

**MATEMATICKO–FYZIKÁLNA FAKULTA
UNIVERZITY KOMENSKÉHO
BRATISLAVA**

Katedra jadrovej fyziky

**Simulácia produkcie a transportu
 γ –žiarenia v kométach**

Diplomová práca

1998

Diplomant: Pavol Domin

Školiteľ: Doc. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.

Prehlasujem, že som predkladanú diplomovú
prácu vypracoval samostatne za použitia liter-
atúry uvedenej v zozname.

Na tomto mieste by som sa chcel poďakovať
Doc. RNDr. Jozefovi Masarikovi, DrSc. za po-
moc a spoluprácu.

Ďalej ďakujem svojej rodine a priateľom, ktorí mi
vytvorili vhodné podmienky na napísanie tejto
práce.

Obsah

1	Úvod	6
2	Súčasný stav problematiky	9
2.1	Názory na chemické zloženie komét	9
2.2	Meranie γ -žiarenia z planét	9
2.3	Prístupy k výpočtu γ -emisie	10
2.4	Expedície, ktoré sa plánujú	12
3	Ciele práce	14
4	Zvolené metódy	15
4.1	Model LCS	15
4.2	Produkcia a transport γ -kvánt	20
5	Výsledky	24
5.1	Homogénna kométa	24
5.1.1	Použité parametre	24
5.1.2	Časy potrebné na meranie s danou chybou, chyby merania pre daný čas merania	25
5.2	Vrstvová kométa	33
5.2.1	Použité parametre	33
5.2.2	Nasimulované spektrá	33
5.2.3	Vplyv hrúbky vrstvy na produkciu γ -kvánt	36
5.2.4	Časy potrebné na meranie s danou chybou, chyby merania pre daný čas merania pre prípad vrstvovej kométy	43
5.3	Vplyv reaktora na produkciu γ -kvánt	49
5.3.1	Použité parametre	49
5.3.2	Produkcia γ -kvánt v kométe vplyvom reaktorových neu- trónov	50

<i>OBSAH</i>	5
5.3.3 Produkcia γ -kvánt v obale reaktora	52
5.4 Chyby v našich simuláciách	54
6 Záver	56

1 Úvod

Vesmír priťahoval záujem ľudí už od nepamäti. Medzi najpozoruhodnejšie objekty na oblohe nepochybne patria kométy, najmä vďaka chvostu–kome, ktorú väčšina komét pri priblížení k Slnku vytvára.

Pochopenie mnohých fenoménov komy je jedným dôvodov skúmania komét. Všeobecne sa predpokladá, že kométy sú rovnakého pôvodu ako náš planetárny systém a že ich vznik je spätý s najrannejšími štádiami vzniku slnečnej sústavy. Z tohto hľadiska je omnoho dôležitejší druhý dôvod skúmania komét – pochopenie ich vzniku a na základe toho prehĺbenie našich poznatkov o formovaní slnečnej sústavy. Dôležitým faktorom pri skúmaní komét je určenie fyzikálnych vlastností ich jadra. Priame pozorovanie jadra komét je však obtiažne vzhľadom na to, že keď sa kométa priblíži na pozorovateľnú vzdialenosť, je už jadro zahalené v kome. Hoci družice vyslané k jadrú kométy P/Halley nazhromaždili množstvo informácií [1], väčšina vedomostí o jadre je stále v hypotetickom štádiu.

Aby sa získali podrobné dáta o kométach, Európska Kozmická Agentúra (ESA) plánuje expedíciu ROSETTA, v rámci ktorej bude na povrch kométy Virtanen vysadený balík experimentálnych zariadení, medzi ktorými sa predpokladá aj γ –spektrometer. Výskyt čiary s danou energiou v spektre nameranom na povrchu kométy väčšinou jednoznačne identifikuje prítomnosť nuklidu produkujúceho zodpovedajúce γ –kvantum a intenzita tejto čiary je úmerná množstvu daného nuklidu v časti materiálu pod spektrometrom. Namerané γ –spektrum teda môže byť použité k určeniu chemického zloženia povrchu sledovaného objektu. V minulosti analýzu γ –spektier komplikovalo slabé energetické rozlíšenie použitých detektorov. V súčasnosti sa však γ –spektrometria ukazuje ako veľmi efektívny spôsob určovania chemického zloženia vesmírnych objektov, vďaka možnosti použitia HPGe detektorov, ktoré sa vyznačujú vynikajúcim energetickým rozlíšením.

Produkcia γ –kvánt v kométe môže byť zapríčinená pricipiálne dvoma spôsobmi – rozpadom prirodzene rádioaktívnych izotopov a deexcitáciou nuklidov

excitovaných v jadrových reakciách s časticami kozmického žiarenia. Prirodzene rádioaktívne prvky Th, K, U a prvky z ich rozpadových radov emitujú γ -kvantá, ktorých toky sú jednoduchou funkciou základných jadrových parametrov ako je polčas rozpadu, izotopické zloženie prvku, atď. a preto je pomerne jednoduché tieto toky vypočítať. Z tohto dôvodu sa nimi v tejto práci nezaobráame. Naopak, charakteristika tokov fotónov produkovaných vplyvom kozmického žiarenia je komplikovaná, kvôli veľkému počtu parametrov od ktorých je závislá.

Kozmické žiarenie sa skladá jednak z častíc, ktorých zdrojom je Slnko a jednak z častíc, ktoré nepochádzajú z našej Slnečnej sústavy. Slnečné kozmické žiarenie v tejto práci neberieme do úvahy, pretože jeho príspevok v produkcii γ -kvánt je malý z nasledujúcich príčin:

1. Meranie γ -žiarenia z kométy sa uskutoční vo veľkej vzdialenosti od Slnka ($\sim 3AU$) a keďže dlhodobý priemerný tok častíc slnečného kozmického žiarenia klesá s druhou mocninou vzdialenosti od Slnka ich vplyv na tvorbu γ -kvánt je malý.
2. Častice slnečného kozmického žiarenia majú relatívne nízke energie a preto produkujú málo γ -kvánt.

Hlavný vplyv na tvorbu γ -kvánt majú častice galaktického kozmického žiarenia. Galaktické kozmické žiarenie sa skladá z 87% z protónov, 12% tvoria α -častice a zvyšok sú ťažšie jadrá. Diferenciálne spektrum protónov kozmického žiarenia je:

$$J(E_p, \phi) = C_p \frac{E_p(E_p + 2m_p c^2)(E_p + x + \phi)^{-2.65}}{(E_p + \phi)(E_p + 2m_p c^2 + \phi)}, \quad (1)$$

kde E_p je kinetická energia protónu, c je rýchlosť svetla, $x = 780e^{-2.5 \times 10^{-4} E_p}$, C_p je normalizačná konštanta, ϕ je modulačný parameter závislý od slnečnej aktivity. Ak energiu normujeme na jeden nukleón, potom pre ostatné častice galaktického kozmického žiarenia platí analogická formula s mierne odlišnými parametrami.

Častica galaktického kozmického žiarenia má väčšinou vysokú energiu a v materiálovom prostredí iniciuje vznik mnohých sekundárnych častíc, najmä neu-

trónov, protónov a piónov. Tieto častice môžu produkovať γ -kvantá v rôznych jadrových reakciách, z ktorých najvýznamnejšie sú reakcie nepružného rozptylu neutrónov a reakcie záchytu termálnych a epitermálnych neutrónov.

Extrahovanie chemických informácií z nameraných γ -spektier je vzhľadom na spomenuté skutočnosti komplikovaný proces, pričom je potrebné detailné pochopenie produkčných a transportných vlastností γ -kvánt. Toto nie je z pochopiteľných príčin možné robiť experimentálne. Súčasný rozvoj výpočtovej techniky však umožňuje kompletnú simuláciu všetkých relevantných procesov vzniku a pohybu γ -žiarenia v látke a preto je mocným nástrojom pri teoretickej analýze výsledných γ -spektier.

Zlomok tejto teoretickej analýzy sme zrealizovali v tejto práci, ktorá je obsahovo rozdelená do šiestich kapitol. Po stručnom úvode nasleduje kapitola venovaná prehľadu súčasných poznatkov o danej problematike. V ďalšej kapitole sme sformulovali ciele práce. Potom nasleduje opis metód použitých pri dosahovaní výsledkov. Výsledky sú uvedené v piatej kapitole a zhrnuté v závere, kde sú aj perspektívy a otvorené otázky tejto problematiky.

2 Súčasný stav problematiky

2.1 Názory na chemické zloženie komét

Pre pochopenie pôvodu komét je rozhodujúce poznať chemické zloženie ich jadra. Prevažná väčšina informácií o chemickom zložení pochádza z meraní, ktoré boli urobené družicami na kométe P/Halley. Aj napriek značnému množstvu dát získaných v tomto projekte nemožno ani zďaleka považovať súčasný stav poznania za uspokojivý.

Vie sa, že plynná časť kométy obsahuje H_2O , HCN , S_2 , CO , CO_2 , CH_3CN , pevná časť obsahuje Mg - a Fe -kremičitany, veľké množstvo častíc s podobným zložením ako u kamenných meteoritov (chondritov) a veľké množstvo „CHON“ častíc, zložených striktne z uhlíka, vodíka, kyslíka a dusíka [1]. Predpokladá sa, že „CHON“ častice sú organické polyméry a sú zdrojom CO v kome. Určenie percentuálneho zastúpenia jednotlivých elementov je veľmi náročné, známe sú len množstvá niektorých zlúčenín. CO je v jadre zastúpené na úrovni 5 – 10%, porovnateľné množstvo je aj vo vnútornej časti komy, množstvo CO_2 v kome je približne 3%. Predpokladá sa že obsah C, H, O, N je v kométe podobný ako v Slnku. Je pravdepodobné, že kométa má na povrchu kôru, v ktorej chýbajú prvky unikajúce pri formovaní komy.

2.2 Meranie γ -žiarenia z planét

Prvé práce o meraní γ -žiarenia z planét sú od Arnolda (1958) a Metzgera a spol. (1962) v súvislosti s plánovaním misií Ranger a Vinogradova (1976), ktorý umiestnil malý detektor na družicu Luna 10, ktorá obiehala Mesiace. Žiadny z Rangerov síce nebol schopný merať γ -spektrá v blízkosti Mesiaca, ale výsledky boli použité na určenie tokov medziplanetárnych γ -kvánt. Spektrá z Luny 10 boli veľmi nekvalitné, aj tak však boli použité Surkovom (1984) na odhad úrovne rádioaktivity v niektorých oblastiach Mesiaca.

Úspešné experimenty boli prevedené na misiách Apollo 15 a Apollo 16 v rokoch 1971 a 1972. Gama kvantá boli detegované scintilačným NaI(Tl) detektorom ktorý bol obalený v plastickom scintilátore na odtienenie nabitých častíc. Pomocou dát z týchto misií bola zostrojená mapa mesačnej rádioaktivity pre asi 20% jeho povrchu. Aj keď energetické rozlíšenie detektora bolo zlé, boli vyvinuté rôzne metódy na určenie chemického zloženia z nameraných spektier, ktoré viedli k rovnakým výsledkom aké boli určené z mesačných vzoriek.

Sovietske družice Venera 8, 9 a 10 merali γ -žiarenie prirodzene rádioaktívnych izotopov z povrchu Venuše spektrometrom umiestneným priamo na povrchu. Druhé zdroje γ -žiarenia sa v povrchu Venuše nenachádzajú, lebo cez veľmi hrubú atmosféru Venuše neprenikne prakticky žiadne kozmické žiarenie.

V roku 1989 sovietska družica Fobos merala z obežnej dráhy Marsu γ -kvantá emitované z povrchu pomocou veľkého CsI scintilačného detektora. Spojenie s družicou však bolo po krátkom čase stratené a preto boli dáta namerané so zlou štatistikou. Tieto dáta boli napriek tomu analyzované nezávisle dvomi skupinami, ktorým sa podarilo získať podobné chemické zloženie.

V septembri 1992 odštartovala družica NASA Mars Observer [13]. K cieľom tejto misie patrilo určenie chemického zloženia Marsu vrátane pólův, geochemická charakterizácia jednotlivých oblastí povrchu a hľadanie vody. Pre tieto účely bol zvolený germániový detektor skonštruovaný tak, aby umožňoval merať γ -žiarenie a neutróny emitované povrchom Marsu [8]. Tri dni pred navedením družice na obežnú dráhu sa však spojenie s družicou stratilo. HPGe detektor však dovtedy bezchybne meral toky γ -žiarenia produkovaného kozmickým žiarením v materiáli družice a preto sa tento druh detektora považuje za najvhodnejší pre účely γ -spektrometrie povrchu vesmírnych objektov.

2.3 Prístupy k výpočtu γ -emisie

Na ohodnotenie vplyvu rôznych parametrov na emisiu γ -žiarenia z povrchu planét je potrebné teoretické modelovanie relevantných procesov. Jeden z prvých úspeš-

ných modelov bol model Reedyho a Arnolda [15], ktorý bol neskôr použitý na výpočet γ -spektra emitovaného povrchom Mesiaca [16].

Podľa tohto modelu je diferenciálny tok častíc kozmického žiarenia s energiou nad 100 MeV v hĺbke d pod povrchom Mesiaca daný empirickou formulou odvodenou na základe meraní v Zemskej atmosfére:

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = K(d) (\alpha(d) + E)^{-2.3}, \quad (2)$$

kde $K(d)$ je normalizačná konštanta, $\alpha(d)$ je parameter určujúci tvar spektra. Pre sekundárne neutróny s energiou v intervale (2.5, 100) MeV sa zobral diferenciálny tok

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = K (\alpha + 100)^{-2.3} (M(E) - [\alpha - 50] \delta(E)), \quad (3)$$

kde α , K sú rovnaké parametre ako v rovnici (2),

$$M(E) = 94E^{-1} + 603E^{-2} - 300E^{-3}, \quad (4)$$

$$\delta(E) = 0.3E^{-1.26} - 0.00091. \quad (5)$$

Ak je energia v intervale (0.5, 2.5) MeV, tok sa ráta podľa vzťahu

$$\frac{dJ}{dE}(E, d) = K (\alpha + 100)^{-2.3} [115 - (\alpha - 50) 0.094] (1.3125 + 0.5E - 0.25E^2). \quad (6)$$

Pre neutróny s nižšou energiou tok klesá nepriamo úmerne s energiou. Vyššie uvedené vzťahy boli odvodené zhrnutím teoretických a experimentálnych údajov rôznych autorov o neutrónových tokoch v atmosfére resp. v mesačných vzorkách.

Lapides [9] skúmal vplyv koncentrácie vodíka a makroskopického účinného prierezu pre absorpciu tepelných neutrónov na tok neutrónov v povrchu planéty a závislosť emisie γ -žiarenia z povrchu planéty od toku neutrónov. Výpočet spektra sekundárnych kaskádnych neutrónov bol založený na riešení lineárnej Boltzmannovej rovnice diskretnou numerickou metódou. Princíp tejto metódy spočíva v tom, že sa tok počíta v diskretných smeroch, miestach a energiách. Výpočet bol realizovaný jednodimenziálnym počítačovým kódom ANISN.

Tieto a iné podobné modely mali veľa nedostatkov. Väčšinou sa na výpočet používala zjednodušená jednorozmerná geometria, bolo použitých veľa priblížení, nízko- a vysokoenergetická časť výpočtov nebola dostatočne previazaná. Spôsob, ktorý zvolili Dagge a spol. [5] prekonal časť týchto nedostatkov. V ich práci bol na výpočet neutrónového spektra a γ -emisie z povrchu Marsu ožarovaného kozmickým žiarením použitý systém kódov HERMES (High Energy Radiation Monte-Carlo Elaborate System), umožňujúci simulovať kompletný proces produkcie γ -kvánt počnúc vstupom kozmického protónu či α -častice do látky a končiac emisiou γ -kvánt z povrchu. Oveľa podrobnejšie bola problematika γ -spektier z Marsu študovaná v [12] pomocou systému LCS, ktorý bol použitý aj v tejto diplomovej práci.

2.4 Expedície, ktoré sa plánujú

Táto práca je motivovaná najmä plánmi Európskej Vesmírnej Agentúry (ESA) uskutočniť misiu ROSETTA, v rámci ktorej sa predpokladá možnosť určenia chemického zloženia kométy pomocou γ -spektrometra merajúceho γ -žiarenie priamo na povrchu. Na tieto účely bol navrhnutý ľahký HPGe detektor [17]. Tento experiment by mal byť uskutočnený niekedy po roku 2010.

Ešte neskôr v budúcnosti ESA plánuje výskum planéty Merkúr v rámci programu „Horizon 2000 plus“. Možnosti výskumu chemického zloženia tejto planéty germániovým γ -spektrometrom boli analyzované v [3].

Ako sme spomenuli vyššie, veľmi očakávaná misia Mars Observer bola neúspešná kvôli strate spojenia s družicou. Všetky experimentálne zariadenia ktoré boli na palube tejto družice by však v blízkej budúcnosti mali byť postupne doručené k Marsu v osobitných misiách s menšími nákladmi, aby škody v prípadnej havárii neboli natoľko rozsiahle.

Jediný v súčasnosti fungujúci γ -spektrometer v kozme je scintilačný detektor na palube družice smerujúcej k asteroidu Eros v rámci NASA misie NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous). Aby sa do určitej miery zlepšilo zlé energetické

rozlíšenie, detektor je obalený veľkým BGO scintilátorom a súčasne sa používa detektor Röntgenovského žiarenia. Napriek tomu sa očakáva, že množstvá niektorých dôležitých prvkov nebude možné určiť.

3 Ciele práce

Cieľom predkladanej diplomovej práce je:

- Prispôbiť existujúce programy na simuláciu interakcií kozmického žiarenia s hmotou na podmienky ožarovania povrchu kométy a produkcie γ -žiarenia z nej.
- Preštudovať závislosť produkcie γ -žiarenia od chemického zloženia povrchu kométy.
- Preskúmať závislosť produkcie γ -žiarenia v povrchu kométy od jej vrstvého členenia.
- Určiť vhodnosť γ -spektrometrie na skúmanie chemického zloženia kométy pre konkrétny typ detektora z hľadiska požadovanej doby merania, resp. presnosti určenia obsahu jednotlivých prvkov pre dané časy merania.
- Preskúmať interferencie pochádzajúce od možných zdrojov neutrónov a γ -žiarenia prítomných na družici (jadrový reaktor).

4 Zvolené metódy

Postup ktorým sú v tejto diplomovej práci počítané toky γ -žiarenia možno zhrnúť do troch bodov:

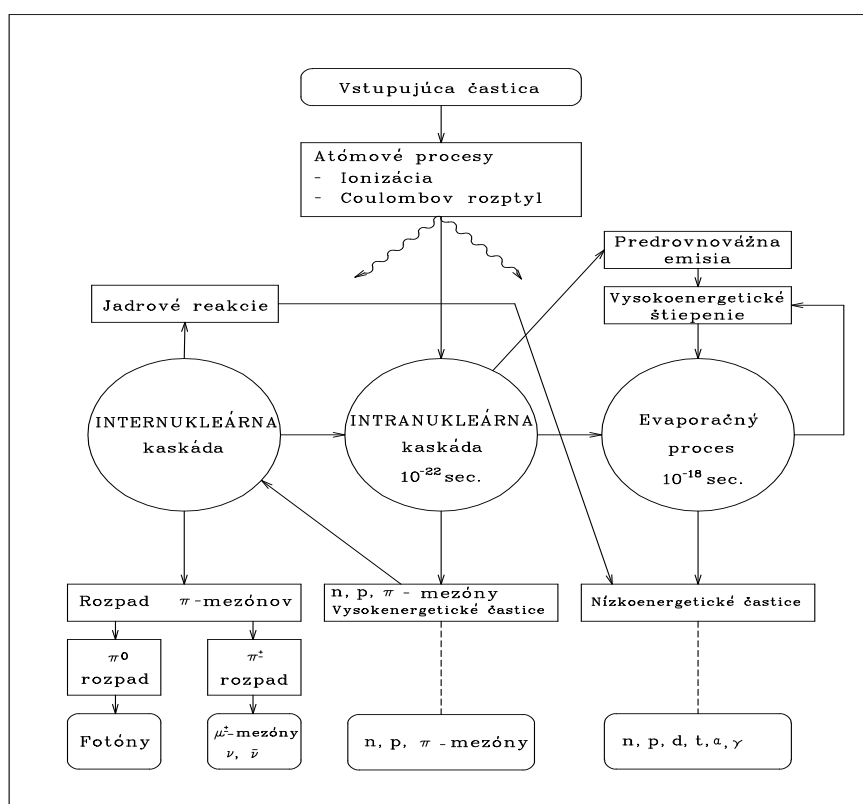
1. Výpočet tokov častíc, ktoré indukujú jadrové reakcie s následnou produkciou γ -kvánt.
2. Výpočet tokov produkovaných γ -kvánt.
3. Transport γ -kvánt na povrch kométy.

Prvý a čiastočne aj druhý bod sme realizovali využijúc Los Alamos High Energy Transport (LAHET) Code System (LCS) [14]. Pre výpočet produkcie γ -kvánt v nepružných reakciách a transport fotónov na povrch kométy bol vyvinutý samostatný program. Stručný popis fyzikálnej podstaty a činnosti týchto programov je v nasledujúcich častiach.

4.1 Model LCS

Typická energia častice vstupujúcej do látky v podmienkach skúmaných v tejto práci je v rozmedzí niekoľko desiatok MeV až k extrémne vysokým energiám, pričom sa jedná prevažne o protóny a α -častice. Takáto častica zapríčiní v látkovom prostredí kométy vznik hadrónovej kaskády. Elektróny a fotóny z týchto kaskád môžu vyvolať elektromagnetické kaskády. Straty energie primárneho hadrónu pripadajúce na elektromagnetické kaskády sú v porovnaní so stratami pripadajúcimi na hadrónové kaskády malé a preto sú hadronové kaskády z hľadiska produkcie γ -žiarenia podstatnejšie. Vývoj hadrónovej kaskády opisuje Boltzmanova kinetická rovnica (viď napr. v [18]). Fyzikálne najúplnejší spôsob riešenia tejto rovnice je stochastický. Je založený na Monte Carlo simulácii produkcie a transportu jednotlivých častíc. Monte Carlo simulácia spočíva v tom, že je krok za krokom sledovaný postupný prechod častice cez prostredie, pričom

sa používajú len základné fyzikálne predstavy a veličiny. Ak teda poznáme spektrum primárneho žiarenia, izotopické zloženie terčového materiálu a potrebné účinné prierezy, môžeme Monte Carlo simuláciou vyrátať hodnoty požadovaných veličín¹. Principiálne procesy, ktoré môžu nastať pri vstupe vysokoenergetického hadrónu do látkového prostredia sú znázornené na obrázku (1). Interakcie takej-



Obrázok 1: Principiálne procesy vyvolané pri vstupe vysokoenergetického hadrónu do látkového prostredia

to častice môžu viesť k vzniku dvoch druhov kaskád podľa toho či prebiehajú vo vnútri jadra, alebo medzi jadrami:

¹V našom prípade produkciu γ -kvánt, resp. toky častíc, ktoré produkciu γ -kvánt spôsobujú.

1. Ak primárna, alebo sekundárna častica kozmického žiarenia prenikne do jadra, môže rôznym spôsobom interagovať s jednotlivými nukleónmi, pričom môžu vznikať nové častice. Takto sa rozvíja **intranukleárna kaskáda**. Ak niektorá z častíc intranukleárnej kaskády dosiahne hranicu jadra a má dostatok energie, môže jadro opustiť a stať sa tak súčasťou druhého druhu kaskády.
2. Interakcia vysokoenergetickej častice s terčovým jadrom iniciuje produkciu rôznych typov sekundárnych častíc (protóny, neutróny, π -mezóny atď.), ktoré, ak majú dostatok energie, zapríčiňujú produkciu ďalšej generácie sekundárnych častíc. Takto sa rozvíja tzv. **internukleárna kaskáda**, ktorá trvá dovtedy kým energia takto produkovaných častíc neklesne pod medzu, kedy už nemôže spôsobiť tvorbu vyššej generácie.

Kvantovomechanický popis týchto interakcií musí zahŕňať veľké množstvo častíc a je v mnohých prípadoch značne komplikovaný. Preto sa používa semiklasický mikroskopický popis intranukleárnej kaskády–INC–model. Základné charakteristiky INC–modelu sú nasledovné [11]:

- Pohyb všetkých častíc zúčastňujúcich sa v jadrovej reakcii je popísaný klasicky.
- Počas vývoja kaskády jednotlivé zrážky prebiehajú v oblastiach s rozmermi oveľa menšími ako je stredná voľná dráha v jadrovej hmote a doba trvania zrážky je malá v porovnaní s dĺžkou časového intervalu medzi dvoma po sebe nasledujúcimi zrážkami. Preto každá zrážka môže byť považovaná za okamžitú a bodovú.
- Počiatočné rozdelenie hybností a súradníc nukleónov terčového jadra je stacionárne a popísané kvantovomechanickým modelom vzájomne neinteragujúcich častíc (obyčajne modelom Fermiho plynu).
- Koncové stavy nukleónov prítomných v interakcii spĺňajú Pauliho princíp.

Po rozvinutí intranukleárnej kaskády zostáva v jadre časť excitovaných častíc s energiou ktorá nie je dostatočná na preniknutie potenciálovou bariérou². Dostatočnú energiu môže excitovaný nukleón získať len pri zrážke s inou excitovanou časticou. Emisia častíc jadrom v tejto fáze sa nazýva **predrovnovážna emisia** a stredný čas emitovania v tejto fáze je podstatne dlhší ako vo fáze intranukleárnej kaskády³.

Po ešte dlhšom čase sa energia primárnej častice rozdelí medzi veľmi veľký počet nukleónov, rozdelenie energie v jadre sa dostáva do rovnovážneho stavu. Pravdepodobnosť emisie častíc v tejto fáze môžeme ohodnotiť na základe Bohrových predstáv rozpadu zloženého jadra. Postupom uvedeným v [2] môžeme pre relatívnu intenzitu častíc typu b , vyletujúcich z jadra s energiou v intervale $(E, E + dE)$ odvodiť vzťah:

$$I_b(E) dE = \text{const.} E \cdot \sigma_C(\beta) \cdot w(E^*) dE, \quad (7)$$

kde $\sigma_C(\beta)$ je účinný prierez formovania zloženého jadra časticou typu b s energiou β z intervalu $\beta \in (E, E + dE)$, $w(E^*)$ je hustota energetických hladín v zostatkovom jadre s excitačnou energiou E^* . Na výpočet hustoty hladín $w(E^*)$ možno za určitých podmienok aplikovať termodynamické predstavy a dostávame:

$$w(E^*) = w_0 e^{2\sqrt{aE^*}}, \quad (8)$$

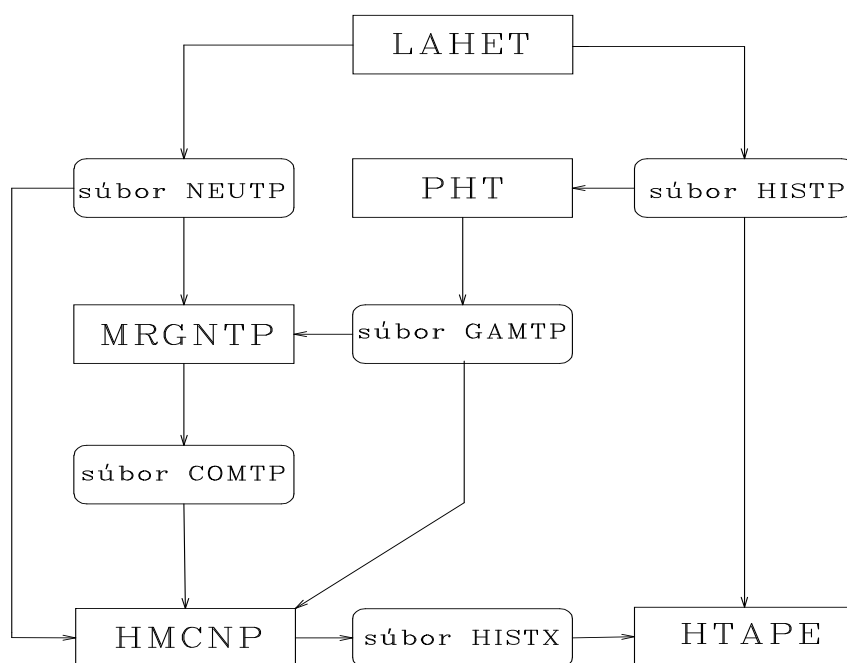
pričom w_0 a a sú konštanty. Keďže aplikovaním termodynamických predstáv emitujúce jadro získava analógiu s vyparovaním zahriatej kvapky, tento model sa volá **evaporačný**. Bližšie detaily o tomto modeli možno nájsť aj v [7].

Systém LCS predstavuje počítačovú realizáciu horespomenutých modelových predstáv. Jednotlivé fyzikálne procesy sú simulované špecializovanými kódmi systému a častice mimo daného rozsahu sú zapisované spolu so svojimi parametrami do súborov, ktoré čítajú ďalšie kódy systému. Prepojenie jednotlivých kódov je

²Ak je energia primárnej častice malá, nemusí vo fáze intranukleárnej kaskády uniknúť z jadra žiadna častica.

³V tejto fáze môžu byť jadrom emitované okrem nukleónov aj iné častice, napríklad fragmenty.

znázornené na obr. (2). V našom prípade sa používajú len kódy LAHET, HTAPE



Obrázok 2: Prepojenie kódov systému LCS

a MCNP. LAHET simuluje vysokoenergetickú časť neutrónových reakcií a všetky ostatné reakcie. Kompletná charakteristika eventov, ktoré nasimuluje LAHET je zapisovaná do súboru HISTP, ktorý slúži ako vstup pre HTAPE. HTAPE spracuje súbor HISTP a vyprodukuje výstup obsahujúci nami požadované informácie. Charakteristiky neutrónov s energiou menšou ako 20 MeV LAHET zapisuje do súboru NEUTP. MCNP (Monte Carlo N-Particles) transportuje neutróny prečítané z NEUTP až k subtermálnym energiám a požadované informácie zapíše do výstupu. Informácie o geometrii a ostatných parametroch simulácie,

ako aj požiadavky pre výstup sa zadávajú do špeciálne formátovaných vstupných súborov.

4.2 Produkcia a transport γ -kvánt

LCS obsahuje aj možnosti na priamy výpočet produkcie γ -kvánt. Z týchto možností sa v našom prípade používa len MCNP na výpočet produkcie γ -žiarenia v záchytových reakciách termálnych a epitermálnych neutrónov, pretože obsahuje mohutné knižnice účinných prierezov. V ostatných prípadoch LCS vyžívame len na výpočet tokov častíc, ktoré v jadrových reakciách generujú γ -kvantá a samotnú produkciu rátame samostatným programom. Boli totiž spravené testy [12], ktoré ukázali, že použité kódy sú lepšie na výpočet tokov častíc ako na priamy výpočet produkcie. Produkciu γ -žiarenia v mieste D vzorky počítame podľa vzťahu

$$P_j(D) = \sum_i N_i \sum_k \int_0^\infty \sigma_{jik}(E_k) J_k(E_k, D) dE_k, \quad (9)$$

kde N_i je počet atómov terčového prvku i v jednotke hmotnosti materiálu, $\sigma_{jik}(E_k)$ je účinný prierez produkcie γ -kvanta j na terči i časticou typu k s energiou E_k , $J_k(E_k, D)$ je totálny tok častíc typu k s energiou E_k v mieste D materiálu. J_k , ako už bolo spomenuté, rátame pomocou LCS, ako účinné prierezy $\sigma_{jik}(E_k)$ sme použili experimentálne namerané hodnoty z mnohých meraní, použité v mnohých predchádzajúcich prácach zaoberajúcich sa produkciou γ -kvánt.

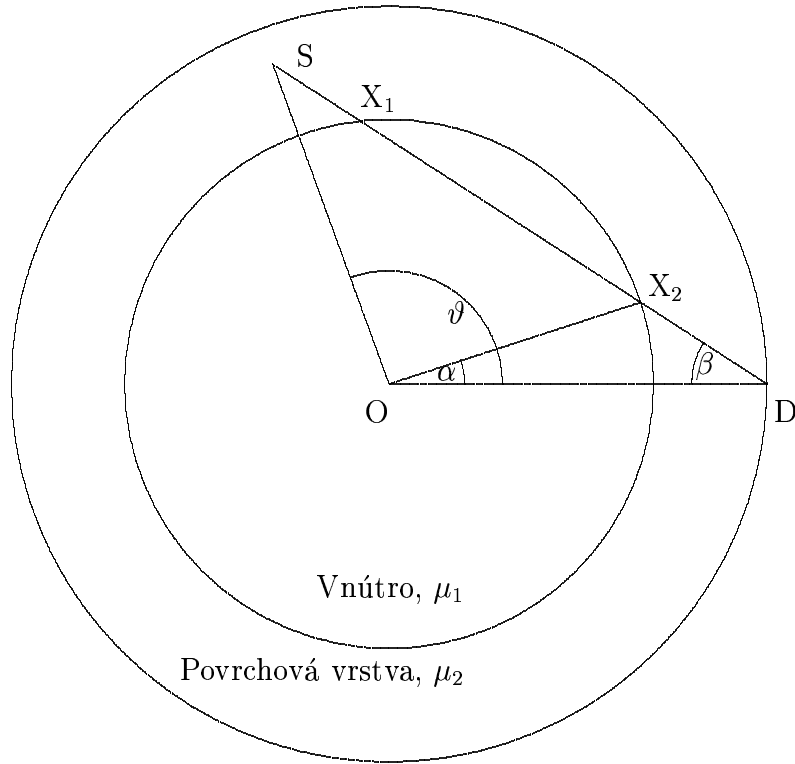
Keď už sú vyrátané γ -toky v jednotlivých miestach kométy, treba ich transportovať do detektora na povrchu. Nech v hĺbke x pod povrchom polonekonečnej platne je intenzita γ -zdroja $A(x)$. Tok fotónov v detektore od fotónov emitovaných v hĺbke x pod povrchom je [16]:

$$I(x) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \beta d\beta \left[\frac{A(x)}{4\pi} \frac{1}{\cos \beta} e^{\mu r} \right], \quad (10)$$

kde β je uhol, ktorý zvierajú spojnica zdroja a detektora s normálou k povrchu, $r = \frac{x}{\cos \beta}$ je vzdialenosť detektora od zdroja, μ je atenuačný koeficient daného

γ -kvanta v danom prostredí. Člen $\frac{A(x)}{4\pi}$ normalizuje tok zdroja na jednotku priestorového uhla, člen $\frac{1}{\cos \beta}$ premieta jednotkovú plochu detektora v smere kolmom na smer β do smeru paralelného s povrchom. Celkový tok v detektore dostaneme integrovaním (10) cez všetky hĺbky x .

V našom prípade sa situácia trochu komplikuje tým, že sa nejedná o polonekonečný objem, ale o guľu a navyše v prípade vrstvovej kométy sú atenuačné koeficienty v každej vrstve rôzne. Ak predkladáme, že vo vrstve s polomerom r je všade



Obrázok 3: Geometria uvažovaná v prípade vrstvovej kométy

rovnaká intenzita γ -zdroja⁴, potom vzťah (10) prechádza na⁵:

$$I(r) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \beta d\vartheta \left[\frac{A(r)}{4\pi} \frac{r}{x_1 + x_2} e^{\mu_1 x_1} e^{\mu_2 x_2} \right], \quad (11)$$

⁴Tento predpoklad je v našom prípade splnený, lebo kométa je ožarovaná izotropne a teda aj γ -produkcia je izotropná

⁵Pri odvodení vzťahu (11) stačí transformovať integračné premenné vo vzťahu (10)

kde (viď obrázok (3)) $r = |OS|$ je vzdialenosť zdroja S od stredu kométy, $x_1 = |X_1X_2|$, $x_2 = |SX_1| + |X_2D|$ je vzdialenosť, ktorú prejde γ -kvantum od miesta svojho vzniku S k detektoru D vo vnútornej, resp. povrchovej vrstve, μ_1 , μ_2 sú zodpovedajúce atenuačné koeficienty. Hodnoty x_1 , x_2 sa dajú vypočítať z nasledujúcich vzťahov, pričom $R = |OD|$ je polomer kométy, $h = |OD| - |OX_2|$ je hrúbka povrchovej vrstvy:

$$x_1 = r \frac{\sin \vartheta}{\sin \beta}, \quad (12)$$

$$x_2 = 0, \quad (13)$$

ak celá dráha γ -kvanta leží vo vrchnej vrstve kométy,

$$x_1 = r \frac{\sin \vartheta}{\sin \beta} - 2(R - h) \cos(\alpha + \beta), \quad (14)$$

$$x_2 = 2(R - h) \cos(\alpha + \beta), \quad (15)$$

ak dráha γ -kvanta pretína hranicu vrstvy na dvoch miestach (obr. (3)),

$$x_1 = r \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} - 2(R - h) \cos(\alpha + \beta), \quad (16)$$

$$x_2 = \frac{1}{\sin \beta} (r \sin \vartheta - R \sin \alpha), \quad (17)$$

ak zdroj γ -kvanta leží vo vnútri kométy. Pritom pre uhly α , β platí:

$$\beta = \arctan \frac{r \sin \vartheta}{R - r \cos \vartheta}, \quad (18)$$

$$\alpha = \arctan \frac{R \sin \beta}{\sqrt{(R - h)^2 - (R \sin \beta)^2}} - \beta. \quad (19)$$

Integrovaním (11) dostávame celkový tok γ -kvánt v detektore:

$$I = \int_0^R I(r) dR \quad (20)$$

Ešte treba poznamenať, že sa uvažujú len tie γ -kvantá, ktoré prídu do detektora bez interakcie s materiálom kométy (to zabezpečuje faktor $e^{\mu x}$), pretože ostatné rozptýlené γ -kvantá prichádzajúce do detektora nenesú informáciu o chemickom zložení a iba zaťažujú detektor pozadím.

Ak poznáme tok gamma tok γ -kvánt v mieste detektora, môžeme na základe známych parametrov detektora vypočítať chybu, ktorú dosiahneme pri meraní určitý čas, resp. čas potrebný na meranie s požadovanou chybou. Nech pozadie pod píkom je rovné $B \left[\frac{f \cdot t}{cm^2 \cdot min.} \right]$, účinnosť detektora pre danú čiaru je f , plocha detektora je $S [cm^2]$, a intenzita čiar je $A \left[\frac{f \cdot t}{cm^2 \cdot min.} \right]$. Potom čas t potrebný na meranie s chybou ε , resp. chybu merania pri dobe merania t hodín môžeme vyrátať pomocou týchto vzťahov [10]:

$$t = \frac{fA + B}{60\varepsilon^2 f^2 A^2 S} \quad [\text{hod.}], \quad (21)$$

resp.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{fA + B}{60t f^2 A^2 S}} \times 100 \quad [\%]. \quad (22)$$

5 Výsledky

5.1 Homogénna kométa

5.1.1 Použité parametre

V prípade výpočtu produkcie γ -kvánt vplyvom kozmického žiarenia v kométe s homogénnym chemickým zložením sme kométu modelovali ako guľu s polomerom 2 km, izotropne ožarovanú protónmi s energiou danou vzťahom (1). Modulačný parameter ϕ vo vzťahu (1) sme zobrali $\phi = 550$ MeV, čo je hodnota určujúca priemerné galaktické kozmické žiarenie počas slnečného cyklu.

Pomer α -častíc k protónom v galaktickom kozmickom žiarení je relatívne veľký (približne 0.14), preto by mali byť v simulácii zahrnuté aj α -častice. LAHET simuluje α -častice ako štyri zviazané nukleóny, ktoré sú pri prvej kolízii rozdelené a ďalej sú sledované ako nezávislé častice. Diferenciálne spektrum primárnych protónov a α -častíc je veľmi podobné, rovnako ako účinné prierezy pre tvorbu protónov a neutrónov v jadrových reakciách s týmito časticami. Na základe toho je možné príspevok primárnych α -častíc do produkcie γ -kvánt zahrnúť normalizovaním výsledkov získaných zo simulácií s protónmi škálovacím faktorom. Na základe predchádzajúcich výpočtov [12], keď sa modelovali aj protóny aj α -častice, bol vypočítaný škálovací faktor rovný 1.4.

Kvôli analýze meracích časov, resp. chýb merania jednotlivých čiar v γ -spektre sme modelovali homogénnu kométu pre 8 rôznych chemických zložení. Chemické zloženia boli vybrané na základe súčasných predstáv (viď časť 2.1) ako rôzna zmes anorganických prvkov so zastúpením rovnakým ako u kamenných meteoritov (CI chondrity) a ľadov zložených z H, C, O, a N. Percentuálne zastúpenie chemických prvkov v modelovaných chemických zlozeniach je uvedené v tabuľke (1).

Tabuľka 1: Chemické zloženia modelované pri simulácii homogénnej kométy

prvok	chemické zloženie, váhový zlomok, [%]							
	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8
H	1.51	2.49	3.27	3.37	3.46	3.55	4.43	5.02
C	3.50	6.81	13.19	11.65	10.11	8.57	13.42	15.40
N	–	1.30	7.77	5.18	2.59	–	3.89	4.66
O	47.00	53.42	51.77	55.80	59.84	63.88	66.26	70.12
Na	0.50	0.37	0.25	0.25	0.25	0.25	0.13	0.05
Mg	9.36	7.02	4.68	4.68	4.68	4.68	2.34	0.94
Al	0.82	0.61	0.41	0.41	0.41	0.41	0.21	0.08
Si	10.68	8.01	5.34	5.34	5.34	5.34	2.67	1.07
S	5.80	4.35	2.90	2.90	2.90	2.90	1.45	0.58
K	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01
Ca	0.90	0.67	0.45	0.45	0.45	0.45	0.23	0.09
Ti	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00
Ch	0.27	0.20	0.14	0.14	0.14	0.14	0.07	0.03
Mn	0.18	0.13	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.02
Fe	18.30	13.72	9.15	9.15	9.15	9.15	4.58	1.83
Ni	1.08	0.81	0.54	0.54	0.54	0.54	0.27	0.11
suma	100	100	100	100	100	100	100	100

Atenuačný koeficient $\mu(i)$ pre γ -kvantum s energiou E v materiáli zloženom z nuklidu i bol určený extrapoláciou tabuľkových hodnôt. Atenuačný koeficient pre materiál tvorený zmesou viacerých prvkov sa potom ráta podľa vzťahu $\mu = \sum_i [w(i)\mu(i)]$, kde $w(i)$ je váhový zlomok i -teho prvku v zmesi, $\sum_i w(i) = 1$.

Výpočet času merania pre danú chybu, resp chyby pre daný čas vyžaduje znalosť toku γ -kvánt v mieste detektora, plochu detektora, účinnosť detektora pre registráciu daného γ -kvanta a pozadie pod danou čiarou (viď vzťah (21), resp. (22)). Tok γ -kvánt sme zráтали v našich simuláciách. Ostatné hodnoty boli určené v predchádzajúcich simuláciách [10] pre detektor 4.5×5.0 cm, pozadie využívajúc kód MCNP, účinnosť detektora pomocou kódu TIGER.

5.1.2 Časy potrebné na meranie s danou chybou, chyby merania pre daný čas merania

V tejto časti sú uvedené chyby merania pre daný čas, resp. časy merania s danou chybou pre niektoré simulované chemické zloženia kométy.

Tabuľka 2: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. El.= chemický prvok, Ef.= účinnosť registrácie, M= typ reakcie: C= reakcia neutrónového záchytu, I= nepružný rozptyl neutrónu. Detektor 4.5×5.0 cm. Chemické zloženie č. 1.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
H	2.2233	C	0.0754	3.8665	0.0378	1.69	1.09	0.35
Fe	0.8467	I	0.181	1.5032	0.1052	1.94	1.25	0.4
Mg	1.3686	I	0.1173	1.0654	0.063	2.99	1.93	0.61
Si	1.7788	I	0.0914	1.1223	0.0474	3.25	2.1	0.66
O	6.1294	I	0.0194	1.695	0.0135	5.64	3.64	1.15
Fe	1.2383	I	0.1261	0.3773	0.0667	6.12	3.95	1.25
S	5.424	C	0.0226	0.7646	0.0158	9.06	5.85	1.85
Si	1.7789	I	0.0914	0.2673	0.0474	9.44	6.09	1.93
S	2.379	C	0.0665	0.3191	0.0332	9.46	6.11	1.93
Si	3.5395	C	0.0403	0.4468	0.0242	9.82	6.34	2
Si	4.934	C	0.0281	0.5098	0.0173	10.68	6.9	2.18
Mg	1.3686	I	0.1173	0.1423	0.063	14.56	9.4	2.97
O	4.4383	I	0.0306	0.8638	0.1944	15.3	9.88	3.12
Ni	8.999	C	0.0093	0.5621	0.005	16.65	10.75	3.4
Fe	7.6313	C	0.0131	0.344	0.0077	21.1	13.62	4.31
Fe	7.6457	C	0.0131	0.3155	0.0077	22.65	14.62	4.62
Na	0.4399	I	0.3494	0.0507	0.2282	24.11	15.56	4.92
Mg	3.918	C	0.0385	0.1381	0.0221	26.8	17.3	5.47
Si	1.3686	I	0.1173	0.073	0.063	26.89	17.36	5.49
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0816	0.0291	31.31	20.21	6.39
Na	1.3686	C	0.1173	0.0619	0.063	31.43	20.29	6.41
C	4.4383	I	0.0306	0.3777	0.1944	33.8	21.82	6.9
Fe	0.8467	I	0.181	0.0434	0.1052	36.84	23.78	7.52
Si	2.2235	I	0.0754	0.0409	0.0378	56.39	36.4	11.51
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0549	0.0442	61.63	39.78	12.58
Ti	1.3815	C	0.119	0.0246	0.0649	76.44	49.34	15.6
Al	2.2104	I	0.0686	0.0333	0.0412	78.53	50.69	16.03
Cr	8.884	C	0.0078	0.0698	0.0052	119.8	77.33	24.45
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0109	0.1005	159.6	103.02	32.58
Na	6.395	C	0.0156	0.0364	0.0122	171.33	110.59	34.97
Al	7.724	C	0.0121	0.0365	0.0075	173.66	112.1	35.45
Ca	0.7705	I	0.2025	0.0067	0.1173	219.78	141.87	44.86
Ca	3.7366	I	0.0288	0.0201	0.023	227.83	147.07	46.51
Si	0.9833	I	0.1575	0.0072	0.1005	240.52	155.26	49.1
Al	1.7195	I	0.0964	0.0082	0.0491	242.85	156.76	49.57

Tabuľka 3: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 1.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	3.8665	0.0378	0.29	0.03	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	1.5032	0.1052	0.38	0.04	0.02
Mg	1.3686	I	0.1173	1.0654	0.063	0.89	0.1	0.04
Si	1.7788	I	0.0914	1.1223	0.0474	1.06	0.12	0.04
O	6.1294	I	0.0194	1.695	0.0135	3.18	0.35	0.13
Fe	1.2383	I	0.1261	0.3773	0.0667	3.74	0.42	0.15
S	5.424	C	0.0226	0.7646	0.0158	8.21	0.91	0.33
Si	1.7789	I	0.0914	0.2673	0.0474	8.91	0.99	0.36
S	2.379	C	0.0665	0.3191	0.0332	8.95	0.99	0.36
Si	3.5395	C	0.0403	0.4468	0.0242	9.64	1.07	0.39
Si	4.934	C	0.0281	0.5098	0.0173	11.42	1.27	0.46
Mg	1.3686	I	0.1173	0.1423	0.063	21.2	2.36	0.85
O	4.4383	I	0.0306	0.8638	0.1944	23.41	2.6	0.94
Ni	8.999	C	0.0093	0.5621	0.005	27.72	3.08	1.11
Fe	7.6313	C	0.0131	0.344	0.0077	44.53	4.95	1.78
Fe	7.6457	C	0.0131	0.3155	0.0077	51.3	5.7	2.05
Na	0.4399	I	0.3494	0.0507	0.2282	58.13	6.46	2.33
Mg	3.918	C	0.0385	0.1381	0.0221	71.81	7.98	2.87
Si	1.3686	I	0.1173	0.073	0.063	72.31	8.03	2.89
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0816	0.0291	98.01	10.89	3.92
Na	1.3686	C	0.1173	0.0619	0.063	98.76	10.97	3.95
C	4.4383	I	0.0306	0.3777	0.1944	114.22	12.69	4.57
Fe	0.8467	I	0.181	0.0434	0.1052	135.69	15.08	5.43
Si	2.2235	I	0.0754	0.0409	0.0378	317.96	35.33	12.72
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0549	0.0442	379.78	42.2	15.19
Ti	1.3815	C	0.119	0.0246	0.0649	584.33	64.93	23.37
Al	2.2104	I	0.0686	0.0333	0.0412	616.65	68.52	24.67
Cr	8.884	C	0.0078	0.0698	0.0052	1435	159	57.41
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0109	0.1005	2547	283	101.89
Na	6.395	C	0.0156	0.0364	0.0122	2935	326	117.41
Al	7.724	C	0.0121	0.0365	0.0075	3015	335	120.63
Ca	0.7705	I	0.2025	0.0067	0.1173	4830	536.7	193
Ca	3.7366	I	0.0288	0.0201	0.023	5190.8	576.76	208

Tabuľka 4: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 3.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
H	2.2233	C	0.0754	5.4341	0.0378	1.41	0.91	0.29
Fe	0.8467	I	0.181	0.4309	0.1052	4.72	3.05	0.96
O	6.1294	I	0.0194	1.5064	0.0135	6.09	3.93	1.24
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3355	0.063	7	4.52	1.43
Si	1.7788	I	0.0914	0.3493	0.0474	7.59	4.9	1.55
Fe	7.6313	C	0.0131	1.1601	0.0077	8.57	5.53	1.75
Fe	7.6457	C	0.0131	1.0644	0.0077	9.08	5.86	1.85
C	4.4383	I	0.0306	1.0534	0.1944	12.71	8.2	2.59
O	4.4383	I	0.0306	0.8809	0.1944	15.02	9.7	3.07
Fe	1.2383	I	0.1261	0.1206	0.0667	16.2	10.46	3.31
S	5.424	C	0.0226	0.2474	0.0158	22.52	14.53	4.6
Si	1.7789	I	0.0914	0.0922	0.0474	24.14	15.58	4.93
Si	3.5395	C	0.0403	0.1451	0.0242	25.52	16.47	5.21
S	2.379	C	0.0665	0.1011	0.0332	25.57	16.51	5.22
Si	4.934	C	0.0281	0.1674	0.0173	27.14	17.52	5.54
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0545	0.063	35.47	22.89	7.24
Ni	8.999	C	0.0093	0.1922	0.005	39.67	25.6	8.1
N	5.2693	C	0.0222	0.1204	0.0161	44.11	28.47	9
Si	1.3686	I	0.1173	0.0356	0.063	53.4	34.47	10.9
Mg	3.918	C	0.0385	0.045	0.0221	76.67	49.49	15.65
Na	0.4399	I	0.3494	0.0144	0.2282	82.67	53.36	16.87
Fe	2.5231	I	0.0623	0.027	0.0291	89.78	57.96	18.33
Na	1.3686	C	0.1173	0.0201	0.063	93.3	60.23	19.05
Fe	0.8467	I	0.181	0.016	0.1052	97.65	63.04	19.93
N	10.8295	C	0.0051	0.0737	0.0039	149.74	96.66	30.57
Si	2.2235	I	0.0754	0.0136	0.0378	165.15	106.6	33.71
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0178	0.0442	186.12	120.14	37.99
Ti	1.3815	C	0.119	0.008	0.0649	230.89	149.04	47.13

Tabuľka 5: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 3.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	5.4341	0.0378	0.2	0.02	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	0.4309	0.1052	2.23	0.25	0.09

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 5: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30% Čas [hod.]	50%
O	6.1294	I	0.0194	1.5064	0.0135	3.71	0.41	0.15
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3355	0.063	4.9	0.54	0.2
Si	1.7788	I	0.0914	0.3493	0.0474	5.77	0.64	0.23
Fe	7.6313	C	0.0131	1.1601	0.0077	7.34	0.82	0.29
Fe	7.6457	C	0.0131	1.0644	0.0077	8.25	0.92	0.33
C	4.4383	I	0.0306	1.0534	0.1944	16.16	1.8	0.65
O	4.4383	I	0.0306	0.8809	0.1944	22.57	2.51	0.9
Fe	1.2383	I	0.1261	0.1206	0.0667	26.24	2.92	1.05
S	5.424	C	0.0226	0.2474	0.0158	50.7	5.63	2.03
Si	1.7789	I	0.0914	0.0922	0.0474	58.26	6.47	2.33
Si	3.5395	C	0.0403	0.1451	0.0242	65.11	7.23	2.6
S	2.379	C	0.0665	0.1011	0.0332	65.38	7.26	2.62
Si	4.934	C	0.0281	0.1674	0.0173	73.63	8.18	2.95
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0545	0.063	125.8	13.98	5.03
Ni	8.999	C	0.0093	0.1922	0.005	157.34	17.48	6.29
N	5.2693	C	0.0222	0.1204	0.0161	194.58	21.62	7.78
Si	1.3686	I	0.1173	0.0356	0.063	285.2	31.69	11.41
Mg	3.918	C	0.0385	0.045	0.0221	587.84	65.32	23.51
Na	0.4399	I	0.3494	0.0144	0.2282	683.43	75.94	27.34
Fe	2.5231	I	0.0623	0.027	0.0291	806.13	89.57	32.25
Na	1.3686	C	0.1173	0.0201	0.063	870.58	96.73	34.82
Fe	0.8467	I	0.181	0.016	0.1052	953.6	105.96	38.14
N	10.8295	C	0.0051	0.0737	0.0039	2242	249.14	89.69
Si	2.2235	I	0.0754	0.0136	0.0378	2727	303.05	109.1
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0178	0.0442	3464	384.9	138.57
Ti	1.3815	C	0.119	0.008	0.0649	5331	592.35	213.25

Tabuľka 6: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod.
 Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 5.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
							Chyba [%]	
H	2.2233	C	0.0754	7.4376	0.0378	1.19	0.77	0.24
Fe	0.8467	I	0.181	0.4256	0.1052	4.77	3.08	0.97
O	6.1294	I	0.0194	1.7284	0.0135	5.57	3.59	1.14
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3331	0.063	7.04	4.54	1.44
Fe	7.6313	C	0.0131	1.5009	0.0077	7.24	4.67	1.48
Si	1.7788	I	0.0914	0.3472	0.0474	7.63	4.92	1.56

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 6: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
Fe	7.6457	C	0.0131	1.3771	0.0077	7.65	4.94	1.56
O	4.4383	I	0.0306	1.0128	0.1944	13.18	8.51	2.69
Fe	1.2383	I	0.1261	0.12	0.0667	16.27	10.5	3.32
C	4.4383	I	0.0306	0.8022	0.1944	16.41	10.59	3.35
S	5.424	C	0.0226	0.3156	0.0158	18.27	11.8	3.73
Si	3.5395	C	0.0403	0.1874	0.0242	20.3	13.11	4.14
S	2.379	C	0.0665	0.1288	0.0332	20.53	13.25	4.19
Si	4.934	C	0.0281	0.2164	0.0173	21.64	13.97	4.42
Si	1.7789	I	0.0914	0.0916	0.0474	24.27	15.67	4.95
Ni	8.999	C	0.0093	0.2488	0.005	31.81	20.53	6.49
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0542	0.063	35.66	23.02	7.28
Si	1.3686	I	0.1173	0.0354	0.063	53.7	34.67	10.96
Mg	3.918	C	0.0385	0.0582	0.0221	59.93	38.69	12.23
Na	1.3686	C	0.1173	0.0259	0.063	72.78	46.98	14.86
Na	0.4399	I	0.3494	0.0142	0.2282	83.79	54.08	17.1
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0268	0.0291	90.26	58.26	18.42
N	5.2693	C	0.0222	0.052	0.0161	97.94	63.22	19.99
Fe	0.8467	I	0.181	0.0159	0.1052	98.09	63.31	20.02
Ca	1.9427	C	0.0553	0.023	0.0442	144.56	93.32	29.51
Si	2.2235	I	0.0754	0.0135	0.0378	166.04	107.18	33.89
Ti	1.3815	C	0.119	0.0104	0.0649	179.06	115.58	36.55

Tabuľka 7: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 5.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	7.4376	0.0378	0.14	0.02	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	0.4256	0.1052	2.27	0.25	0.09
O	6.1294	I	0.0194	1.7284	0.0135	3.1	0.34	0.12
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3331	0.063	4.95	0.55	0.2
Fe	7.6313	C	0.0131	1.5009	0.0077	5.24	0.58	0.21
Si	1.7788	I	0.0914	0.3472	0.0474	5.82	0.65	0.23
Fe	7.6457	C	0.0131	1.3771	0.0077	5.86	0.65	0.23
O	4.4383	I	0.0306	1.0128	0.1944	17.38	1.93	0.7
Fe	1.2383	I	0.1261	0.12	0.0667	26.46	2.94	1.06
C	4.4383	I	0.0306	0.8022	0.1944	26.92	2.99	1.08
S	5.424	C	0.0226	0.3156	0.0158	33.39	3.71	1.34

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 7: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30% Čas [hod.]	50%
Si	3.5395	C	0.0403	0.1874	0.0242	41.22	4.58	1.65
S	2.379	C	0.0665	0.1288	0.0332	42.16	4.68	1.69
Si	4.934	C	0.0281	0.2164	0.0173	46.84	5.2	1.87
Si	1.7789	I	0.0914	0.0916	0.0474	58.9	6.54	2.36
Ni	8.999	C	0.0093	0.2488	0.005	101.18	11.24	4.05
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0542	0.063	127.13	14.13	5.09
Si	1.3686	I	0.1173	0.0354	0.063	288.4	32.04	11.54
Mg	3.918	C	0.0385	0.0582	0.0221	359.2	39.91	14.37
Na	1.3686	C	0.1173	0.0259	0.063	529.71	58.86	21.19
Na	0.4399	I	0.3494	0.0142	0.2282	702.01	78	28.08
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0268	0.0291	814.74	90.53	32.59
N	5.2693	C	0.0222	0.052	0.0161	959.26	106.58	38.37
Fe	0.8467	I	0.181	0.0159	0.1052	962.07	106.9	38.48
Ca	1.9427	C	0.0553	0.023	0.0442	2090	232.21	83.59
Si	2.2235	I	0.0754	0.0135	0.0378	2757	306.34	110.28
Ti	1.3815	C	0.119	0.0104	0.0649	3206	356.26	128.25

Tabuľka 8: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 8.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
H	2.2233	C	0.0754	7.9862	0.0378	1.14	0.74	0.23
O	6.1294	I	0.0194	1.7026	0.0135	5.62	3.63	1.15
Fe	7.6313	C	0.0131	0.6614	0.0077	12.71	8.2	2.59
O	4.4383	I	0.0306	1.0059	0.1944	13.27	8.56	2.71
Fe	7.6457	C	0.0131	0.6069	0.0077	13.54	8.74	2.76
C	4.4383	I	0.0306	0.9672	0.1944	13.76	8.88	2.81
Fe	0.8467	I	0.181	0.0578	0.1052	27.99	18.07	5.71
S	5.424	C	0.0226	0.1356	0.0158	38.58	24.9	7.88
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0479	0.063	40.15	25.92	8.2
Si	1.7788	I	0.0914	0.0495	0.0474	43.32	27.96	8.84
Si	3.5395	C	0.0403	0.0794	0.0242	44.53	28.74	9.09
S	2.379	C	0.0665	0.0538	0.0332	46.16	29.8	9.42
Si	4.934	C	0.0281	0.093	0.0173	46.49	30.01	9.49
Ni	8.999	C	0.0093	0.1111	0.005	64.68	41.75	13.2
N	5.2693	C	0.0222	0.0674	0.0161	76.35	49.28	15.58
Fe	1.2383	I	0.1261	0.0173	0.0667	103.74	66.96	21.18

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 8: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
Mg	3.918	C	0.0385	0.0247	0.0221	137.19	88.55	28
Si	1.7789	I	0.0914	0.0138	0.0474	150.48	97.13	30.72
Na	1.3686	C	0.1173	0.0108	0.063	171.85	110.93	35.08
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0086	0.063	216.57	139.8	44.21

Tabuľka 9: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Chemické zloženie č. 8.

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	7.9862	0.0378	0.13	0.01	0.01
O	6.1294	I	0.0194	1.7026	0.0135	3.16	0.35	0.13
Fe	7.6313	C	0.0131	0.6614	0.0077	16.15	1.79	0.65
O	4.4383	I	0.0306	1.0059	0.1944	17.6	1.96	0.7
Fe	7.6457	C	0.0131	0.6069	0.0077	18.34	2.04	0.73
C	4.4383	I	0.0306	0.9672	0.1944	18.94	2.1	0.76
Fe	0.8467	I	0.181	0.0578	0.1052	78.33	8.7	3.13
S	5.424	C	0.0226	0.1356	0.0158	148.86	16.54	5.95
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0479	0.063	161.19	17.91	6.45
Si	1.7788	I	0.0914	0.0495	0.0474	187.62	20.85	7.5
Si	3.5395	C	0.0403	0.0794	0.0242	198.27	22.03	7.93
S	2.379	C	0.0665	0.0538	0.0332	213.11	23.68	8.52
Si	4.934	C	0.0281	0.093	0.0173	216.17	24.02	8.65
Ni	8.999	C	0.0093	0.1111	0.005	418.4	46.49	16.74
N	5.2693	C	0.0222	0.0674	0.0161	582.87	64.76	23.31
Fe	1.2383	I	0.1261	0.0173	0.0667	1076	119.57	43.05
Mg	3.918	C	0.0385	0.0247	0.0221	1882	209.12	75.28
Si	1.7789	I	0.0914	0.0138	0.0474	2264	251.59	90.57
Na	1.3686	C	0.1173	0.0108	0.063	2953	328.15	118.13
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0086	0.063	4690	521.15	187.61

V predchádzajúcich tabuľkách sú všetky energetické čiary detegovateľné s presnosťou lepšou ako 50% pri najdlhšom uvažovanom čase merania 240 hodín, resp. všetky čiary, ktoré treba merať menej ako 240 hodín na dosiahnutie 50% presnosti pre chemické zloženia č. 1, 3, 5 a 8. Význam zisťovania vplyvu chemického

zloženia na časy resp. chyby merania spočíva v možnosti predpovedať, ktoré chemické prvky bude možné počas obmedzenej doby zberu dať na povrchu kométy určiť s dostatočnou presnosťou. Ďalej je možné optimalizovať dobu merania γ -spektra z hľadiska možností zdroja energie.

5.2 Vrstvová kométa

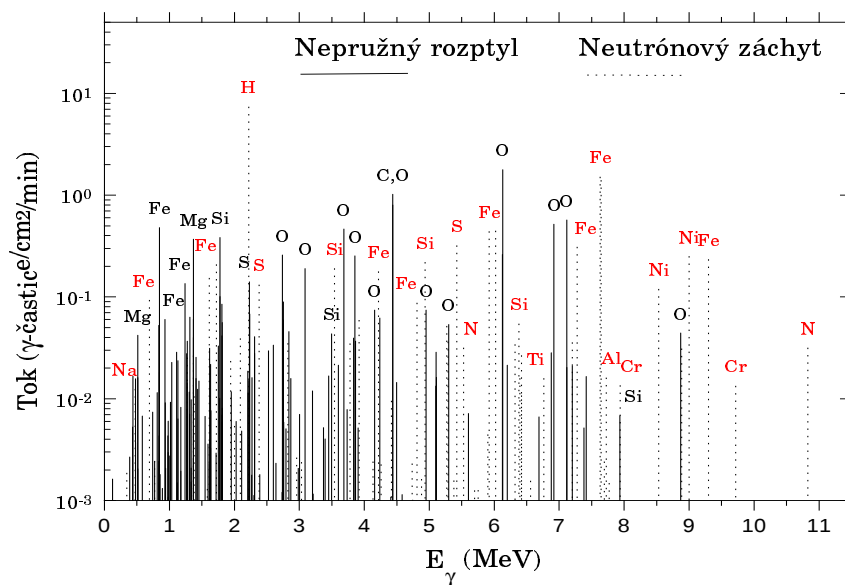
5.2.1 Použité parametre

Vrstvovú kométu sme podobne ako homogénnu kométu modelovali ako guľu s polomerom 2 km izotropne ožarovanú časticami galaktického kozmického žiarenia s rovnakými parametrami ako v homogénnom prípade. Chemické zloženie povrchovej vrstvy sme zvolili rovnaké ako u CI chondritov (chemické zloženie č. 1, tabuľka 1), chemická stavba vnútra kométy bola vybraná ako chemické zloženie č. 5 (50% chodrit, 50% ľad). Modelovali sme kométu pre šesť rôznych hrúbok povrchovej vrstvy: 0.4 g/cm², 0.9 g/cm², 4.6 g/cm², 9.6 g/cm², 16 g/cm² a 20 g/cm².

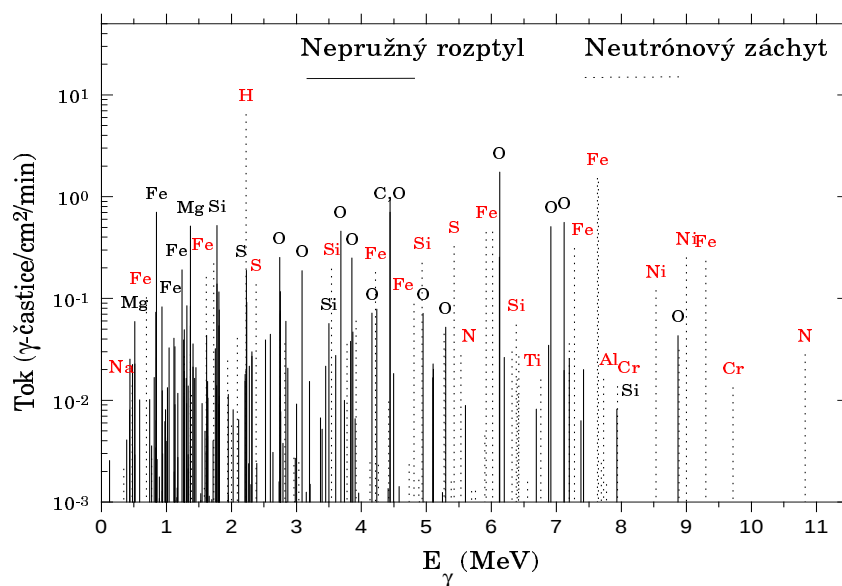
5.2.2 Nasimulované spektrá

Pre každú z modelovaných vrstvových komét sme určili čiarové spektrum γ -žiarenia emitovaného povrchom. Na obrázkoch (4)–(7) sú zobrazené niektoré z týchto spektier. Vplyvom zmeny hrúbky povrchovej vrstvy sa intenzity niektorých čiar výrazne menia. Vplyv hrúbky vrstvy na produkciu γ -kvánt je detailnejšie opísaný v nasledujúcej časti.

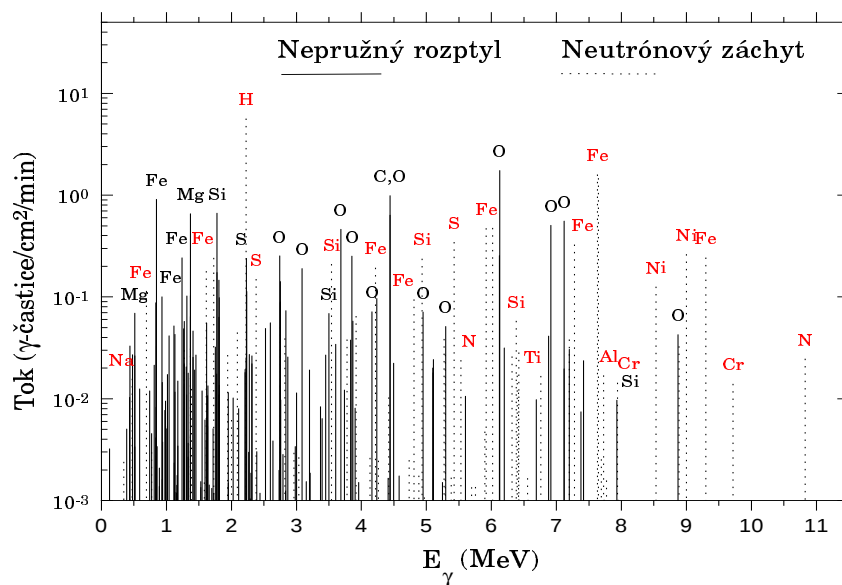
Obrázok 4: Čiarové γ -spektrum na povrchu kométy. Gama kvantá sú produkované vplyvom kozmického žiarenia. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 0.5 g/cm^2



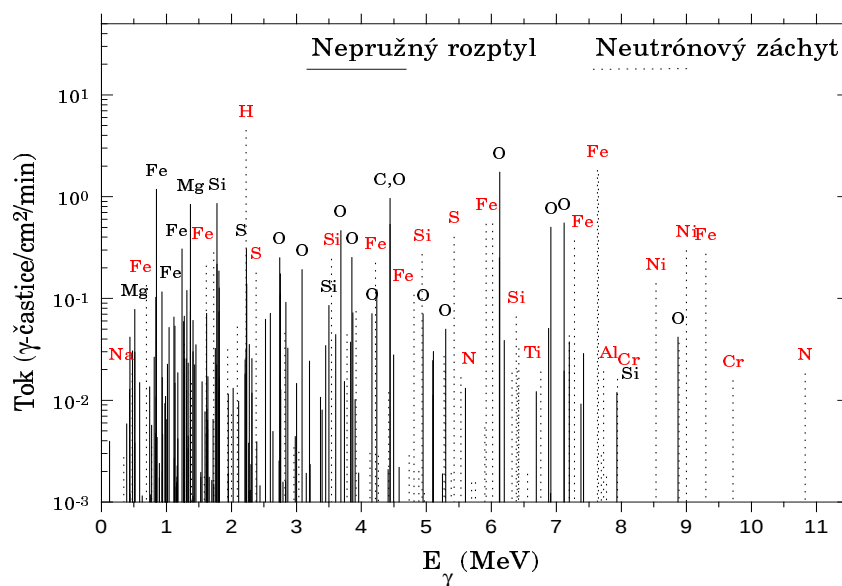
Obrázok 5: Čiarové γ -spektrum na povrchu kométy. Gama kvantá sú produkované vplyvom kozmického žiarenia. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 4.6 g/cm^2



Obrázok 6: Čiarové γ -spektrum na povrchu kométy. Gama kvantá sú produkované vplyvom kozmického žiarenia. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 9.6 g/cm^2



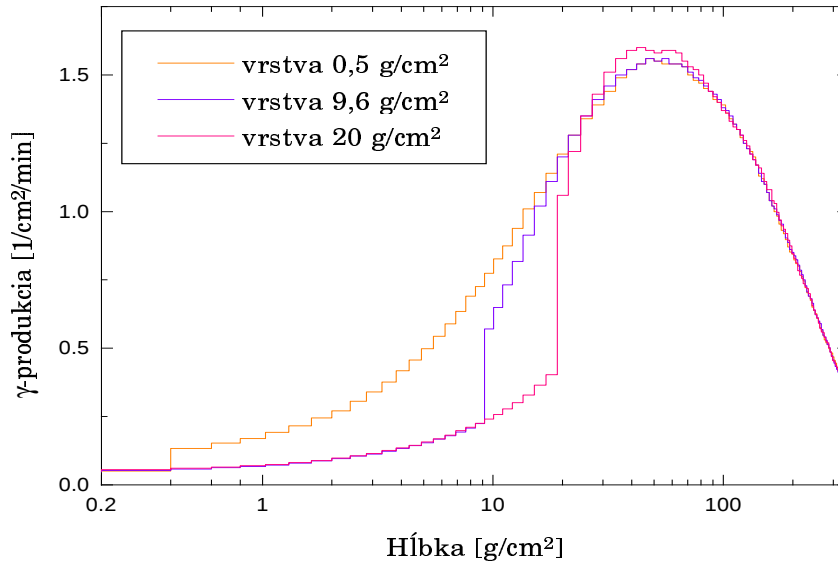
Obrázok 7: Čiarové γ -spektrum na povrchu kométy. Gama kvantá sú produkované vplyvom kozmického žiarenia. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 20 g/cm^2



5.2.3 Vplyv hrúbky vrstvy na produkciu γ -kvánt

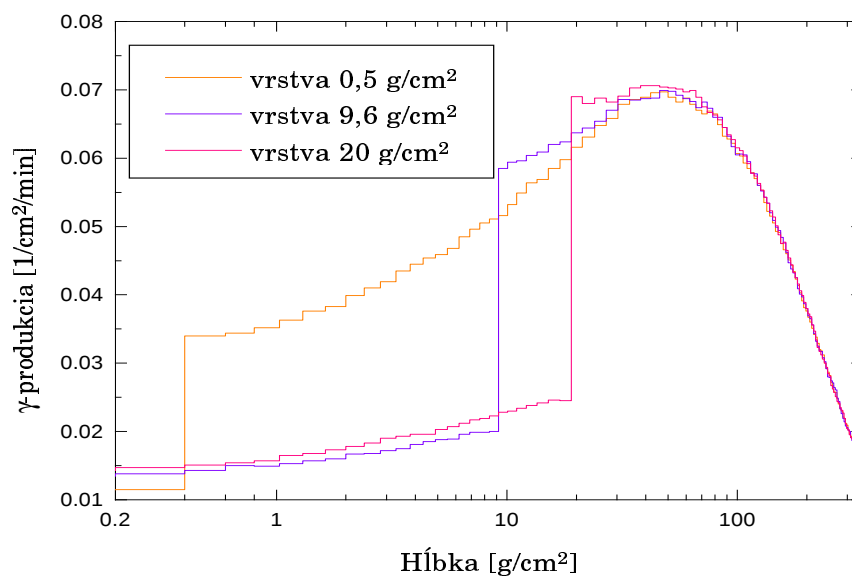
Produkcia γ -kvánt závisí od typu reakcie, v ktorej vzniká dané γ -kvantum, od miesta vzniku (hlúbky v kométe) a od chemického zloženia prostredia. V nasledujúcich obrázkoch sú vynesené závislosti produkcie γ -kvánt od hlúbky vo vrstvovej kométe pre niektoré typické reakcie.

Obrázok 8: Hĺbkový profil γ -produkcie pre vrstvovú kométu, pre čiaru produkovanú v reakcii ${}^1H(n, \gamma){}^2H$, $E = 2.2233$ MeV

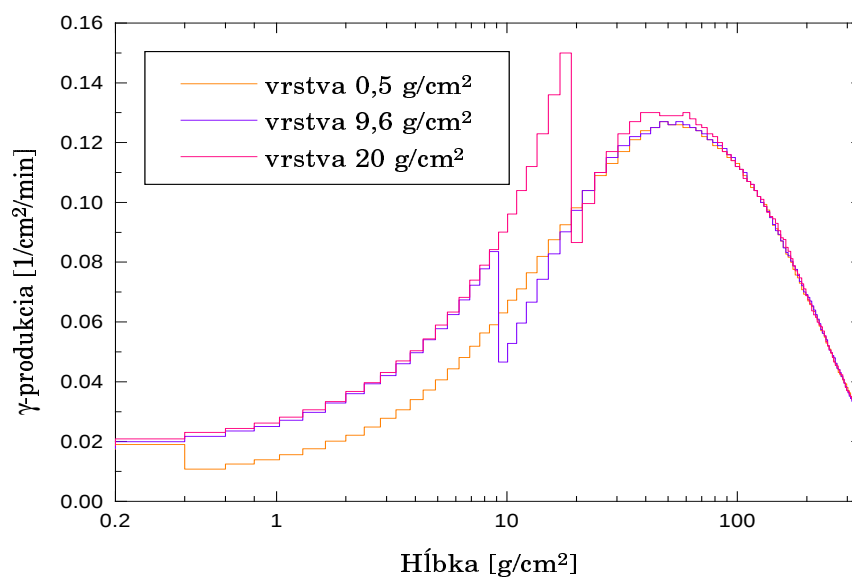


Produkcia γ -kvánt v reakcii neutrónového záchytu ${}^1H(n, \gamma){}^2H$, obr. (8) skokom rastie pri prechode do vnútornej časti kométy. Rovnaká situácia je aj pre γ -kvantá produkované v reakcii ${}^{12}C(n, n\gamma){}^{12}C$, obr. (9). Je to spôsobené tým, že koncentrácia oboch prvkov sa pri prechode z povrchovej vrstvy do vnútra podstatne zväčší, čo zapríčiní väčšiu γ -produkciu na týchto nuklidoch (viď. vzťah (9)). V prípade produkcie γ -kvánt v reakciách ${}^{56}Fe(n, \gamma){}^{57}Fe$ a ${}^{56}Fe(n, n\gamma){}^{57}Fe$ je situácia opačná (obr. (10) a (11)), lebo koncentrácia železa je väčšia v povrchovej vrstve. V prípade reakcie nepružného záchytu na železe (obr. (11)) je

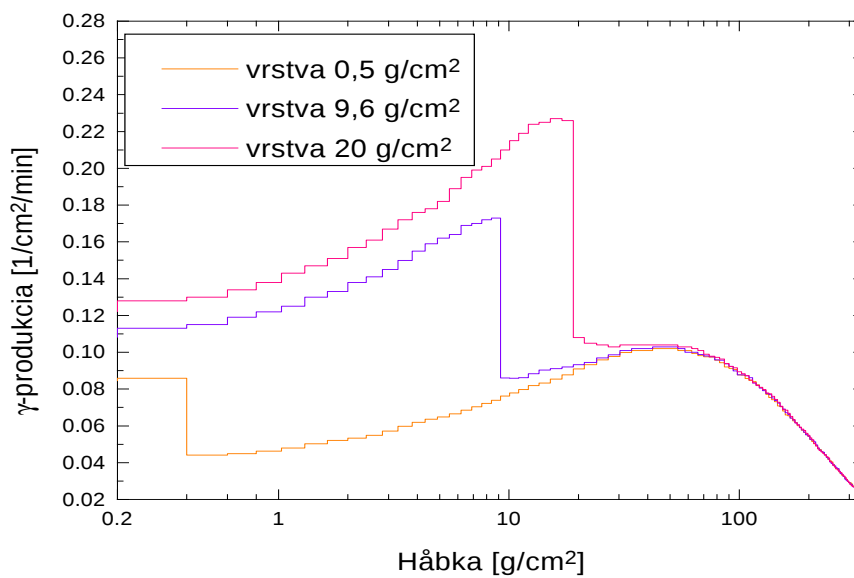
Obrázok 9: Hĺbkový profil γ -produkcie pre vrstvovú kométu, pre čiaru produkovanú v reakcii $^{12}\text{C}(n, n\gamma)^{12}\text{C}$, $E = 4.4383$ MeV



Obrázok 10: Hĺbkový profil γ -produkcie pre vrstvovú kométu, pre čiaru produkovanú v reakcii $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)^{57}\text{Fe}$, $E = 7.6313$ MeV



Obrázok 11: Hĺbkový profil γ -produkcie pre vrstvovú kométu, pre čiaru produkovanú v reakcii $^{56}\text{Fe}(n, n\gamma)^{57}\text{Fe}$, $E = 0.8467$ MeV

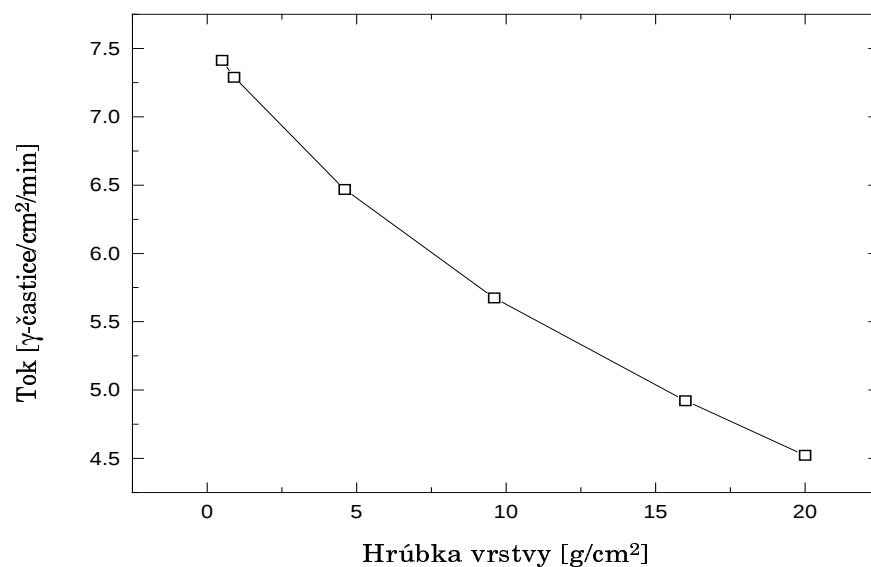


γ -produkcia vo vnútornej časti kométy výrazne menšia ako v povrchovej časti na rozdiel od reakcie záchytu neutrónu železom (obr. (10)), kedy pokles nie je až taký výrazný. Dôvod je ten, že vnútorná vrstva obsahuje viac vodíka, ktorý posúva maximum energetického spektra neutrónov produkujúcich γ -kvantá smerom k nižším hodnotám. Účinný prierez pre reakciu $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)^{57}\text{Fe}$ je vysoký pre pomalé neutróny, preto výrazný pokles koncentrácie železa vo vnútornej časti kométy nespôsobuje výrazný pokles v produkcii γ -kvánt.

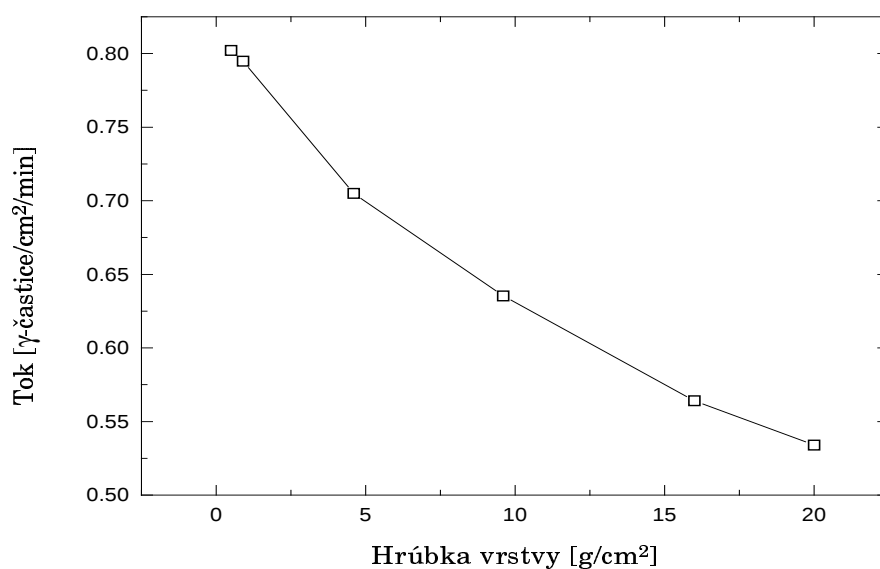
Z hľadiska určenia nehomogenít v chemickom zložení kométy je zaujímavé študovať vplyv hrúbky povrchovej vrstvy na tok γ -kvánt na povrchu kométy. Tieto závislosti pre niektoré najľahšie detegovateľné čiary sú v nasledujúcich obrázkoch.

Vysvetlíme tvar uvedených závislostí. Predpokladajme, že koncentrácia nuklidu produkujúceho γ -kvantá v povrchovej vrstve je väčšia ako vo vnútornej časti

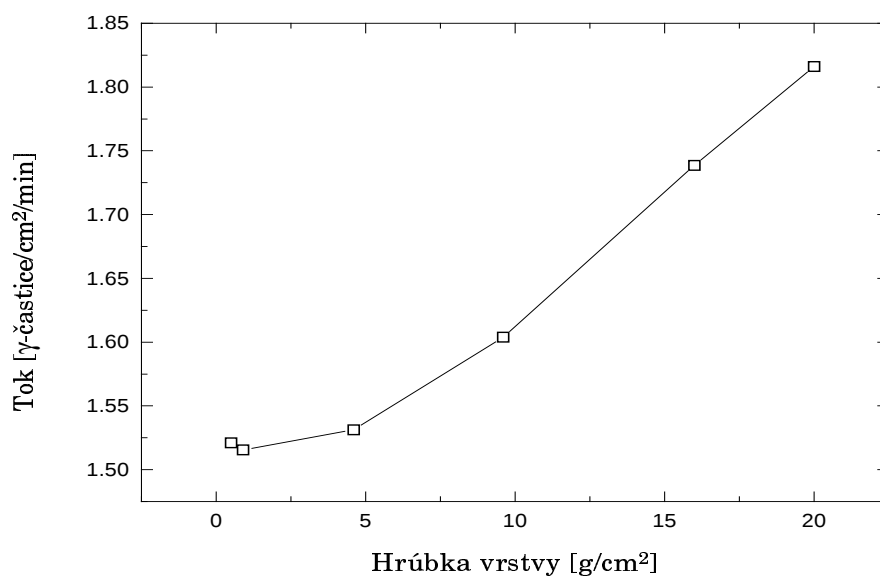
Obrázok 12: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$, energia 2.2233 MeV.



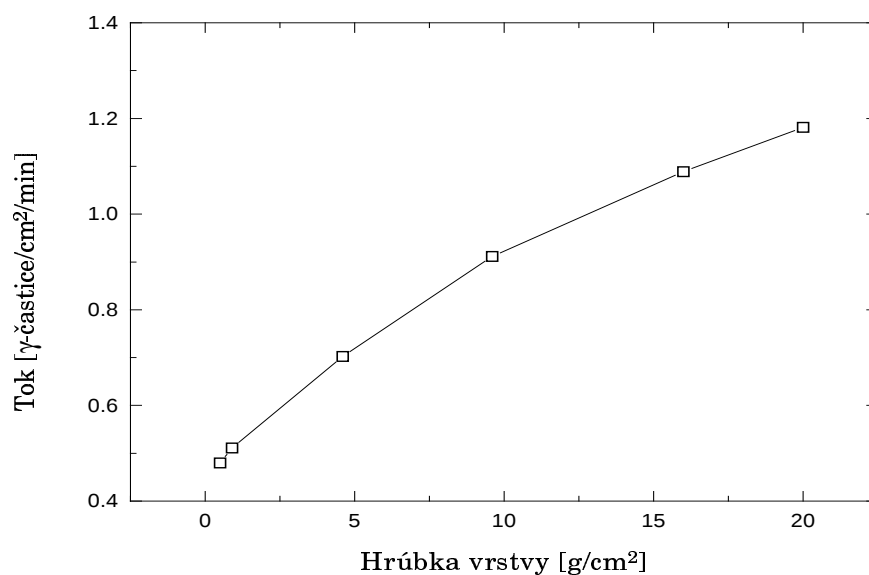
Obrázok 13: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia ${}^{12}\text{C}(n, n\gamma){}^{12}\text{C}$, energia 4.4383 MeV.



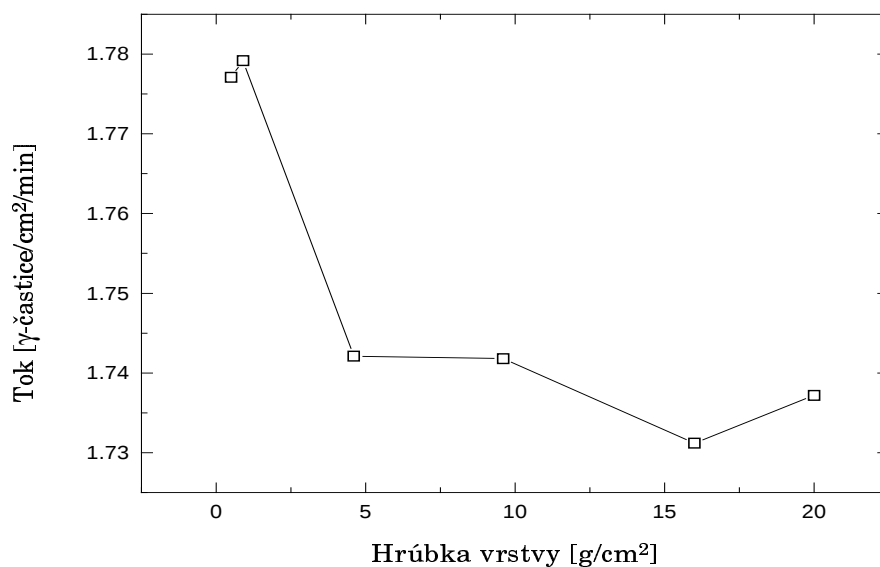
Obrázok 14: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)^{57}\text{Fe}$, energia 7.6313 MeV.



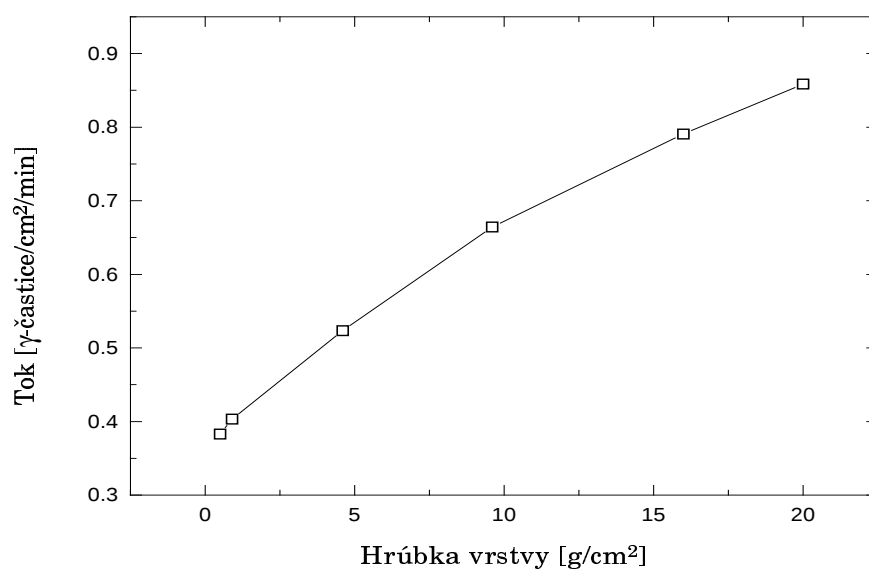
Obrázok 15: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia $^{56}\text{Fe}(n, n\gamma)^{56}\text{Fe}$, energia 0.8467 MeV.



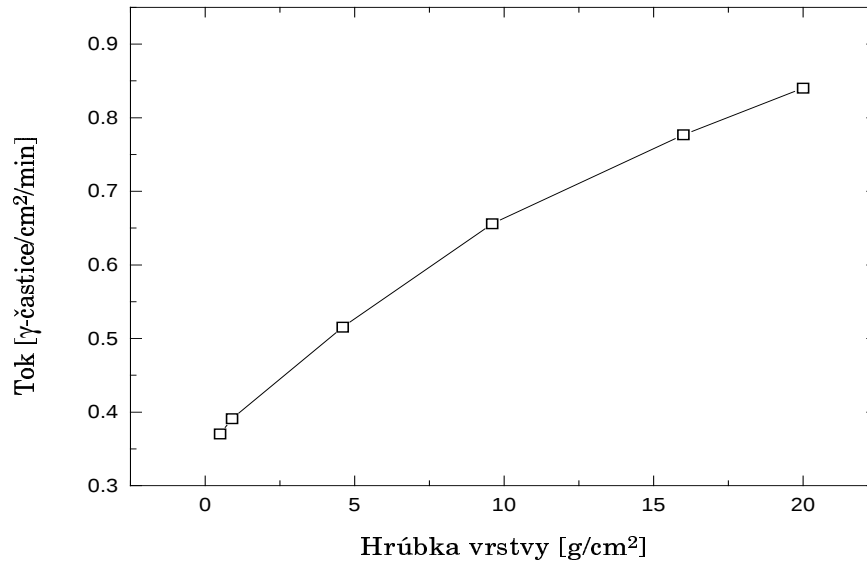
Obrázok 16: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia $^{16}\text{O}(n, n\gamma)^{16}\text{O}$, energia 6.1294 MeV.



Obrázok 17: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia $^{28}\text{Si}(n, n\gamma)^{28}\text{Si}$, energia 1.7788 MeV.



Obrázok 18: Závislosť intenzity danej čiary na povrchu kométy od hrúbky povrchovej vrstvy. Reakcia $^{24}\text{Mg}(n, n\gamma)^{24}\text{Mg}$, energia 1.3686 MeV.



kométy (v našom prípade Fe, Mg, Si). Zväčšovaním hrúbky povrchovej vrstvy sa tak vlastne zväčšuje efektívny objem pod detektorom, v ktorom sú γ -kvantá produkované. V tomto prípade je preto funkcia závislosti výsledného toku na povrchu od hrúbky vrstvy rastúca. Tento prípad je zobrazený v obrázkoch (18), (17), (15), (14). Je zaujímavé si všimnúť, že rastúce krivky pre γ -kvantá produkované v inelastických reakciách majú konkávny tvar. Je to spôsobené tým, že zväčšenie efektívneho objemu γ -zdroja je kompenzované zoslabením intenzity γ -žiarenia pri jeho transporte z väčších hĺbok k povrchu. Jediná konvexná krivka zodpovedá γ -kvantu produkovanému v reakcii neutrónového zachytu $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)^{57}\text{Fe}$ (obr. (14)). Dôvod je ten, že energia γ -kvánt je v tomto prípade relatívne veľká, preto preniknú do detektora aj z väčších hĺbok, kde je γ -produkcia väčšia (viď obrázok (10)).

Nech teraz máme γ -kvantum produkované na prvku, ktorého koncentrácia je

väčšia vo vnútornej časti kométy (H, C). Zväčšovaním hrúbky povrchovej vrstvy sa zväčšuje vzdialenosť detektora od miesta s najväčšou γ -produkciou a teda vplyvom atenuácie celkový tok klesá (obr. (12) a (13)).

Tvar krivky na obr. (16) súvisí s tým, že koncentrácia kyslíka je približne rovnaká v oboch častiach vrstvovej kométy. Preto aj závislosť na obr. (16) je prakticky konštantná, rozdiel medzi najväčšou a najmenšou hodnotou je menej ako 3%, čo je menej ako štatistické chyby simulácie.

Ukázali sme, že toky niektorých čiar monotónne závisia od hrúbky povrchovej vrstvy. Tento fakt môže byť použitý na určenie hrúbky tejto vrstvy. Z hľadiska detegovateľnosti príslušnej čiary (viď. nasledujúcu časť) a tvaru závislosti toku od hrúbky vrstvy sú na určenie hrúbky vhodné všetky čiary znázornené v tejto časti, okrem čiary kyslíka, $E = 6.1294$ MeV.

5.2.4 Časy potrebné na meranie s danou chybou, chyby merania pre daný čas merania pre prípad vrstvovej kométy

Podobne ako v prípade homogénnej kométy sme aj vo vrstvomom prípade počítali časy, resp. chyby merania.

Tabuľka 10: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 0.5 g/cm^2

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
				[fotóny/cm ² /min.]			Chyba [%]	
H	2.2233	C	0.0754	7.4132	0.0378	1.19	0.77	0.24
Fe	0.8467	I	0.181	0.4798	0.1052	4.34	2.8	0.89
O	6.1294	I	0.0194	1.7771	0.0135	5.47	3.53	1.12
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3702	0.063	6.47	4.17	1.32
Si	1.7788	I	0.0914	0.3831	0.0474	7.06	4.55	1.44
Fe	7.6313	C	0.0131	1.5211	0.0077	7.18	4.63	1.47
Fe	7.6457	C	0.0131	1.3956	0.0077	7.59	4.9	1.55
O	4.4383	I	0.0306	1.0243	0.1944	13.05	8.42	2.66
Fe	1.2383	I	0.1261	0.1345	0.0667	14.68	9.47	3
C	4.4383	I	0.0306	0.8022	0.1944	16.41	10.59	3.35
S	5.424	C	0.0226	0.3206	0.0158	18.03	11.64	3.68
Si	3.5395	C	0.0403	0.1907	0.0242	20	12.91	4.08

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 10: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
							Chyba [%]	
S	2.379	C	0.0665	0.1316	0.0332	20.15	13	4.11
Si	4.934	C	0.0281	0.2197	0.0173	21.36	13.79	4.36
Si	1.7789	I	0.0914	0.1014	0.0474	22.11	14.27	4.51
Ni	8.999	C	0.0093	0.252	0.005	31.47	20.31	6.42
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0604	0.063	32.17	20.77	6.57
Si	1.3686	I	0.1173	0.04	0.063	47.68	30.78	9.73
Mg	3.918	C	0.0385	0.0592	0.0221	59	38.08	12.04
Na	1.3686	C	0.1173	0.0266	0.063	71.05	45.86	14.5
Na	0.4399	I	0.3494	0.0166	0.2282	71.97	46.46	14.69
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0295	0.0291	82.42	53.2	16.82
Fe	0.8467	I	0.181	0.0182	0.1052	85.84	55.41	17.52
N	5.27	C	0.0222	0.0518	0.0161	98.22	63.4	20.05
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0235	0.0442	141.56	91.37	28.9
Si	2.2235	I	0.0754	0.0151	0.0378	149.4	96.44	30.5
Ti	1.3815	C	0.119	0.0106	0.0649	174.82	112.85	35.69
Al	2.2104	I	0.0686	0.0114	0.0412	225.11	145.31	45.95

Tabuľka 11: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 0.5 g/cm²

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
							Čas [hod.]	
H	2.2233	C	0.0754	7.4132	0.0378	0.14	0.02	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	0.4798	0.1052	1.89	0.21	0.08
O	6.1294	I	0.0194	1.7771	0.0135	2.99	0.33	0.12
Mg	1.3686	I	0.1173	0.3702	0.063	4.18	0.46	0.17
Si	1.7788	I	0.0914	0.3831	0.0474	4.98	0.55	0.2
Fe	7.6313	C	0.0131	1.5211	0.0077	5.15	0.57	0.21
Fe	7.6457	C	0.0131	1.3956	0.0077	5.76	0.64	0.23
O	4.4383	I	0.0306	1.0243	0.1944	17.02	1.89	0.68
Fe	1.2383	I	0.1261	0.1345	0.0667	21.54	2.39	0.86
C	4.4383	I	0.0306	0.8022	0.1944	26.92	2.99	1.08
S	5.424	C	0.0226	0.3206	0.0158	32.51	3.61	1.3
Si	3.5395	C	0.0403	0.1907	0.0242	40	4.44	1.6
S	2.379	C	0.0665	0.1316	0.0332	40.59	4.51	1.62
Si	4.934	C	0.0281	0.2197	0.0173	45.61	5.07	1.82
Si	1.7789	I	0.0914	0.1014	0.0474	48.9	5.43	1.96

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 11: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
Ni	8.999	C	0.0093	0.252	0.005	99.04	11	3.96
Mg	1.3686	I	0.1173	0.0604	0.063	103.51	11.5	4.14
Si	1.3686	I	0.1173	0.04	0.063	227.31	25.26	9.09
Mg	3.918	C	0.0385	0.0592	0.0221	348.09	38.68	13.92
Na	1.3686	C	0.1173	0.0266	0.063	504.83	56.09	20.19
Na	0.4399	I	0.3494	0.0166	0.2282	518.02	57.56	20.72
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0295	0.0291	679.34	75.48	27.17
Fe	0.8467	I	0.181	0.0182	0.1052	736.85	81.87	29.47
N	5.27	C	0.0222	0.0518	0.0161	964.74	107.19	38.59
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0235	0.0442	2003	222.65	80.15
Si	2.2235	I	0.0754	0.0151	0.0378	2232	248.02	89.29
Ti	1.3815	C	0.119	0.0106	0.0649	3056	339.59	122.2
Al	2.2104	I	0.0686	0.0114	0.0412	5067	563.06	202.7

Tabuľka 12: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 9.6 g/cm²

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
H	2.2233	C	0.0754	5.6734	0.0378	1.37	0.89	0.28
Fe	0.8467	I	0.181	0.9117	0.1052	2.71	1.75	0.55
Mg	1.3686	I	0.1173	0.6558	0.063	4.19	2.7	0.85
Si	1.7788	I	0.0914	0.6644	0.0474	4.66	3.01	0.95
O	6.1294	I	0.0194	1.7418	0.0135	5.54	3.58	1.13
Fe	7.6313	C	0.0131	1.604	0.0077	6.94	4.48	1.42
Fe	7.6457	C	0.0131	1.4715	0.0077	7.33	4.73	1.5
Fe	1.2383	I	0.1261	0.242	0.0667	8.79	5.68	1.79
O	4.4383	I	0.0306	0.9855	0.1944	13.52	8.73	2.76
Si	1.7789	I	0.0914	0.1742	0.0474	13.6	8.78	2.78
S	5.424	C	0.0226	0.3472	0.0158	16.87	10.89	3.44
S	2.379	C	0.0665	0.1503	0.0332	17.89	11.55	3.65
Si	3.5395	C	0.0403	0.2104	0.0242	18.35	11.85	3.75
Mg	1.3686	I	0.1173	0.103	0.063	19.52	12.6	3.99
Si	4.934	C	0.0281	0.2376	0.0173	19.96	12.88	4.07
C	4.4383	I	0.0306	0.6354	0.1944	20.47	13.21	4.18
Ni	8.999	C	0.0093	0.2636	0.005	30.3	19.56	6.19
Si	1.3686	I	0.1173	0.064	0.063	30.42	19.64	6.21
Na	0.4399	I	0.3494	0.0329	0.2282	36.63	23.64	7.48

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 12: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
Fe	0.8467	I	0.181	0.0328	0.1052	48.32	31.19	9.86
Fe	2.5231	I	0.0623	0.049	0.0291	50.56	32.64	10.32
Mg	3.918	C	0.0385	0.0648	0.0221	54.08	34.91	11.04
Na	1.3686	C	0.1173	0.0312	0.063	60.71	39.19	12.39
Si	2.2235	I	0.0754	0.0252	0.0378	90.09	58.15	18.39
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0269	0.0442	123.78	79.9	25.27
N	5.27	C	0.0222	0.0387	0.0161	130.42	84.19	26.62
Al	2.2104	I	0.0686	0.0194	0.0412	133.48	86.16	27.25
Ti	1.3815	C	0.119	0.0125	0.0649	149.46	96.48	30.51
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0095	0.1005	184.41	119.03	37.64

Tabuľka 13: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 9.6 g/cm²

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	5.6734	0.0378	0.19	0.02	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	0.9117	0.1052	0.74	0.08	0.03
Mg	1.3686	I	0.1173	0.6558	0.063	1.75	0.19	0.07
Si	1.7788	I	0.0914	0.6644	0.0474	2.17	0.24	0.09
O	6.1294	I	0.0194	1.7418	0.0135	3.07	0.34	0.12
Fe	7.6313	C	0.0131	1.604	0.0077	4.82	0.54	0.19
Fe	7.6457	C	0.0131	1.4715	0.0077	5.38	0.6	0.22
Fe	1.2383	I	0.1261	0.242	0.0667	7.73	0.86	0.31
O	4.4383	I	0.0306	0.9855	0.1944	18.29	2.03	0.73
Si	1.7789	I	0.0914	0.1742	0.0474	18.49	2.05	0.74
S	5.424	C	0.0226	0.3472	0.0158	28.45	3.16	1.14
S	2.379	C	0.0665	0.1503	0.0332	32.02	3.56	1.28
Si	3.5395	C	0.0403	0.2104	0.0242	33.68	3.74	1.35
Mg	1.3686	I	0.1173	0.103	0.063	38.11	4.23	1.52
Si	4.934	C	0.0281	0.2376	0.0173	39.84	4.43	1.59
C	4.4383	I	0.0306	0.6354	0.1944	41.9	4.66	1.68
Ni	8.999	C	0.0093	0.2636	0.005	91.84	10.2	3.67
Si	1.3686	I	0.1173	0.064	0.063	92.54	10.28	3.7
Na	0.4399	I	0.3494	0.0329	0.2282	134.15	14.91	5.37
Fe	0.8467	I	0.181	0.0328	0.1052	233.47	25.94	9.34
Fe	2.5231	I	0.0623	0.049	0.0291	255.65	28.41	10.23

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 13: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
							Čas [hod.]	
Mg	3.918	C	0.0385	0.0648	0.0221	292.49	32.5	11.7
Na	1.3686	C	0.1173	0.0312	0.063	368.52	40.95	14.74
Si	2.2235	I	0.0754	0.0252	0.0378	811.59	90.18	32.46
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0269	0.0442	1532	170.23	61.28
N	5.27	C	0.0222	0.0387	0.0161	1701	189	68.04
Al	2.2104	I	0.0686	0.0194	0.0412	1782	197.96	71.26
Ti	1.3815	C	0.119	0.0125	0.0649	2234	248.2	89.35
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0095	0.1005	3401	377.84	136.02

Tabuľka 14: Chyba určenia danej čiary pri dobe merania 10, 24 a 240 hod. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 20 g/cm²

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
							Chyba [%]	
H	2.2233	C	0.0754	4.5236	0.0378	1.55	1	0.32
Fe	0.8467	I	0.181	1.1816	0.1052	2.27	1.47	0.46
Mg	1.3686	I	0.1173	0.8401	0.063	3.51	2.27	0.72
Si	1.7788	I	0.0914	0.8587	0.0474	3.89	2.51	0.79
O	6.1294	I	0.0194	1.7372	0.0135	5.55	3.58	1.13
Fe	7.6313	C	0.0131	1.8162	0.0077	6.42	4.14	1.31
Fe	7.6457	C	0.0131	1.6661	0.0077	6.78	4.37	1.38
Fe	1.2383	I	0.1261	0.306	0.0667	7.24	4.67	1.48
Si	1.7789	I	0.0914	0.2171	0.0474	11.25	7.26	2.3
O	4.4383	I	0.0306	0.9617	0.1944	13.84	8.93	2.82
S	5.424	C	0.0226	0.4029	0.0158	14.92	9.63	3.04
S	2.379	C	0.0665	0.179	0.0332	15.36	9.91	3.13
Si	3.5395	C	0.0403	0.2451	0.0242	16.09	10.38	3.28
Mg	1.3686	I	0.1173	0.1245	0.063	16.41	10.59	3.35
Si	4.934	C	0.0281	0.2738	0.0173	17.68	11.42	3.61
C	4.4383	I	0.0306	0.5339	0.1944	24.18	15.61	4.94
Si	1.3686	I	0.1173	0.075	0.063	26.21	16.92	5.35
Ni	8.999	C	0.0093	0.2967	0.005	27.48	17.74	5.61
Na	0.4399	I	0.3494	0.0419	0.2282	28.97	18.7	5.91
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0626	0.0291	40.08	25.87	8.18
Fe	0.8467	I	0.181	0.0393	0.1052	40.56	26.18	8.28
Mg	3.918	C	0.0385	0.0752	0.0221	46.97	30.32	9.59
Na	1.3686	C	0.1173	0.0369	0.063	51.56	33.28	10.52
Si	2.2235	I	0.0754	0.0322	0.0378	71.09	45.89	14.51

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 14: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10 h.	24 h.	240 h.
						Chyba [%]		
Al	2.2104	I	0.0686	0.025	0.0412	103.82	67.01	21.19
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0317	0.0442	105.28	67.96	21.49
Ti	1.3815	C	0.119	0.0147	0.0649	126.97	81.96	25.92
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0109	0.1005	160.39	103.53	32.74
N	5.27	C	0.0222	0.0273	0.0161	183.84	118.67	37.53
Cr	8.884	C	0.0078	0.0368	0.0052	221.99	143.3	45.31

Tabuľka 15: Čas potrebný na meranie γ -spektra z povrchu kométy na dosiahnutie presnosti 10, 30 a 50%. Vysvetlivky sú v tab. č. 2. Vrstvová kométa, hrúbka vrstvy 20 g/cm²

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok [fotóny/cm ² /min.]	Pozadie	10%	30%	50%
						Čas [hod.]		
H	2.2233	C	0.0754	4.5236	0.0378	0.24	0.03	0.01
Fe	0.8467	I	0.181	1.1816	0.1052	0.52	0.06	0.02
Mg	1.3686	I	0.1173	0.8401	0.063	1.23	0.14	0.05
Si	1.7788	I	0.0914	0.8587	0.0474	1.51	0.17	0.06
O	6.1294	I	0.0194	1.7372	0.0135	3.08	0.34	0.12
Fe	7.6313	C	0.0131	1.8162	0.0077	4.12	0.46	0.16
Fe	7.6457	C	0.0131	1.6661	0.0077	4.59	0.51	0.18
Fe	1.2383	I	0.1261	0.306	0.0667	5.24	0.58	0.21
Si	1.7789	I	0.0914	0.2171	0.0474	12.65	1.41	0.51
O	4.4383	I	0.0306	0.9617	0.1944	19.14	2.13	0.77
S	5.424	C	0.0226	0.4029	0.0158	22.25	2.47	0.89
S	2.379	C	0.0665	0.179	0.0332	23.59	2.62	0.94
Si	3.5395	C	0.0403	0.2451	0.0242	25.87	2.87	1.03
Mg	1.3686	I	0.1173	0.1245	0.063	26.94	2.99	1.08
Si	4.934	C	0.0281	0.2738	0.0173	31.27	3.47	1.25
C	4.4383	I	0.0306	0.5339	0.1944	58.49	6.5	2.34
Si	1.3686	I	0.1173	0.075	0.063	68.69	7.63	2.75
Ni	8.999	C	0.0093	0.2967	0.005	75.5	8.39	3.02
Na	0.4399	I	0.3494	0.0419	0.2282	83.92	9.32	3.36
Fe	2.5231	I	0.0623	0.0626	0.0291	160.64	17.85	6.43
Fe	0.8467	I	0.181	0.0393	0.1052	164.54	18.28	6.58
Mg	3.918	C	0.0385	0.0752	0.0221	220.62	24.51	8.82
Na	1.3686	C	0.1173	0.0369	0.063	265.86	29.54	10.63
Si	2.2235	I	0.0754	0.0322	0.0378	505.32	56.15	20.21
Al	2.2104	I	0.0686	0.025	0.0412	1078	119.76	43.11

pokračovanie na nasledujúcej strane

Tabuľka 15: (pokračovanie)

El.	Energia [MeV]	M	Ef.	Tok	Pozadie	10%	30%	50%
				[fotóny/cm ² /min.]			Čas [hod.]	
Ca	1.9427	C	0.0553	0.0317	0.0442	1108	123.15	44.33
Ti	1.3815	C	0.119	0.0147	0.0649	1612	179.13	64.49
Fe	0.9834	I	0.1575	0.0109	0.1005	2572	285.83	102.9
N	5.27	C	0.0222	0.0273	0.0161	3380	375.54	135.19
Cr	8.884	C	0.0078	0.0368	0.0052	4928	547.57	197.12

5.3 Vplyv reaktora na produkciu γ -kvánt

Pre zabezpečenia dostatočnej energie pre všetky experimentálne zariadenia v misii ROSETTA je potrebný energetický zdroj. Pre tieto účely sa na palube pristávacieho modulu predpokladá jadrový reaktor (RHU–radioactive heating unit). Reaktor je silným zdrojom neutrónov, ktoré prispievajú k tvorbe γ -žiarenia v kométe aj v samotnom pristávacom module. Vplyv takto produkovaných γ -kvánt na výsledné spektrum je skúmaný v tejto časti.

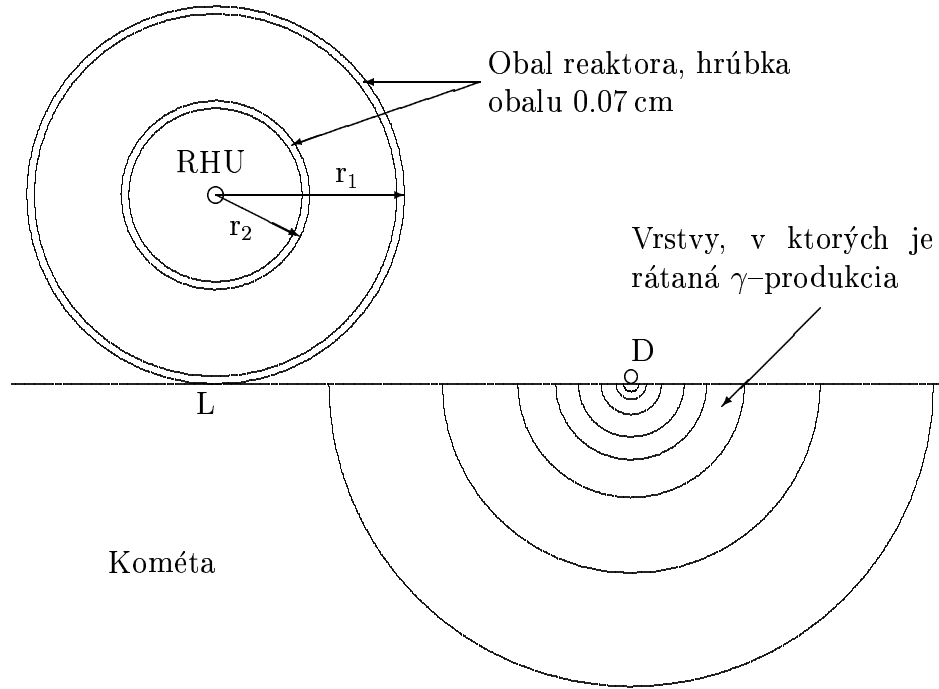
5.3.1 Použité parametre

Modelovanie vplyvu reaktora na γ -produkciiu sme robili v geometrii znázornenej na obrázku (19). Kométa bola rozdelená na veľa vrstiev s malou hrúbkou pri povrchu a väčšou hrúbkou vo väčších hĺbkach⁶, v ktorých bola rátaná stredná produkcia γ -kvánt (vzťah (9)). Tok γ -žiarenia v mieste detektora sme potom počítali podľa vzťahu analogického s (11). Chemické zloženie kométy bolo modelované ako chemické zloženia č. 5, (tabuľka 1). Reaktor sme modelovali ako neutrónový zdroj s intenzitou 10^6 neutrónov/s a energetickým spektrom

$$p(E) = C e^{\frac{-E}{a}} \sinh \sqrt{bE}, \quad (23)$$

pričom $a = 0.779$ MeV, $b = 4.903$ MeV, C je normalizačná konštanta. Pri počítaní produkcie γ -kvánt v obale reaktora sme modelovali jeho chemické zloženie ako (1) 100% Al, (2) 70% Al+20% Mg+10% Ti.

⁶Na tok γ -kvánt na povrchu majú najväčší vplyv oblasti tesne pod povrchom, preto je treba γ -produkciiu pod povrchom počítat detailnejšie ako vo väčších hĺbkach



Obrázok 19: Geometria uvažovaná v prípade modelovania vplyvu reaktora na produkciu γ -žiarenia. RHU – zdroj neutrónov (reaktor), D – detektor, $r_1 = 50$ cm, $r_2 = 25$ cm, $|LD| = 200$ cm.

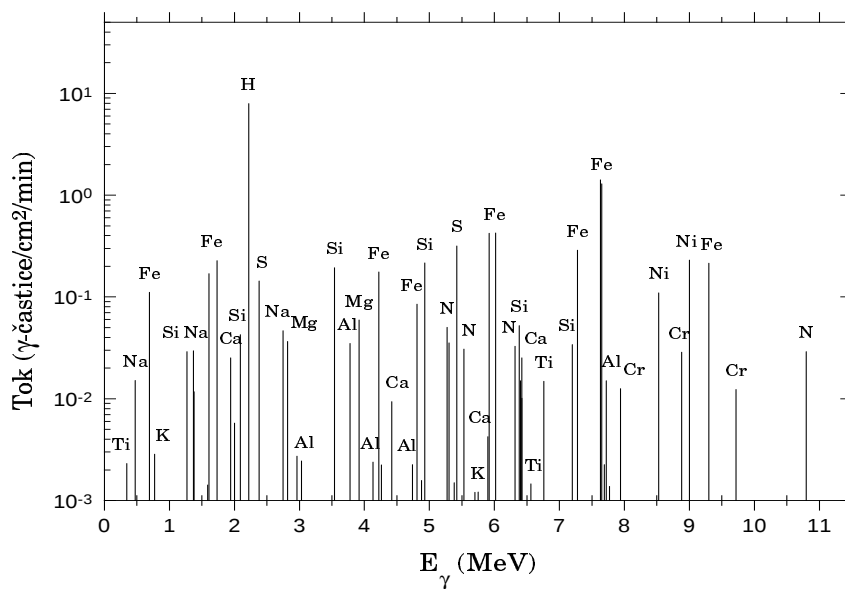
5.3.2 Produkcia γ -kvánt v kométe vplyvom reaktorových neutrónov

Na obrázku (20) je čiarové spektrum na povrchu kométy od γ -kvánt produkovaných v kométe vplyvom neutrónov z reaktora v reakciách záchytu termálnych a epitermálnych neutrónov. Reakcie nepružného rozptylu nemajú na γ -produkciu výrazný vplyv kvôli relatívne nízkym energiám primárnych neutrónov, preto sme ich v tejto simulácii neuvažovali.

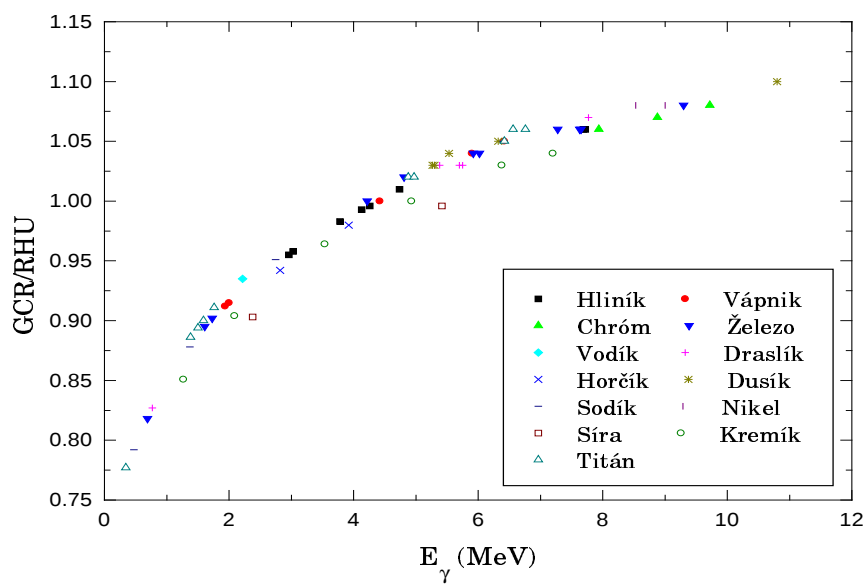
Toky γ -kvánt produkovaných vplyvom častíc galaktického kozmického žiarenia môžu byť podstatne zväčšené s príspevkom γ -kvánt produkovaných vplyvom neutrónov z reaktora. Na obrázku (21) je vynesný pomer intenzít príslušných čiar produkovaných vplyvom kozmického žiarenia a vplyvom RHU.

Ako vidíme (obr. (21)) γ -kvantá produkované vplyvom reaktorových neu-

Obrázok 20: Čiarové γ -spektrum na povrchu kométy. Gama kvantá sú produkované vplyvom neutrónov z RHU v reakciách (n, γ) .



Obrázok 21: Pomer tokov γ -kvánt produkovaných vplyvom galaktického kozmického žiarenia a reaktorových neutrónov (GCR/RHU)



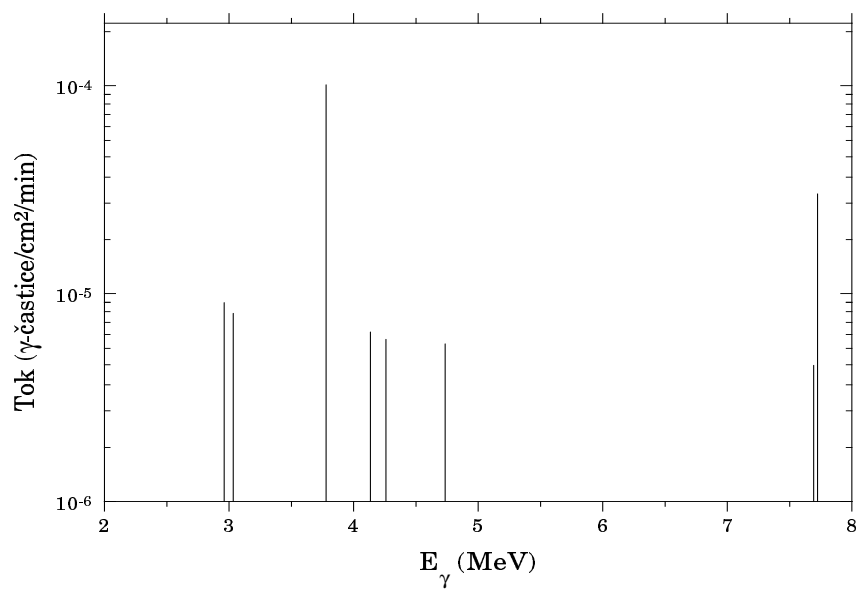
trónov majú približne rovnakú intenzitu ako γ -kvantá produkovaný vplyvom kozmického žiarenia. Výsledné toky sa tak zväčšia približne dvakrát. Vidíme, že zväčšovaním energie γ -kvanta pomer GCR/RHU mierne rastie. Vysvetliť to môžeme tak, že maximum γ -produkcie vplyvom neutrónov z RHU je v menšej hĺbke ako maximum γ -produkcie vplyvom častíc galaktického kozmického žiarenia, vzhľadom na energiu týchto častíc. Preto aj pomer GCR/RHU s hĺbkou rastie. Tok nízkoenergetických γ -kvánt je pri transporte z väčších hĺbok potlačený výraznejšie ako tok γ -kvánt s väčšou energiou. Pomer GCR/RHU na povrchu kométy je teda rastúcou funkciou energie γ -kvánt.

Veľký príspevok do spektra od γ -kvánt produkovaných vplyvom reaktorových neutrónov však nemusí znamenať skrátenie doby merania potrebnej na dosiahnutie dostatočnej štatistiky, pretože prítomnosť reaktora okrem toho, že pozitívne zvyšuje intenzitu niektorých čiar v spektra, negatívne zaťažuje detektor výrazným pozadím, ktoré podstatne zväčšuje chyby merania (viď. vzťah (22)). Modelovanie vplyvu reaktora na γ -produkciiu tak môže determinovať podmienky, za ktorých sa chemická analýza povrchu kométy za prítomnosti reaktora zvýhodní, alebo naopak úplne znemožní.

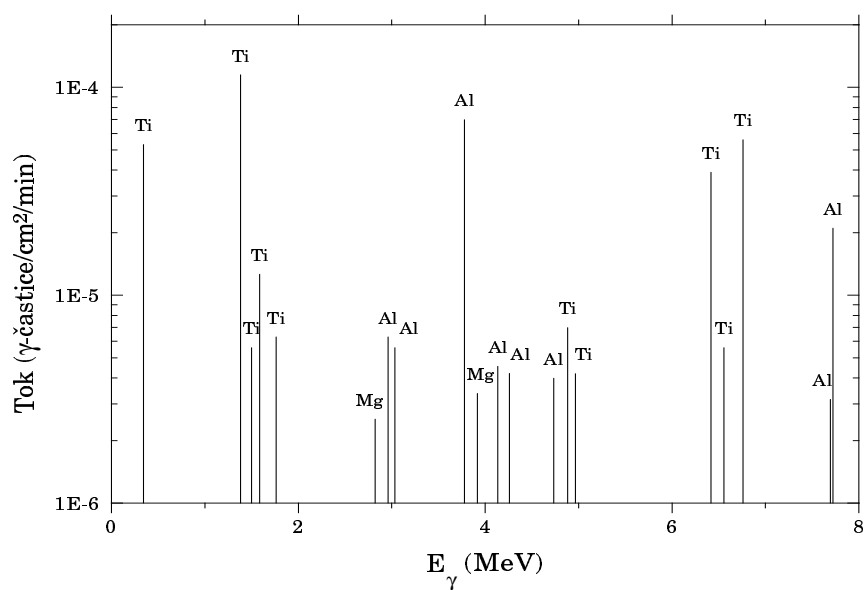
5.3.3 Produkcia γ -kvánt v obale reaktora

Simulovali sme aj produkciu γ -žiarenia v obale reaktora. Čiarové spektrá v mieste detektora získané týmto spôsobom sú na obrázkoch (22) a (23). Vidíme že príspevok γ -kvánt produkovaných v obale do spektra v mieste detektora je viac ako o dva rády menší ako od γ -kvánt produkovaných v kométe vplyvom kozmického žiarenia prípadne vplyvom reaktorových neutrónov. Je to spôsobené veľmi tenkou hrúbkou obalu reaktora a relatívne veľkou vzdialenosťou obalu od reaktora. Môžeme povedať, že obal reaktora má nepodstatný vplyv na γ -spektrum merané detektorom na povrchu kométy.

Obrázok 22: Čiarové γ -spektrum v mieste detektora od γ -kvánt produkovaných v obale reaktora. Zloženie obalu: 100% Al



Obrázok 23: Čiarové γ -spektrum v mieste detektora od γ -kvánt produkovaných v obale reaktora. Zloženie obalu: 70% Al, 20% Mg, 10% Ti.



5.4 Chyby v našich simuláciách

Výsledky, ktoré sú uvedené v tejto práci sú zaťažené príspevkom troch druhov chýb:

1. Systematické chyby použitých kódov.
2. Štatistické chyby simulácií.
3. Chyby niektorých použitých parametrov.

Systematické chyby použitých kódov systému LCS nie sú presne známe. Predpokladá sa že sa pohybujú na úrovni 10%. Štatistické chyby pre homogénnu aj vrstvovú kométu pre toky γ -žiarenia produkovaného v reakciách neutrónového záchytu vplyvom galaktického kozmického žiarenia sú približne 5%, rovnakú štatistickú chybu majú aj vypočítané neutrónové toky. Výsledky pre γ -produkciiu v kométe vplyvom reaktorových neutrónov majú štatistickú chybu $\sim 15\%$, γ -produkcia v obale je určená s chybou menšou ako 5%.

Pri výpočte transportu γ -žiarenia z danej hĺbky v kométe na povrch (vzťah (11)) bolo použité numerické integrovanie a celkový tok γ -žiarenia na povrchu (vzťah (20)) sa rátať súčtom príspevkov z jednotlivých hĺbok. Chyba tohto postupu bola ohodnotená nasledovne. Integrál (20) s uvažovaním (11) môže byť za predpokladu konštantnej produkcie $A(r) = A$, pre prípad polonekonečnej vrstvy (t.j. guľa s polomerom $R \rightarrow \infty$) zrátaný analyticky:

$$I = \frac{A}{2\mu}. \quad (24)$$

Použijúc konštantnú produkciu γ -žiarenia sme naším numerickým postupom získali hodnotu výsledného γ -toku na povrchu, ktorá sa od hodnoty vypočítanej pomocou (24) líšila menej ako o 1%.

Významný príspevok do výslednej chyby majú nepresnosti použitých účinných prierezov. Tieto chyby sú pre rôzne účinné prierezy rôzne, závisia od experimentu, v ktorom bol ten-ktorý účinný prierez určený. Pre niektoré účinné prierezy chyby nie sú známe, pre ostatné sú chyby na úrovni 15%.

Pre výpočet časov resp. chýb merania je potrebná znalosť účinnosti detektora a pozadia pre danú čiaru. Tieto hodnoty, ako sme už spomenuli v časti 5.1.1 boli získané v predchádzajúcich simuláciách. Experimentálne testy spomenutých simulácií určili chyby týchto parametrov na úroveň 10%.

6 Záver

V predkladanej diplomovej práci sme modelovali produkciu γ -žiarenia v kométe za rôznych podmienok využívajúc programový systém LCS na výpočet tokov sekundárnych neutrónov a na výpočet produkcie γ -kvánt v reakciách (n,γ) . Na výpočet γ -produkcie v reakciách $(n,n\gamma)$ a transport γ -kvánt na povrch kométy boli vyvinuté vlastné programy. Výsledky možno zhrnúť nasledovne:

- Pomocou napočítaných tokov γ -kvánt sme určili časy potrebné na meranie príslušných čiar a chyby, ktorými je meranie zaťažené. Toto sme urobili pre homogénnu kométu s rôznymi chemickými zloženiami a aj pre kométu s vrstvovým členením s rôznou hrúbkou povrchovej vrstvy. Na základe týchto hodnôt je možné rozhodnúť, ktoré chemické prvky budú možné v kométe určiť, resp. optimalizovať dobu zberu dát na povrchu kométy.
- Detailne sme preskúmali vplyv hrúbky povrchovej vrstvy na intenzitu niektorých najľahšie detegovateľných čiar. Ukázali sme, že závislosť toku γ -kvánt na povrchu od hrúbky povrchovej vrstvy je pre niektoré čiary monotónna. Na základe toho môže byť γ -spektrometria povrchu kométy za určitých podmienok použitá na charakterizovanie jej vrstvovej štruktúry. Našli sme čiary, ktoré sú na tento účel najvhodnejšie.
- Určili sme príspevok γ -kvánt produkovaných v kométe vplyvom neutrónov z reaktora prítomného v pristávacom module. Ukázali sme, že reaktor môže výrazne zvýšiť toky výsledných γ -kvánt. To však nemusí znamenať skrátenie potrebných meracích dôb, lebo okrem zväčšenia intenzity čiar sa zväčší aj pozadie.
- Vypočítali sme produkciu γ -kvánt v obale reaktora pre dve možné chemické zloženia obalu. Príspevok od takto produkovaných γ -kvánt do celkového γ -spektra je zanedbateľný.

Spomenuté výsledky môžu prispieť k optimalizácii γ -spektrometrického experimentu na povrchu kométy – určenie doby merania γ -spektra, určenie optimálnej geometrie experimentu, výber materiálov pristávacieho modulu, atď.

Primárny význam týchto simulácií však spočíva v možnosti určenia chemického zloženia skúmaného objektu. Pre tieto účely bude potrebné vyvinúť algoritmus, ktorý určí chemické zloženie neznámeho objektu na základe γ -spektra experimentálne získaného na povrchu objektu a spektier nasimulovaných pre rôzne chemické zloženia. Ďalej bude vhodné preskúmať príspevok γ -kvánt produkovaných v jadrových reakciách s protónmi, hoci tento príspevok nebude výrazný⁷ [12].

V prípade kométy sa nepredkladá, že bude možné skúmať vzorky jej povrchu v pozemských laboratóriách (na rozdiel od vzoriek z Mesiaca). Vhodnou metódou na extahovanie chemických informácií priamo na povrchu kométy je γ -spektrometria. V tejto práci sme preskúmali vlastnosti gamaspektrometrie v podmienkach kométy v závislosti od niektorých parametrov. Dúfame, že naše výsledky prispedia k plánovaniu a analýze niektorých experimentov v kozme.

⁷Protóny, keďže sú to nabité častice, stratia často celú svoju energiu v ionizácii, preto neprodujú žiadny γ -kvánt ako neutróny.

Zoznam použitej literatúry

- [1] M. F. A'Hearn. Observations of cometary nuclei. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16, 273–291, 1988.
- [2] J. M. Blatt a V. F. Weisskopf. *Theoretical nuclear physics*. Springer–Verlag, New York Inc. 1979., str. 365–374.
- [3] J. Brückner a J. Masarik. Planetary gamma–ray spectroscopy of the surface of Mercury. *Planet. Space Sci.*, 45, 39–48, 1997.
- [4] J. F. Briesmeister. MCNP – A general Monte Carlo N–particle transport code, version 4A, Rep. *LA–12625–M*, 693 pp., Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M., 1993.
- [5] G. Dagge, P. Dragovitsch, D. Filges, a J. Brückner. Monte Carlo simulation of Martian gamma–ray spectra induced by galactic cosmic rays. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 21, 425–435, 1991.
- [6] L. G. Evans, R. C. Reedy, a J. I. Trombka. Introduction to Planetary Remote–Sensing Gamma–Ray Spectroscopy, *LA–UR–89–2157*, 54 pp., Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M., 1993.
- [7] M. Grendár. *Monte Carlo simulácia evaporačných procesov*. Diplomová práca, MFF UK, Bratislava, 1992.
- [8] F. G. Komro a F. N. Hujbert. Mars Observer Instrument Complement. *J. Spacecraft*, 28, 501–506, 1991.
- [9] R. J. Lapidés. *Planetary gamma–ray spectroscopy: The effects of hydrogen and the macroscopic thermal–neutron absorbtion cross section on the gamma–ray spectrum*. Dizertačná práca, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 1981.
- [10] J. Masarik. Osobná diskusia, 1997, 1998.

- [11] J. Masarik. *Doktorantská dizertačná práca*. MFF UK Bratislava, 1997.
- [12] J. Masarik a R. C. Reedy. Gamma ray production and transport in Mars. *Journal of Geophysical Research*, 101, 18,891–18,912, August 1996.
- [13] S. Palocz. Mars Observer Mission and System Overview. *J. Spacecraft*, 28, 491–497, 1991.
- [14] R. E. Prael a H. Lichtenstein. User guide to LCS: The LAHET code system, Rep. *LA-UR-89-3014* 76 pp., Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M., 1989.
- [15] R. C. Reedy a J. R. Arnold. Interaction of solar and galactic cosmic-ray particles with the Moon. *J. Geophys. Res.*, 77, 537–555, Február 1979.
- [16] R. C. Reedy, J. R. Arnold, a J. I. Trombka. Expected γ -ray emission spectra from lunar surface as a function of chemical composition. *Journal of Geophysical Research*, 78, 5847–5867, September 1973.
- [17] H. Timpl at al. ROSETTA Mission: Instrument for determination of the elemental composition of the cometary surface by measuring gamma rays. Technical report, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Jún 1995.
- [18] F. Čulík a M. Noga. *Úvod do štatistickej fyziky a termodynamiky*. Alfa, Bratislava, 1993, str. 226–231.