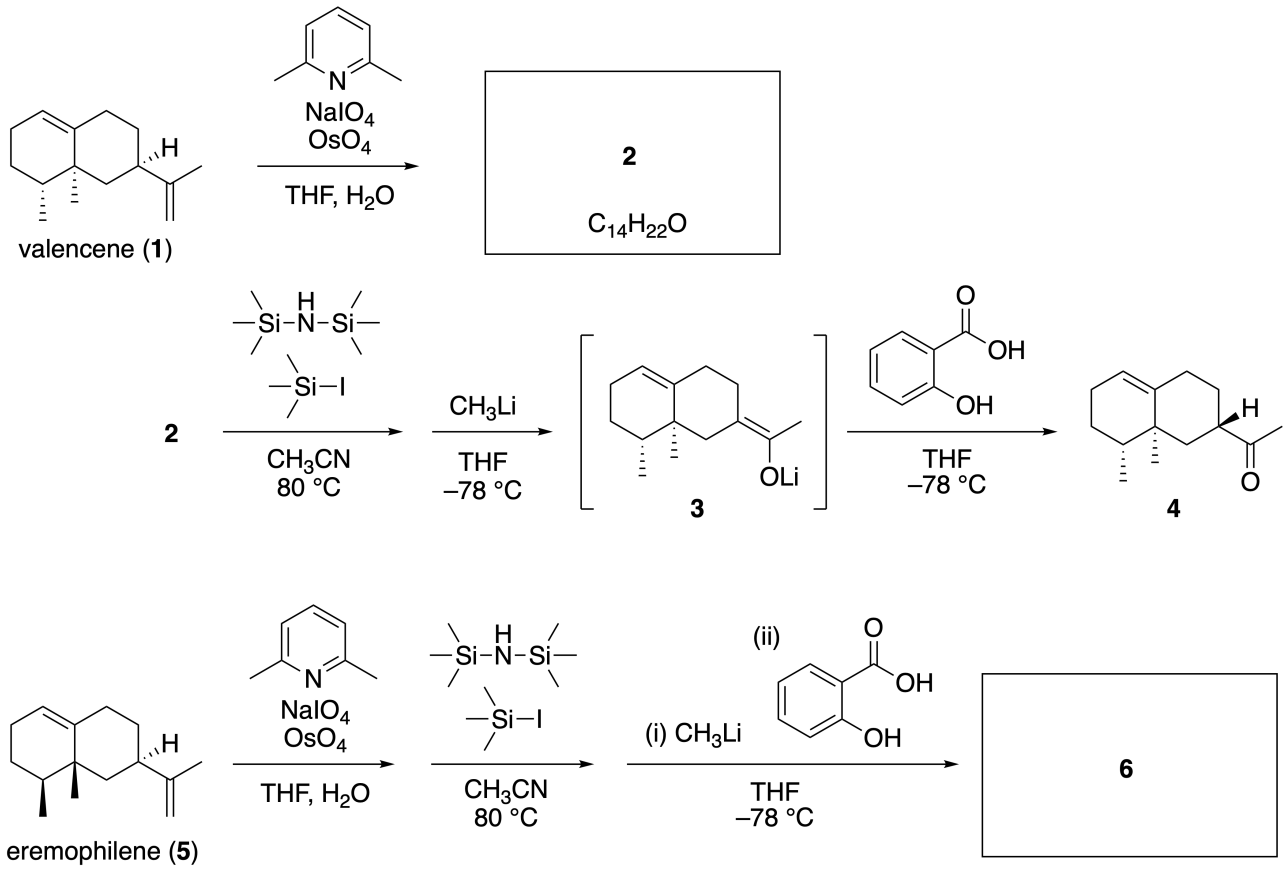
Photo courtesy: Tohoku Univ.

## Part A

Lineariifolianone is a natural product with a unique structure, which was isolated from *Inula linariifolia*. From valencene (**1**), a one-step conversion yields **2**, before a three-step conversion via **3** yields ketone **4**. Eremophilene (**5**) is converted into **6** by performing the same four-step conversion.



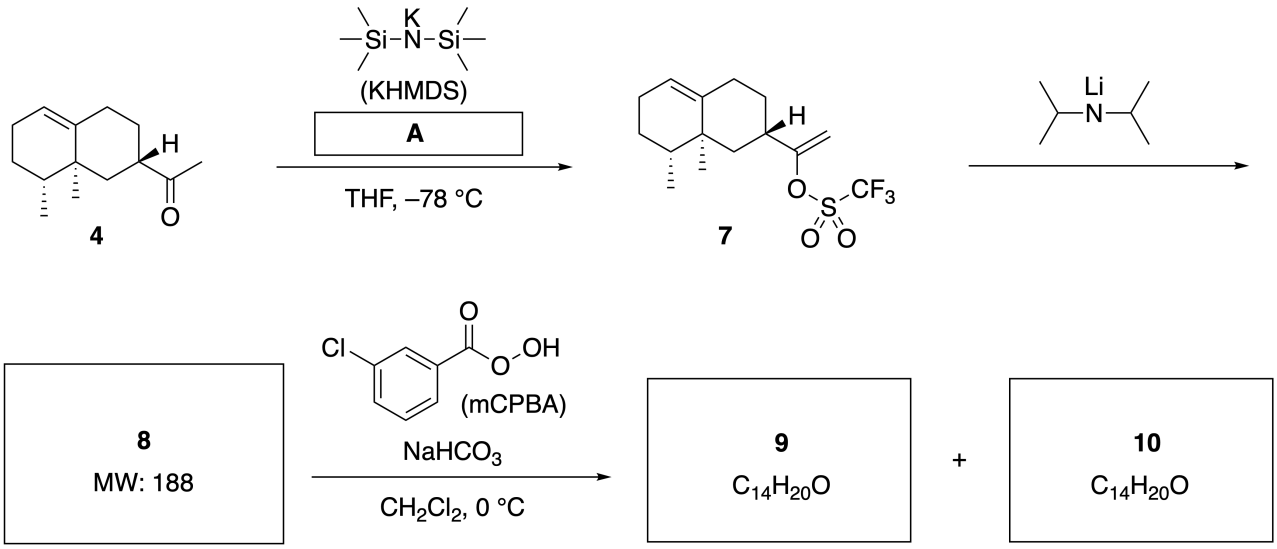
*Inula linariifolia*

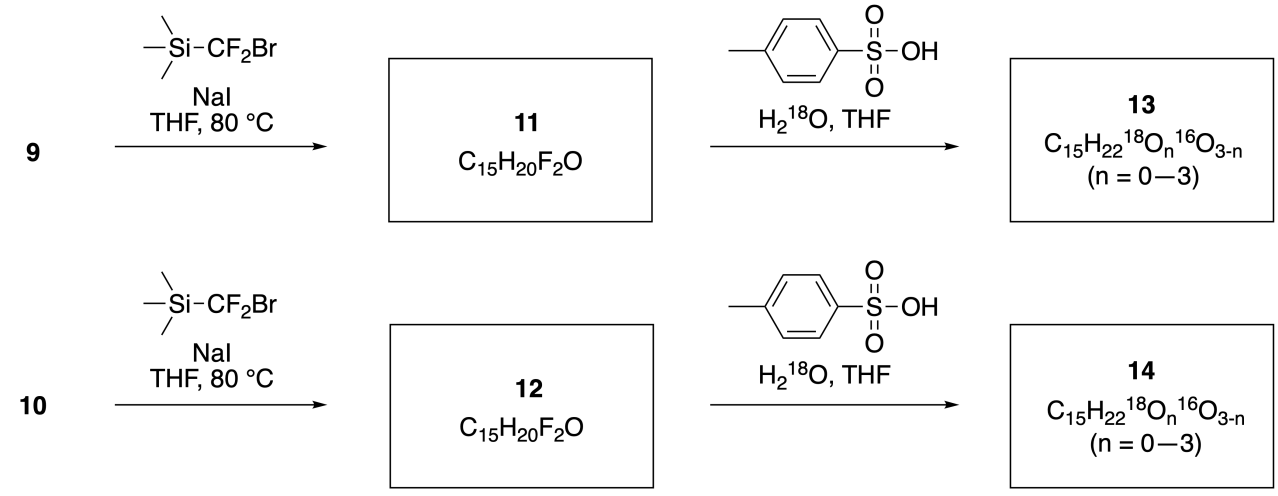


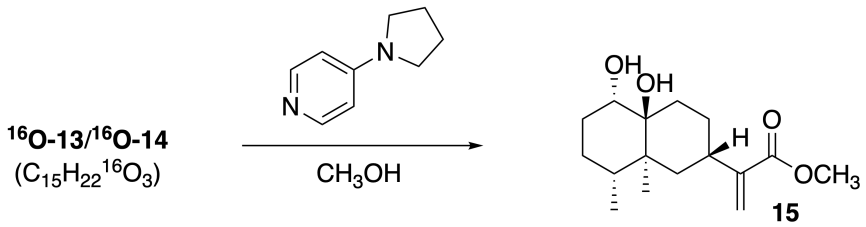

**A.1** **Draw** the structures of **2** and **6** and clearly identify the stereochemistry where necessary. 5pt

Then, ketone **4** is converted into ester **15**. Compound **8** (molecular weight: 188) retains all the stereocenters in **7**. Compounds **9** and **10** have five stereocenters and no carbon-carbon double bonds. Assume

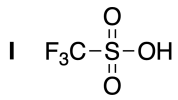
that $H_2{}^{18}O$ is used instead of $H_2{}^{16}O$ for the synthesis of $^{18}O$-labelled-linearifolianones **13** and **14** from **11** and **12**, respectively. Compounds **13** and **14** are $^{18}O$-labelled isotopomers. Ignoring isotopic labelling, both **13** and **14** provide the same product **15** with identical stereochemistry.

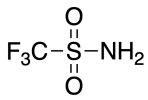


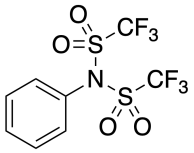



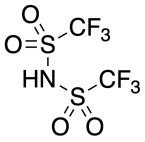



**A.2** **Choose** the appropriate structure for **A**. 2pt

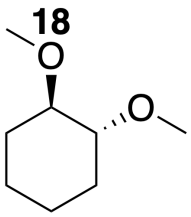
**I** 

**II** 

**III** 

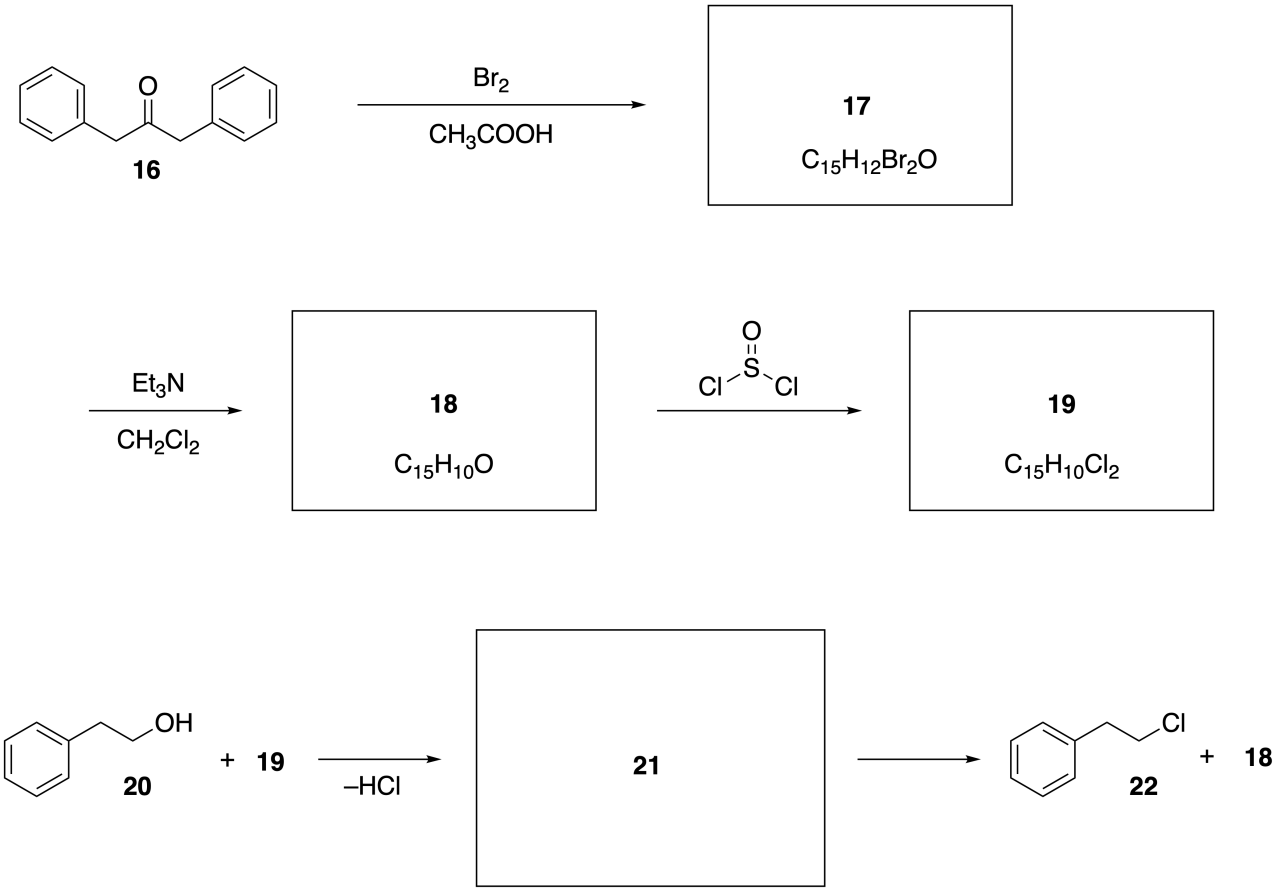
**IV** 

**A.3** **Draw** the structures of **8**–**14** and clearly identify the stereochemistry where necessary. Also, **indicate** the introduced $^{18}O$ atoms for **13** and **14** as shown in the example below. 19pt



## Part B

Compound **19** is synthesized as shown below. In relation to non-benzenoid aromaticity, **19** can be used as an activator for alcohols, and **20** was converted to **22** via ion-pair intermediate **21**. Although the formation of **21** was observed by NMR, **21** gradually decomposes to give **18** and **22**.




$^1$H NMR ($CD_3CN$, ppm) **20**: $\delta$ 7.4–7.2 (5H), 3.7 (2H), 2.8 (2H), 2.2 (1H)
**21**: $\delta$ 8.5–7.3 (15H), 5.5 (2H), 3.4 (2H)

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **Draw** the structures of **17**–**19** and **21**. Identifying the stereochemistry is not necessary. | 10pt |

# Игра с небензоидна ароматност

## Част A

**A.1** (5 pt)

| **2** (2 pt) | **6** (3 pt) |
|---|---|
| | |

**A.2** (2 pt)

**A.3** (19 pt)

**8** (3 pt)

**9** (2 pt)

**10** (2 pt)

**11** (2 pt)

**12** (2 pt)

**13** (4 pt)

**14** (4 pt)

## Част B

**B.1** (10 pt)

| | |
|---|---|
| **17** (2 pt) | **18** (2 pt) |
| **19** (3 pt) | **21** (3 pt) |

BGR-1 C-8 C-1

**BGR-1 C-8 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 8
## Cover sheet

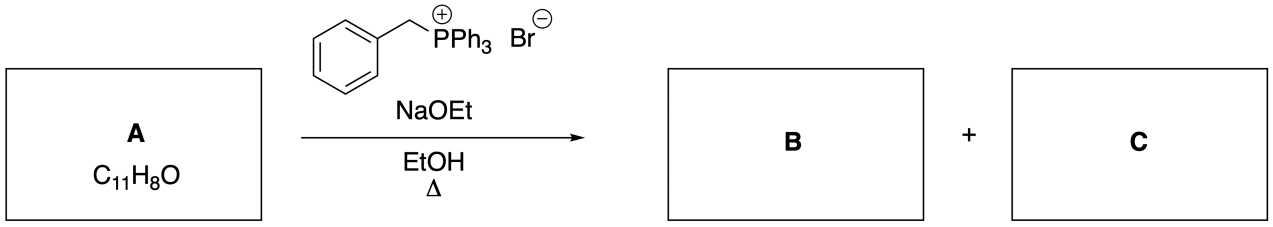
Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

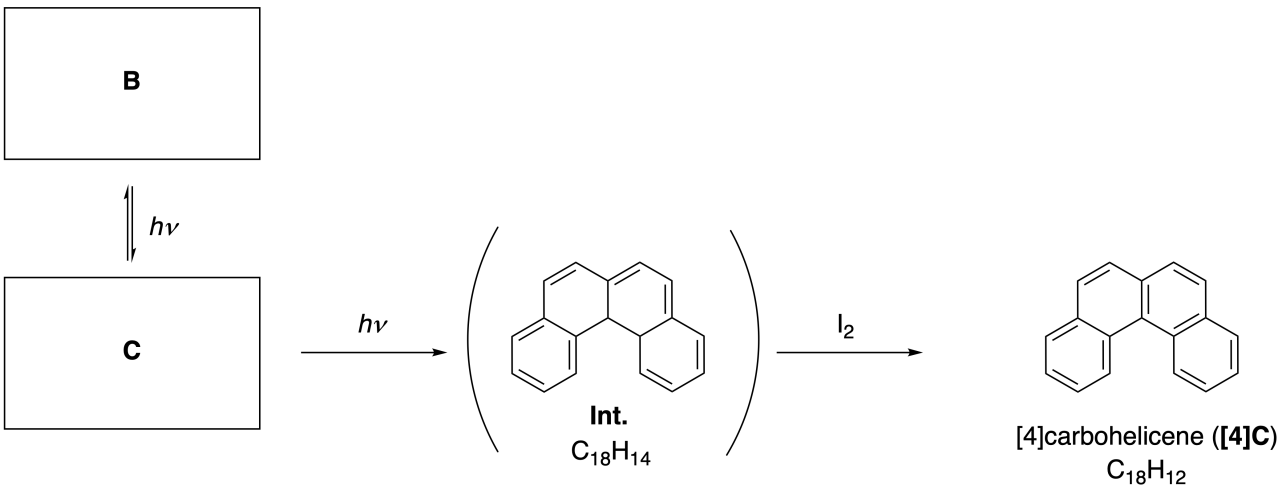
# Динамични органични молекули и тяхната хиралност

| 11 % от общия брой точки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | B.2 | **Общо** |
| Точки | 9 | 3 | 7 | 3 | 4 | **26** |
| Резултат | | | | | | |

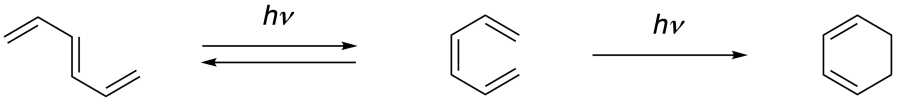
## Част A

Полицикличните ароматни въглеводороди с последователни орто-свързвания се наричат [n]carbohelicenes (където, n представлява броят на шестчленните пръстени) (виж по-долу). [4]Carbohelicene (**[4]C**)е получен посредством фотохимична реакция, както е показано по-долу, чрез интермедиат (**Int.**), който лесно се окислява от йод .




Фотохимичната реакция протича по начин, сходен на следващия пример.

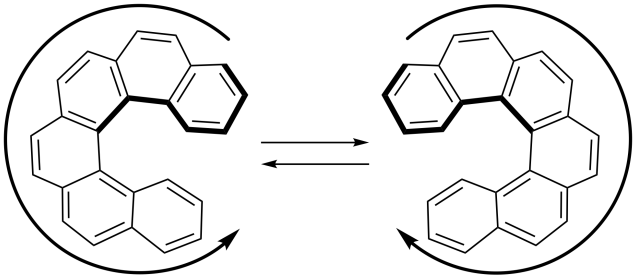


**Забележка: За цялата задача 8, рисувайте редуващи се прости и двойни връзки във вашите отговори, както е показано в примерите с carbohelicene. Не използвайте кръгчета за означаване на спрегнатите $\pi$ системи.**

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | **Напишете** структурите на **A**–**C**. Стереоизомерите трябва да се разграничат. | 9pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | Опитите да се синтезира [5]carbohelicene от същата фосфониева сол и подходящо изходно съединение е довело до образуванетоо само на следи от [5]carbohelicene, вместо продукта **D,** чиято молекулна маса е с 2 Da по-ниска от тази на [5]carbohelicene. Химичните отмествания в $^1$H ЯМР спектъра на **D** са представени по-долу. **Напишете** структурата на **D**.<br>**[D** ($\delta$, ppm in $CS_2$, r.t.), 8.85 (2H), 8.23 (2H), 8.07 (2H), 8.01 (2H), 7.97 (2H), 7.91 (2H)**]** | 3pt |

[5]- и по-големите [n]carbohelicenes имат спирална хиралност и взаимното превръщане между енантиомерите на тези helicenes е много бавно при стайна температура. Хиралността на [n]carbohelicenes се дефинира като (*M*) или (*P*), както е показано по-долу.



(*M*) (*P*)

[n]Carbohelicenes с n по-голямо от 4 могат да бъдат разделени на енантиомери чрез хирална колонна хроматография, разработена от Prof. Yoshio Okamoto.

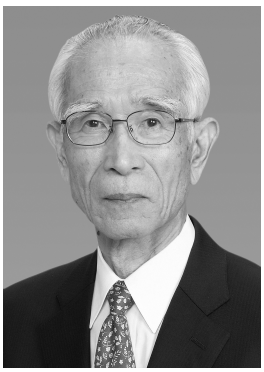
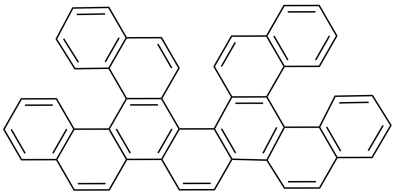


Photo courtesy: The Japan Prize Foundation

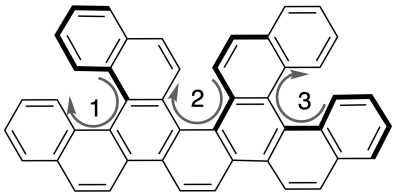
# Q8-3

Bulgarian (Bulgaria)

Мулти-Helicenes (Multiple helicenes), са молекули, които съдържат две или повече helicene-подобни структури. В един Мулти-Helicene, поради неговата спиралната хиралност, съществуват няколко стереоизомери. Например, съединение **E** съдържа три [5]carbohelicene-подобни фрагмента в една молекула. Един от стереоизомерите е описан като (*P*, *P*, *P*), както е показано по-долу.

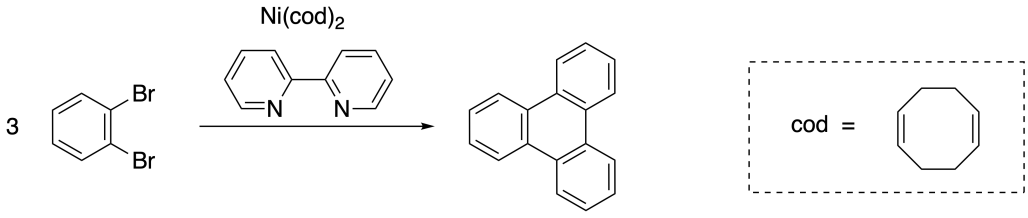


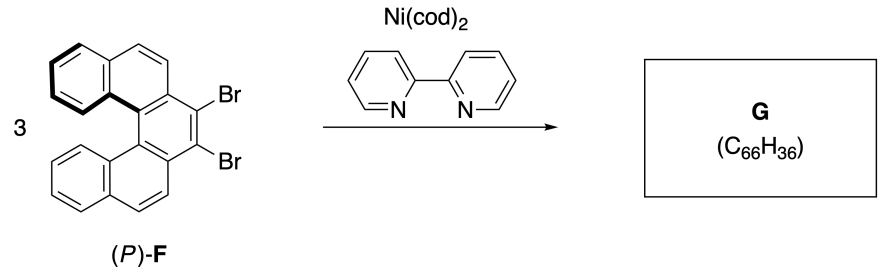
**E**




(1, 2, 3) = (*P*, *P*, *P*)

**A.3** Тримеризацията на 1,2-dibromobenzene, в присъствие на никел генерира triphenylene. Когато същата реакция се приложи към енантиомер на **F**, (*P*)-**F**, се получава мулти-helicene **G** ($C_{66}H_{36}$). Като имате предвид, че взимно превръщане на стереоизомерите не протича в хода на реакцията, **идентифицирайте всички** възможни стереоизомери на **G,** образувани при този процес, без дублиране. Един изомер трябва да бъде начертан напълно, с хиралността, определена както в примера по-горе, с цифрови надписи; другите стереоизомери трябва да бъдат изброени с номера на позициите и с надписите *M* и *P,* според една и съща номерация. Например, другите стереоизомери на **E** трябва да бъдат изброени като (1, 2, 3) = (*P*, *M*, *P*), (*P*, *M*, *M*), (*P*, *P*, *M*), (*M*, *M*, *M*), (*M*, *M*, *P*), (*M*, *P*, *P*), и (*M*, *P*, *M*). 7pt

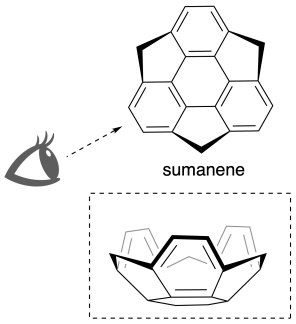



(*P*)-**F**

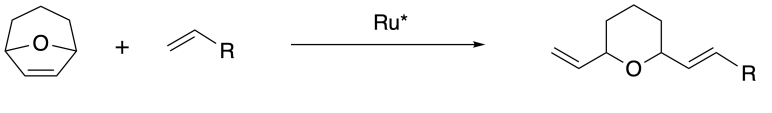
## Част В

Sumanene е въглеводород с форма на чаша, за който за първи е докладвано през 2003 г. в Япония. Името"sumanene" произлиза от думата "suman" на санскрит-хинди, която означава слънчоглед. Синтезът на sumanene е осъществен чрез реакционна последователнст, която се състои от метатеза с отваряне на цикъла и затваряне на цикъла.



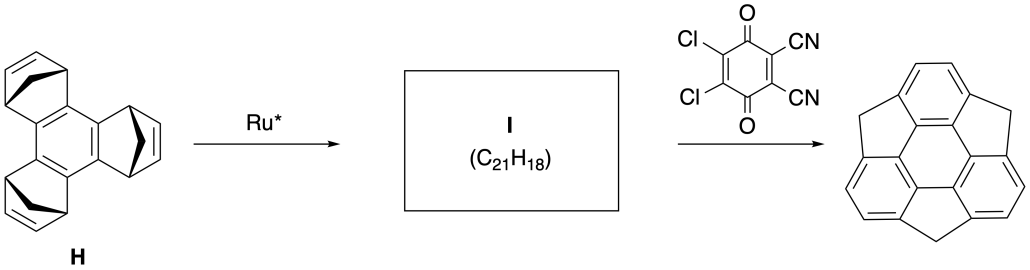



Типичните реакции на метатеза, катализирани от рутениев катализатор (Ru*), са показани по-долу.



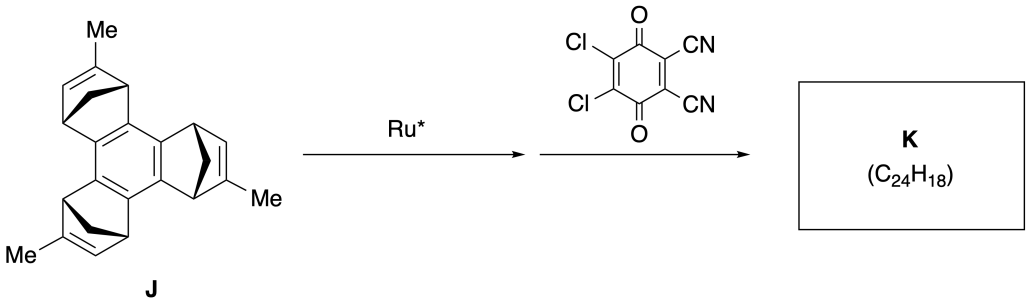







H

| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **<u>Напишете</u>** структурата на интермедиата **I** (не се изисква неговата стереохимия). | 3pt |




**J**

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | Като се започне от оптичноактивния прекурсор **J**, същата реакционна последователност дава оптически активното производно на sumanene **K**. Стереоцентровете в **J** не претърпяват инверсия по време на реакцията на метатеза. **Напишете** структурата на **K** със съответстващата стереохимия. | 4pt |

# Q8-1

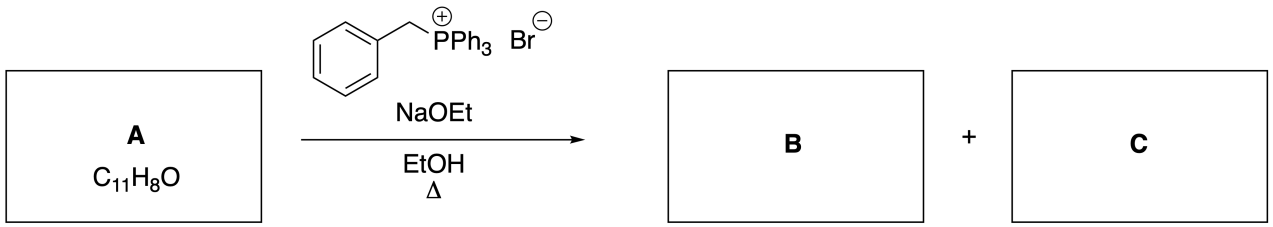
English (Official)

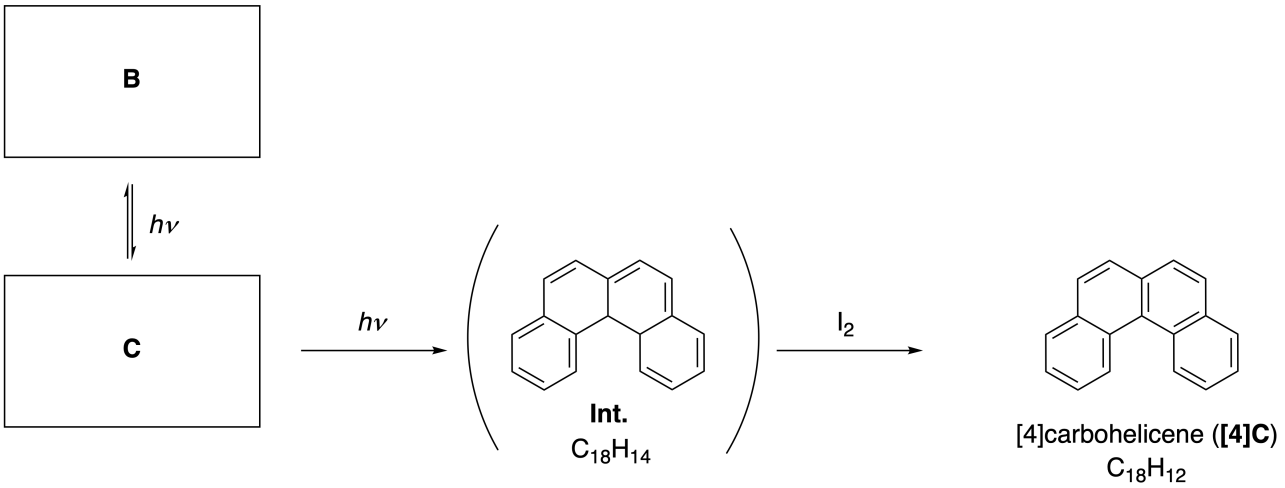
# Dynamic Organic Molecules and Their Chirality

| 11 % of the total | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | B.1 | B.2 | **Total** |
| Points | 9 | 3 | 7 | 3 | 4 | **26** |
| Score | | | | | | |

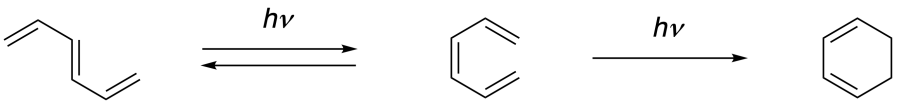
## Part A

Polycyclic aromatic hydrocarbons with successive ortho-connections are called [n]carbohelicenes (here, n represents the number of six-membered rings) (see below). [4]Carbohelicene (**[4]C**) is efficiently prepared by a route using a photoreaction as shown below, via an intermediate (**Int.**) that is readily oxidized by iodine.




The photoreaction proceeds in a manner similar to the following example.

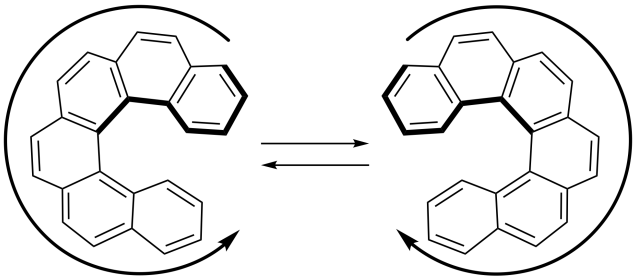


**Note: For all of Question 8, please draw alternating single and double bonds in your answers to the problems as depicted in the examples of carbohelicene. Do not use circles for conjugated $\pi$ systems.**

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | **Draw** the structures of **A**–**C**. Stereoisomers should be distinguished. | 9pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | Attempts to synthesize [5]carbohelicene from the same phosphonium salt and an appropriate starting compound resulted in the formation of only a trace amount of [5]carbohelicene, instead affording product **D** whose molecular weight was 2 Da lower than that of [5]carbohelicene. The $^1$H NMR chemical shifts of **D** are listed below. **Draw** the structure of **D**.<br>**[D** ($\delta$, ppm in $CS_2$, r.t.), 8.85 (2H), 8.23 (2H), 8.07 (2H), 8.01 (2H), 7.97 (2H), 7.91 (2H)**]** | 3pt |

[5]- and larger [n]carbohelicenes have helical chirality and interconversion between enantiomers of these helicenes is significantly slow at room temperature. The chirality of [n]carbohelicenes is defined as (*M*) or (*P*) as shown below.



(*M*) (*P*)

[n]Carbohelicenes with n larger than 4 can be enantiomerically separated by a chiral column chromatography, which was developed by Prof. Yoshio Okamoto.

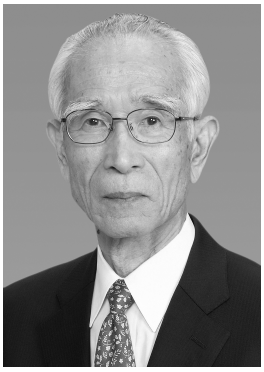
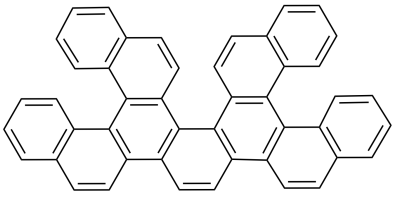
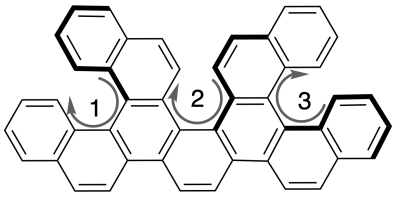


Photo courtesy: The Japan Prize Foundation

Multiple helicenes are molecules that contain two or more helicene-like structures. If its helical chirality is considered, several stereoisomers exist in a multiple helicene. For example, compound **E** contains three [5]carbohelicene-like moieties in one molecule. One of the stereoisomers is described as (*P*, *P*, *P*) as shown below.

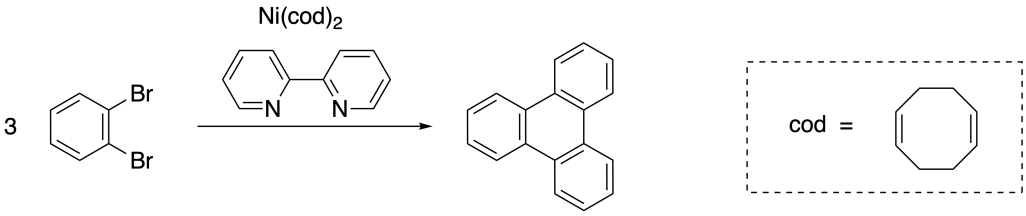


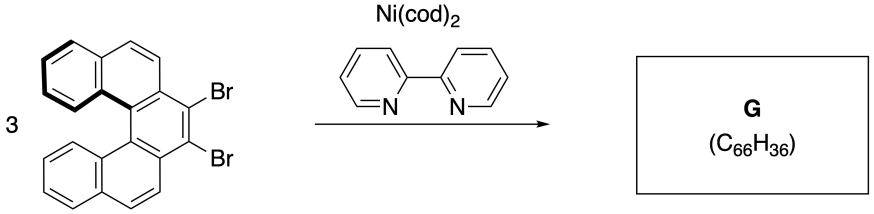
**E**




(1, 2, 3) = (*P*, *P*, *P*)

**A.3** The nickel-mediated trimerization of 1,2-dibromobenzene generates triphenylene. When the same reaction is applied to an enantiomer of **F**, (*P*)-**F**, multiple helicene **G** ($C_{66}H_{36}$) is obtained. Given that interconversion between stereoisomers does not occur during the reaction, **identify all** the possible stereoisomers of **G** formed in this process, without duplication. As a reference, one isomer should be drawn completely with the chirality defined as in the example above, with numerical labels; the other stereoisomers should be listed with location numbers and *M* and *P* labels according to the same numbering. For instance, the other stereoisomers of **E** should be listed as (1, 2, 3) = (*P*, *M*, *P*), (*P*, *M*, *M*), (*P*, *P*, *M*), (*M*, *M*, *M*), (*M*, *M*, *P*), (*M*, *P*, *P*), and (*M*, *P*, *M*). 7pt

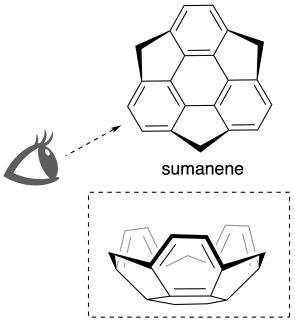



(*P*)-**F**

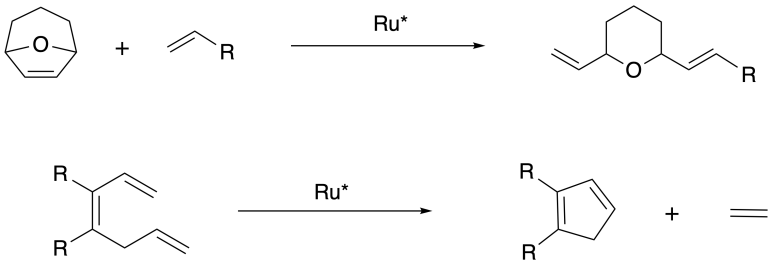
## Part B

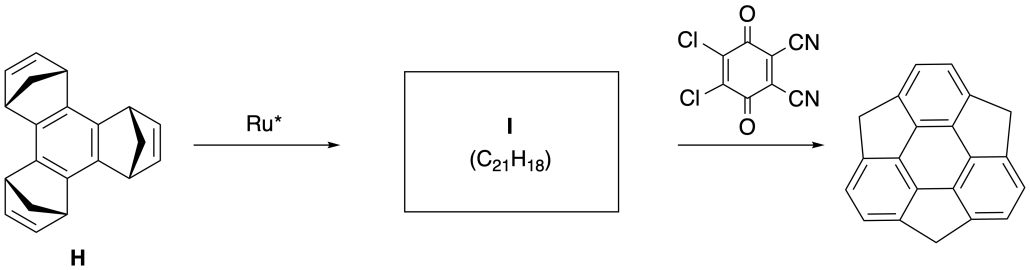
Sumanene is a bowl-shaped hydrocarbon that was first reported in Japan in 2003. The name "sumanene" derives from a Sanskrit-Hindi word "suman" that means sunflower. The synthesis of sumanene was achieved by a reaction sequence that consists of a ring-opening and a ring-closing metathesis.



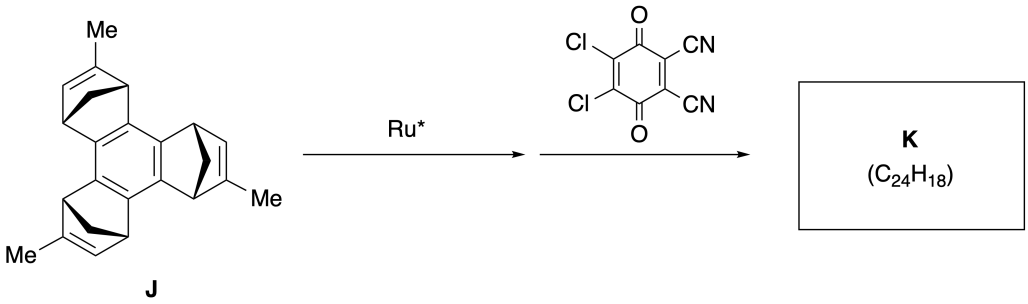



Representative metathesis reactions catalyzed by a ruthenium catalyst (Ru*) are shown below.




| | | |
|---|---|---|
| **B.1** | **Draw** the structure of intermediate **I** (its stereochemistry is not required). | 3pt |




**J**

| | | |
|---|---|---|
| **B.2** | Starting from the optically active precursor **J**, the same reaction sequence gives the optically active sumanene derivative **K**. The stereocenters in **J** suffer no inversion during the metathesis reaction. **Draw** the structure of **K** with the appropriate stereochemistry. | 4pt |

# Динамични органични молекули и тяхната хиралност

## Част А

**A.1** (9 pt)

| **A** (3 pt) | **B** (3 pt) | **C** (3 pt) |
|---|---|---|
| | | |

**A.2** (3 pt)

**A.3** (7 pt)

## Част В

**B.1** (3 pt)

**B.2** (4 pt)

BGR-1 C-9 C-1

**BGR-1 C-9 C**
Pavel Nikolov

# IChO
# Problem 9
## Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

# Q9-1

Bulgarian (Bulgaria)

## Харесване и нехаресване на капсулата

| 10 % от общия брой точки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Въпрос | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | A.5 | **Общо** |
| Точки | 13 | 2 | 2 | 3 | 3 | **23** |
| Резултат | | | | | | |

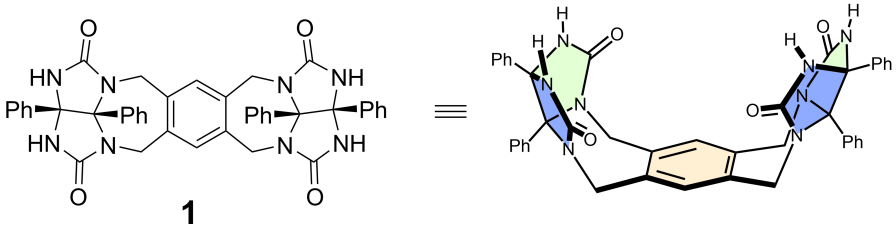
Добрите деца не правят това, но ако разпорите тенис топка, можете да я разглобите на две U-образни парчета.



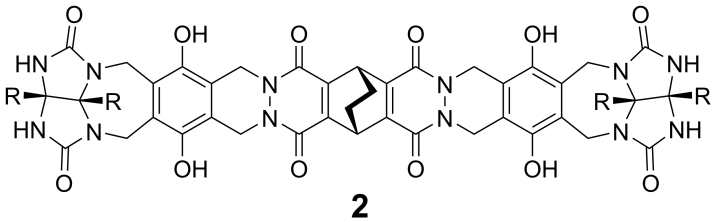
Въз основа на тази идея, съединенията **1** и **2** са синтезирани като U-образни молекули с различни размери. Съединение **3** е получено като сравнение на **1** и е изследвано поведението на капсулиране на тези съединения .

# Q9-2

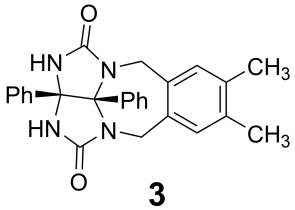
Bulgarian (Bulgaria)



**1**

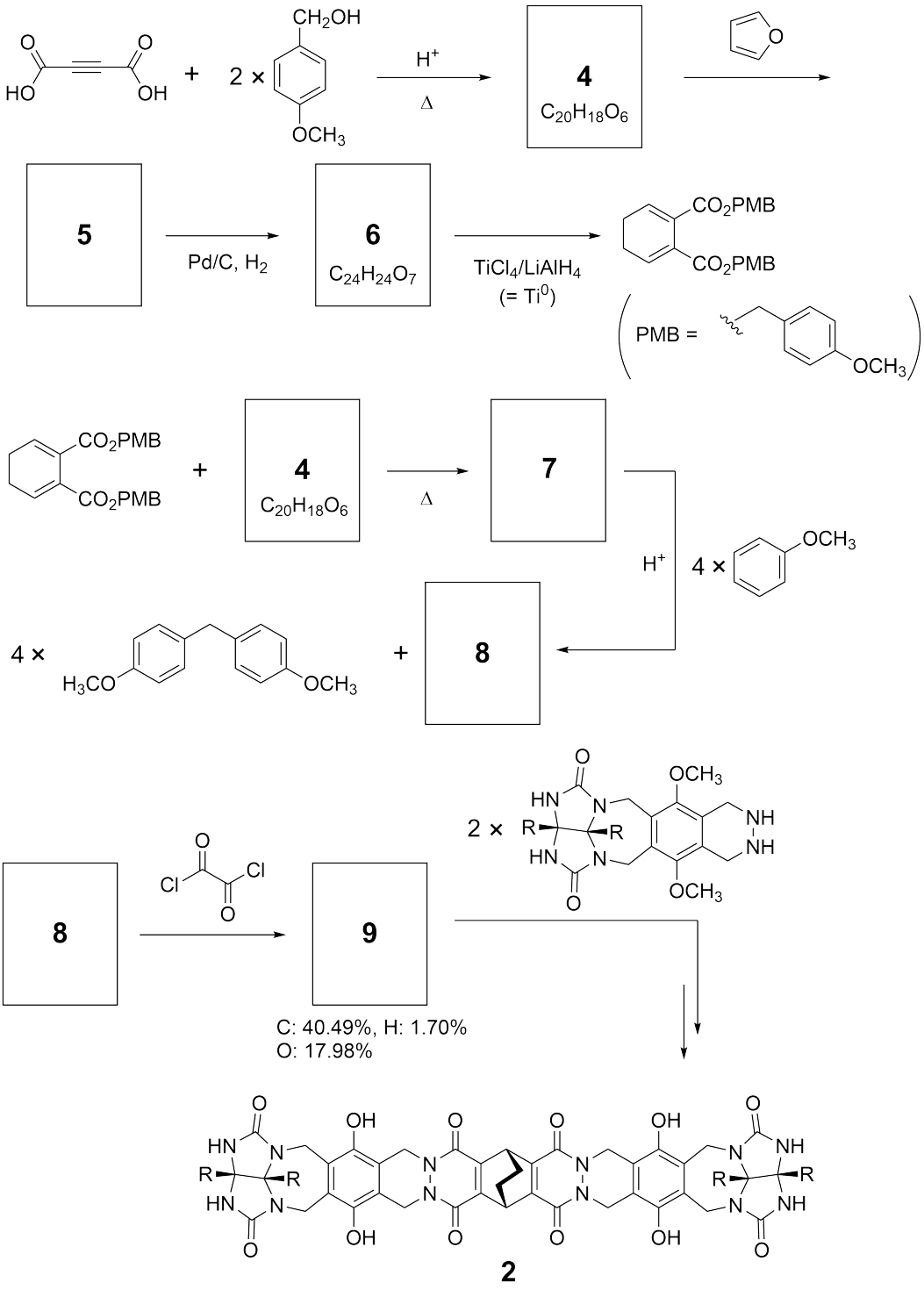


**2**



**3**

Синтетичният път за получаване на **2** е показан по-долу. Масовият елементен състав на съединение **9** е: C 40.49%, H 1.70% и O 17.98%.




| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | **Напишете** структурите на съединения **4**–**9**; стереохимията може да бъде пренебрегната. Използвайте "PMB" като заместител вместо да изписвате цялата структура на *p*-methoxybenzyl група, показана в схемата по-горе. | 13pt |

В мас спектъра на **1**, йонният пик, съответстващ на неговия димер ($\mathbf{1}_2$) се вижда ясно, докато йонният пик за $\mathbf{3}_2$ не се наблюдава в спектъра на **3**. В $^1$H ЯМР спектъра на разтвор на $\mathbf{1}_2$, всички NH протони, получени от **1** са наблюдавани като химически еквивалентни, и тяхното химично отместване е значително се различава от това на NH протоните на **3**. Тези данни показват, че за да се образува димерна капсула, между NH фрагментите от **1** и атомите **X** от друга молекула на **1,** се образуват водородни връзки.

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | **Оградете** всички подходящ(и) атом(и) **X** в **1**. | 2pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.3** | **Посочете** броя на водородните връзки в димерната капсула ($\mathbf{1}_2$). | 2pt |

Димерната капсула на **1** ($\mathbf{1}_2$) има вътрешно пространство, в което може да се капсулира подходяща малка молекула Z. Това явление се изразява със следното уравнение:

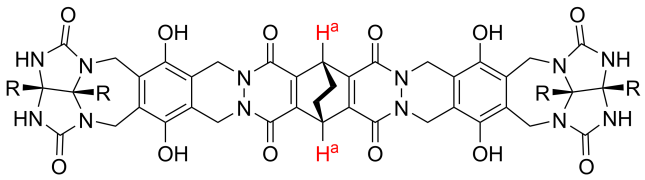
$$Z + \mathbf{1}_2 \rightarrow Z@\mathbf{1}_2 \quad (1)$$

Равновесната константа за капсулирането на Z в $\mathbf{1}_2$ е дадена по-долу:

$$K_a = \frac{[Z@\mathbf{1}_2]}{[Z][\mathbf{1}_2]} \quad (2)$$

Капсулирането на молекула в капсула може да бъде проследено с ЯМР спектроскопия. Например, $\mathbf{1}_2$ в $C_6D_6$ дава различни сигнали в $^1$H NMR спектъра преди и след добавяне на $CH_4$.

Съединението **2** също образува твърда и по-голяма димерна капсула ($\mathbf{2}_2$). $^1$H NMR спектърът на $\mathbf{2}_2$ е снет в $C_6D_6$, $C_6D_5F$ и в сместа от разтворители $C_6D_6$/$C_6D_5F$ , като всички останали условия са запазени постоянни. Химичните отмествания на $H^a$ протона на **2** в горните разтворители са обобщени по-долу и не се наблюдават никакви други сигнали на $H^a$ в **2**, с изключение на описаните. Приема се, че вътрешността на капсулата винаги е изпълнена с възможно най-голям брой молекули разтворител и че всеки сигнал съответства на един химичен вид на запълнента капсула.



**2**

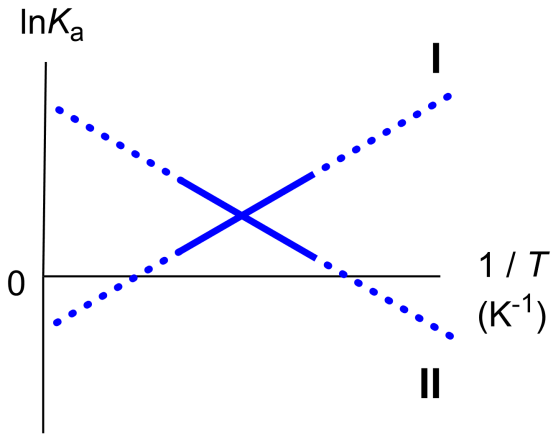
| разтворител | $\delta$ (ppm) of $H^a$ |
|---|---|
| $C_6D_6$ | 4.60 |
| $C_6D_5F$ | 4.71 |
| $C_6D_6$ / $C_6D_5F$ | 4.60, 4.71, 4.82 |

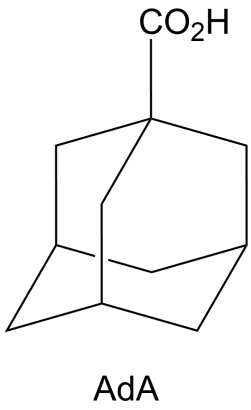
**A.4** **Определете** броя на молекулите $C_6D_6$ и $C_6D_5F$ , капсулирани в $\mathbf{2}_2$ , даващи всеки $H^a$ сигнал. 3pt

$^1$H NMR измерванията в $C_6D_6$ показват, че $\mathbf{2}_2$ може да включва една молекула 1-adamantanecarboxylic acid (AdA), и стойностите на асоциационната константата ($K_a$), представена по-долу, са определени за различни температури. [solvent@$\mathbf{2}_2$] означава химичен вид, съдържащ една или повече молекули на разтворителя.

$$K_a = \frac{[Z@\mathbf{2}_2]}{[Z][solvent@\mathbf{2}_2]} \quad (3)$$

Аналогично, стойностите на $K_a$ за $CH_4$ и $\mathbf{1}_2$ дадени като уравнение (eq (2)) при различни температури в $C_6D_6$ също са определени с $^1$H NMR измервания. Графиките на двете константи на асоциация ( като ln $K_a$ в зависимост от 1/$T$) са показани по-долу.




Никаква молекула $C_6D_6$ не се капсулира в $\mathbf{1}_2$. В линия **II**, изменението на ентропията ($\Delta S$) е ( 1 ) и изменението на енталпията ($\Delta H$) е ( 2 ), показващо че движещата сила за капсулирането в линия **II** е ( 3 ). Следователно, линия **I** съответства на ( 4 ) и линия **II** съответства на ( 5 ).

**A.5** **Изберете** правилните опции за празните места (1)–(5) от възможностите, дадени в колоните A и B. 3pt

| | A | B |
|---|---|---|
| (1) | положителен | отрицателен |
| (2) | положителен | отрицателен |
| (3) | $\Delta S$ | $\Delta H$ |
| (4) | $\mathbf{1}_2$ и $CH_4$ | $\mathbf{2}_2$ и AdA |
| (5) | $\mathbf{1}_2$ и $CH_4$ | $\mathbf{2}_2$ и AdA |

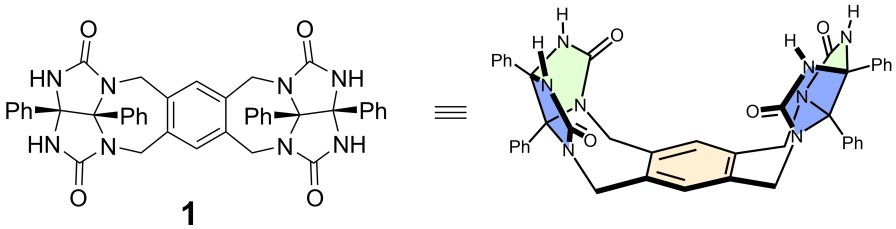
# Likes and Dislikes of Capsule

| 10 % of the total | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Question | A.1 | A.2 | A.3 | A.4 | A.5 | **Total** |
| Points | 13 | 2 | 2 | 3 | 3 | **23** |
| Score | | | | | | |

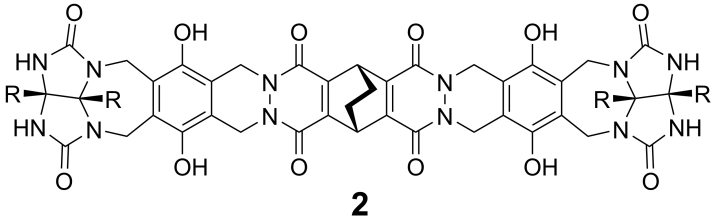
Good kids don't do this, but if you unseam a tennis ball, you can disassemble it into two U-shaped pieces.



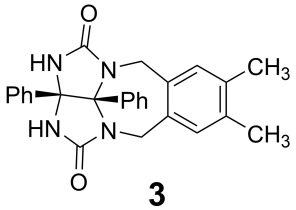
Based on this idea, compounds **1** and **2** were synthesized as U-shaped molecules with different sizes. Compound **3** was prepared as a comparison of **1** and the encapsulation behavior of these compounds was investigated.



**1**

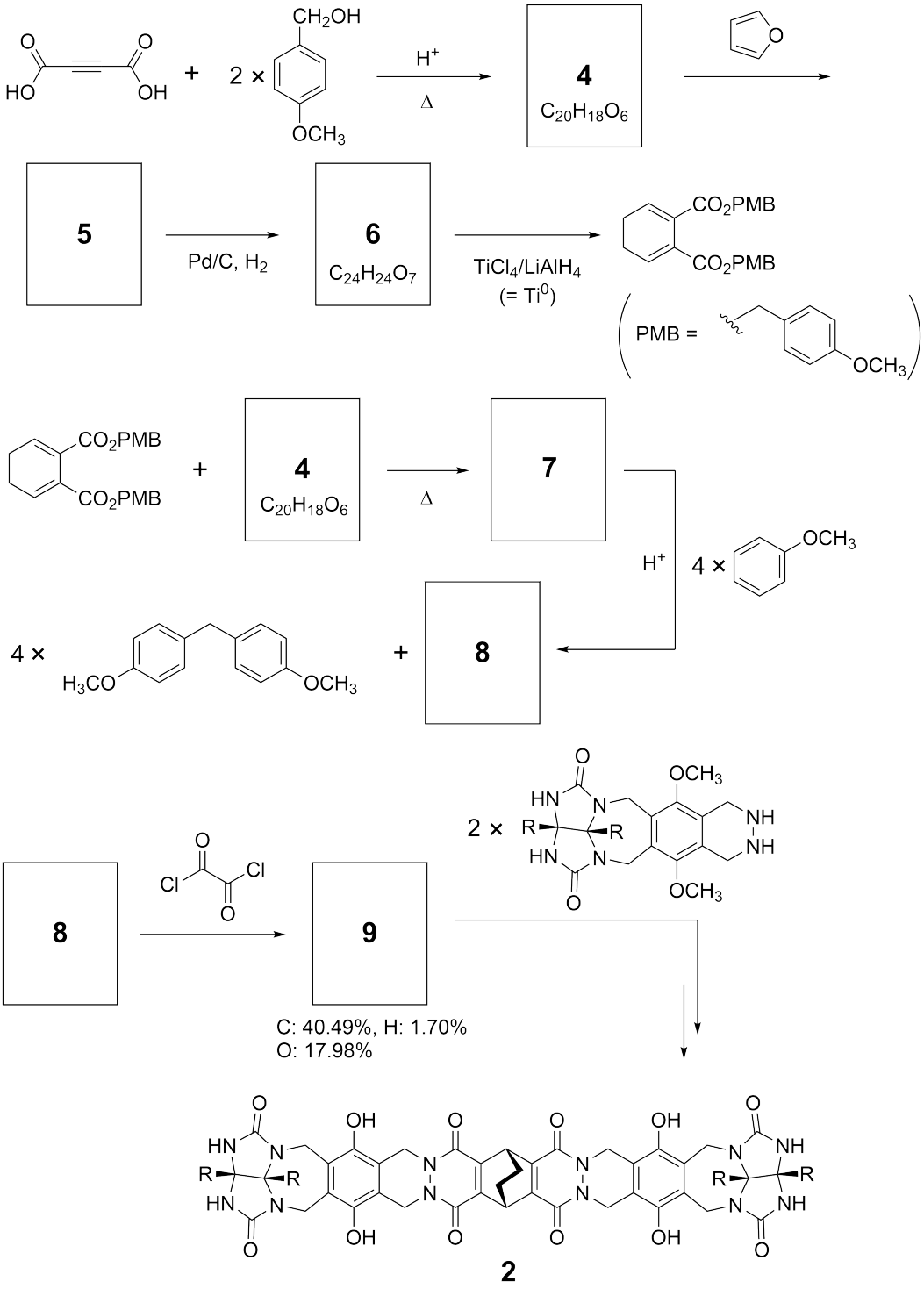


**2**



**3**

The synthetic route to **2** is shown below. The elemental composition of compound **9**: C; 40.49%, H; 1.70%, and O; 17.98% by mass.




**2**

| | | |
|---|---|---|
| **A.1** | **Draw** the structures of **4**–**9**; the stereochemistry can be neglected. Use "PMB" as a substituent instead of drawing the whole structure of *p*-methoxybenzyl group shown in the scheme above. | 13pt |

In the mass spectrum of **1**, the ion peak corresponding to its dimer ($\mathbf{1}_2$) was clearly observed, whereas an ion peak for $\mathbf{3}_2$ was not observed in the spectrum of **3**. In the $^1$H NMR spectra of a solution of $\mathbf{1}_2$, all the NH protons derived from **1** were observed to be chemically equivalent, and their chemical shift was significantly different from that of the NH protons of **3**. These data indicate that hydrogen bonds are formed between the NH moieties of **1** and atoms **X** of another molecule of **1** to form the dimeric capsule.

| | | |
|---|---|---|
| **A.2** | **Circle** all the appropriate atom(s) **X** in **1**. | 2pt |

| | | |
|---|---|---|
| **A.3** | **Give** the number of the hydrogen bonds in the dimeric capsule ($\mathbf{1}_2$). | 2pt |

The dimeric capsule of **1** ($\mathbf{1}_2$) has an internal space wherein an appropriate small molecule Z can be encapsulated. This phenomenon is expressed by the following equation:

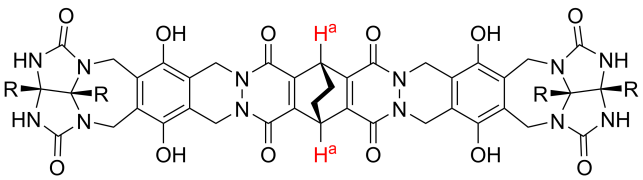
$$\mathrm{Z} + \mathbf{1}_2 \rightarrow \mathrm{Z}@\mathbf{1}_2 \tag{1}$$

The equilibrium constant of the encapsulation of Z into $\mathbf{1}_2$ is given as below:

$$K_\mathrm{a} = \frac{[\mathrm{Z}@\mathbf{1}_2]}{[\mathrm{Z}][\mathbf{1}_2]} \tag{2}$$

Encapsulation of a molecule into a capsule could be monitored by NMR spectroscopy. For example, $\mathbf{1}_2$ in $C_6D_6$ gave different signals in the $^1$H NMR spectra before and after addition of $CH_4$.

Compound **2** also forms a rigid and larger dimeric capsule ($\mathbf{2}_2$). The $^1$H NMR spectrum of $\mathbf{2}_2$ was measured in $C_6D_6$, $C_6D_5F$, and a $C_6D_6$/$C_6D_5F$ solvent mixture, with all other conditions being kept constant. The chemical shifts for the $H^a$ proton of **2** in the above solvents are summarized below, and no other signals from the $H^a$ in **2**, except for the listed, were observed. Assume that the interior of the capsule is always filled with the largest possible number of solvent molecules and that each signal corresponds to one species of the filled capsule.




**2**

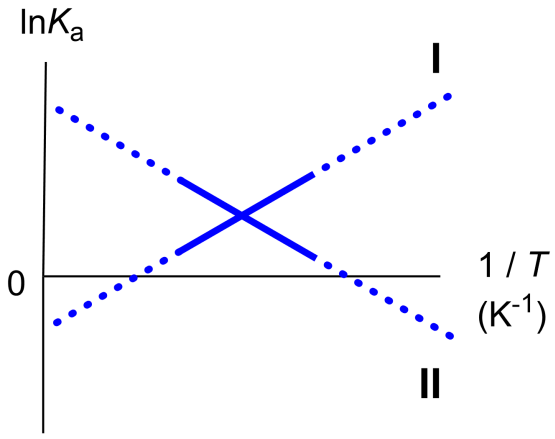
| solvent | $\delta$ (ppm) of $H^a$ |
|---|---|
| $C_6D_6$ | 4.60 |
| $C_6D_5F$ | 4.71 |
| $C_6D_6$ / $C_6D_5F$ | 4.60, 4.71, 4.82 |

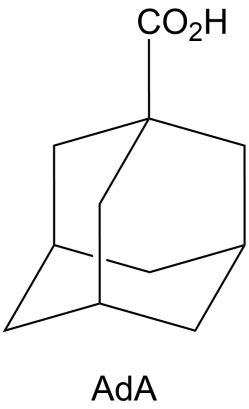
**A.4** **Determine** the number of $C_6D_6$ and $C_6D_5F$ molecules encapsulated in $\mathbf{2}_2$ giving each $H^a$ signal. 3pt

$^1$H NMR measurements in $C_6D_6$ revealed that $\mathbf{2}_2$ can incorporate one molecule of 1-adamantanecarboxylic acid (AdA), and the association constants ($K_a$) which are expressed below were determined for various temperatures. [solvent@$\mathbf{2}_2$] denotes a species containing one or more solvent molecules.

$$K_a = \frac{[Z@\mathbf{2}_2]}{[Z][\text{solvent}@\mathbf{2}_2]} \tag{3}$$

Similarly, the $K_a$ values of $CH_4$ and $\mathbf{1}_2$ given as eq (2) at various temperatures in $C_6D_6$ were also determined by $^1$H NMR measurements. The plots of the two association constants (as ln $K_a$ vs 1/$T$) are shown below.




No $C_6D_6$ molecule is encapsulated in $\mathbf{1}_2$. In line **II**, the entropy change ($\Delta S$) is ( 1 ) and enthalpy change ($\Delta H$) is ( 2 ), indicating that the driving force for the encapsulation in line **II** is ( 3 ). Therefore, line **I** corresponds to ( 4 ), and line **II** corresponds to ( 5 ).

**A.5** **Choose** the correct options in gaps (1)–(5) in the following paragraph from A and B. 3pt

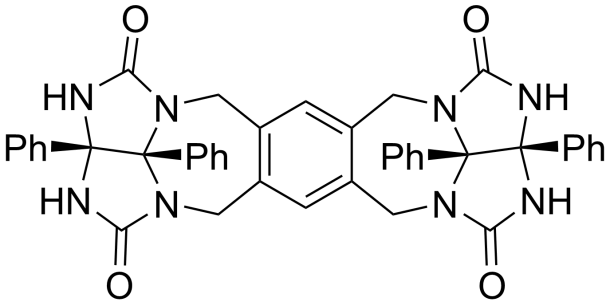
| | A | B |
|---|---|---|
| (1) | positive | negative |
| (2) | positive | negative |
| (3) | $\Delta S$ | $\Delta H$ |
| (4) | $\mathbf{1}_2$ and $CH_4$ | $\mathbf{2}_2$ and AdA |
| (5) | $\mathbf{1}_2$ and $CH_4$ | $\mathbf{2}_2$ and AdA |

# Харесване и нехаресване на капсулата

**A.1** (13 pt)

| | |
|---|---|
| **4** (2 pt) | **5** (3 pt) |
| **6** (2 pt) | **7** (2 pt) |
| **8** (2 pt) | **9** (2 pt) |

**A.2** (2 pt)




**A.3** (2 pt)

**A.4** (3 pt)

| $\delta$ (ppm) на H[a] | брой на $C_6D_6$ | брой на $C_6D_5F$ |
|---|---|---|
| 4.60 ppm | | |
| 4.71 ppm | | |
| 4.82 ppm | | |

**A.5** (3 pt)

(1) : (2) : (3) :

(4) : (5) :