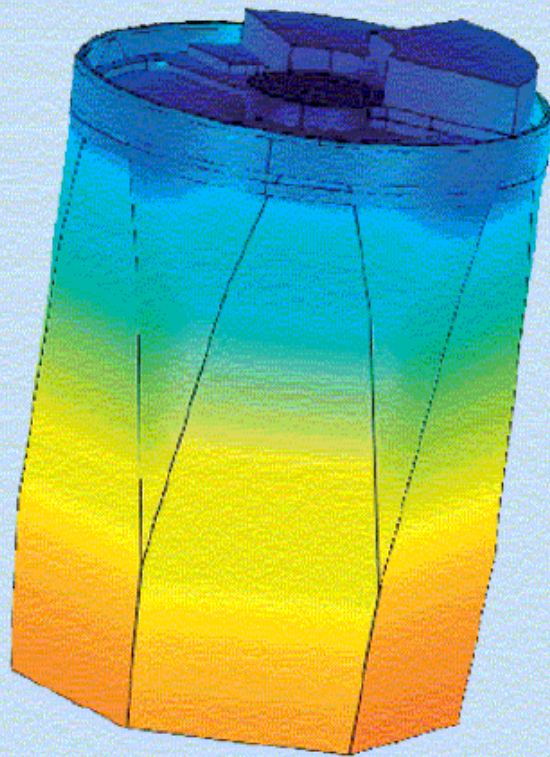


Physik Journal

Best of

Simulierte Kühlung



Laser

Vakuumtechnik

Simulierte Kühlung

Eine Simulation zeigt, ob sich ein aus drei Germanium-Kristallen zusammengesetzter Detektor mit einem mechanischen Kühlgerät kühlen lässt.

Jasmina Kojouharova, Melanie Wolf und Hans-Jürgen Wollersheim

Schon der Philosoph Demokrit (460 – 370 v. Chr.) stellte sich die Frage nach der Struktur der Materie und betrachtete die Atome als kleinste Bausteine. Seitdem erträumen sich die Forscher, tiefer in die Struktur der Materie einblicken zu können.

Gamma-Strahlung entsteht bei fast allen radioaktiven Zerfällen, aber auch in Beschleunigerexperimenten, wie sie bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt von Forschern aus aller Welt durchgeführt werden. Die Messung und Auswertung von Gamma-Strahlen liefert grundlegende Einblicke in die Gestalt der Atomkerne und die Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie.

Germanium-Detektoren werden zum Nachweis von Gamma-Strahlung im Rahmen der Hyperkernspektroskopie und als Hauptmesstechnik zur Untersuchung der bei der GSI erzeugten exotischen Kerne verwendet. Hierbei produziert die elektromagnetische Strahlung viele freie Ladungsträger, die eine Spektroskopie mit hoher Auflösung ermöglicht. Da die Größe der hochreinen Germanium-Kristalle begrenzt ist, werden häufig mehrere Kristalle zu einem hoch effizienten Detektor zusammengesetzt.

Um Gitterschwingungen der Germanium-Kristalle zu minimieren, werden die Detektoren in einem Temperaturbereich von 77 bis 115 K betrieben. Die erforderliche Temperatur lässt sich normalerweise durch das Kühlen mit flüssigem Stickstoff erreichen. Die Nachteile dabei sind die regelmäßige Versorgung mit flüssigem Stickstoff und die notwendigen Vorratsbehälter am Detektor, die die Größe der Kristalle um ein Vielfaches übersteigen.

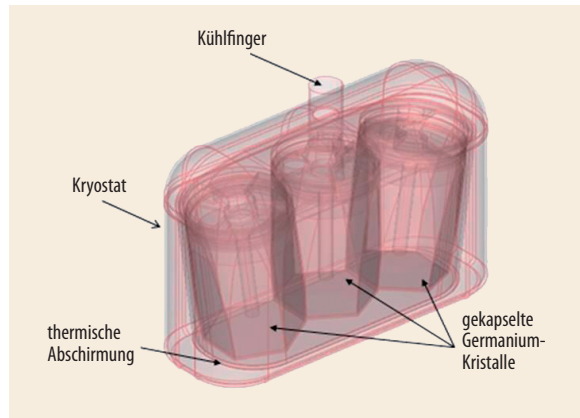


Abb. 1 Die technische Zeichnung eines HyperTriple-Detektors.

Eine vernünftige Alternative könnte die Benutzung des von der Firma ORTEC entwickelten elektromechanischen Kühlers X-Cooler II sein, der ein Kühlaggregat im Tieftemperaturbereich darstellt. Dieser elektromechanische Kühler garantiert die Kühlleistung für einen einzelnen Germanium-Kristall, der sich in einer Aluminium-Kapsel befindet.

Um eine Aussage treffen zu können, ob die Leistung dieses Geräts auch für einen aus drei Kristallen zusammengesetzten Detektor ausreichend ist, wird zuerst das physikalische Problem in ein mathematisches Modell umgesetzt und dann zur Lösung der zugehörigen Erhaltungsdifferentialgleichungen eine relevante, numerische Methode gewählt. Dadurch sind wir in der Lage, die Temperaturverteilung in

dem gesamten Aufbau zu untersuchen und darauf basierend die dazugehörigen Wärmeverluste zu bestimmen (Infokasten).

Dafür hat COMSOL Multiphysics uns den Weg geebnet. Für die Simulationen wurde das Modell der allgemeinen Wärmeleitung im dreidimensionalen Fall verwendet.

Problemstellung

Der zusammengesetzte Germanium-Detektor HyperTriple besteht aus drei gekapselten Germanium-Kristallen, die auf einem sog. Kühlrahmen befestigt sind. Diese befinden sich im Vakuum in einem Kryostat (Abb. 1). Da die Temperatur auf den äußeren Aufbauteilen durch die Raumtemperatur bestimmt wird und innerhalb des Kryostats

WÄRMEÜBERTRAGUNGSMODELL

Die Temperaturverteilung ergibt sich aus der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung:

$$\lambda \Delta T = \rho c (\partial T) / (\partial t),$$

dabei bezeichnet T [K] die Temperatur, λ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] die Wärmeleitfähigkeit, c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] die spezifische Wärmeleitfähigkeit, ρ [kg m^{-3}] die Dichte und t [s] die Zeit.

Beim Kontakt des Kühlfingers mit dem Kühlrahmen ist die Temperatur

mit $T(x,y) = T_{cf}$ vorgegeben. Hier zeigt T_{cf} die Kühlfinger-Temperatur.

An der thermischen Abschirmungsoberfläche wird die Temperatur durch die Wärmestrahlung bestimmt:

$$\lambda (\partial T) / (\partial n) = \epsilon \sigma (T_a^4 - T^4),$$

wobei T_a [K] die Raumtemperatur bezeichnet, ϵ den Emissionsgrad des Mediums, $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante und n den Normalenvektor am Rand.

Dr. Jasmina Kojouharova, Beratungsbüro Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Edith-Stein-Str. 11, 55270 Zornheim; Melanie Wolf, Hochschule Darmstadt, University of Applied Sciences, Haardtring 100, 64295 Darmstadt und Priv.-Doz. Dr. Hans-Jürgen Wollersheim, Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt

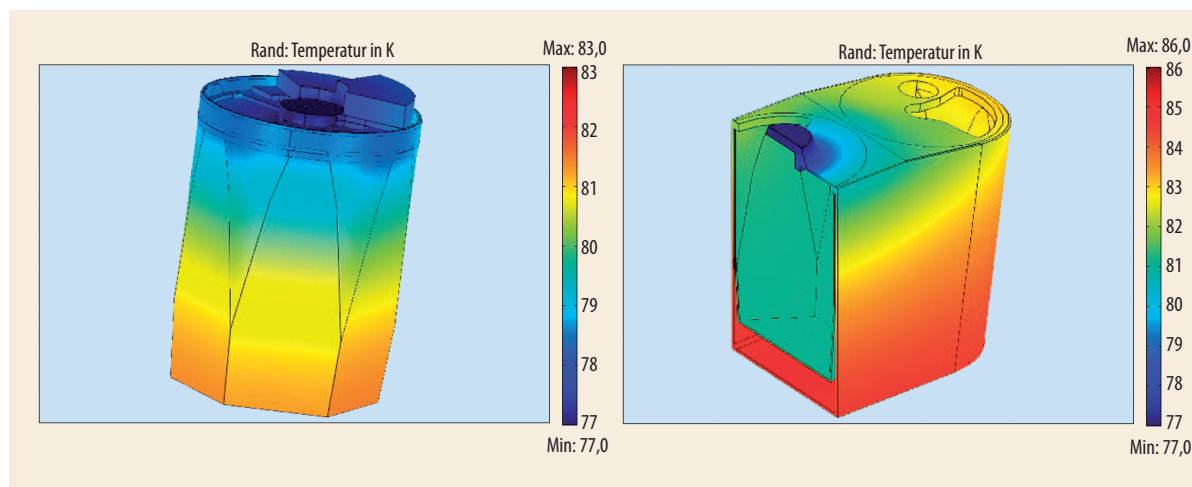


Abb. 2 Temperaturverteilung des einzelnen Germanium-Detektors: Gezeigt ist die Temperaturverteilung, berechnet für den Emissionsgrad von 0,14. Die festgestellte Wärmeleistung beträgt 2,5 W.

Abb. 3 Eine typische Temperaturverteilung des HyperTriple-Detektors beim Aufbau mit thermischer Abschirmung und bei einem Emissionsgrad von 0,14.

die Temperatur von nahezu flüssigem Stickstoff erreicht, sollten Sondermaßnahmen getroffen werden, um Wärmeverluste durch die äußere Oberfläche des Kryostats zu reduzieren. Zielgerichtet kann eine thermische Abschirmung zwischen den gekapselten Kristallen und dem Kryostat eingebaut werden.

Im Detektoraufbau stehen die einzelnen Komponenten in Kontakt zueinander und die Kühlung wird durch Wärmeleitung vom Kühlfinger über den Kühlrahmen auf die Kapseln bzw. die Kristalle übertragen. Die thermische Abschirmung steht in festem Kontakt mit dem Kühlfinger, welcher zur Wärmeübertragung beiträgt.

Der Temperaturunterschied zwischen der Kapsel und den Kristallen ist klein. Demzufolge ist die Wärmestrahlung zwischen den Kristalloberflächen und der inneren Kapseloberfläche sehr gering und kann in der gesamten Wärmebilanz vernachlässigt werden.

An den Außenoberflächen erwärmt die Strahlungsabsorption von der Umgebung die Wände. Die vom Temperaturunterschied zwischen der thermischen Abschirmung und dem Kryostat entstehende Wärmestrahlung bestimmt am stärksten die Wärmeverluste.

COMSOL Multiphysics bietet ein passendes „Surface-To-Surface-Radiation“-Modell. Da die entsprechende Kristall-Geometrie kompliziert ist, wird dafür ein leistungsfähiger PC benötigt. Ein anderer Weg ist, erst den Strahlungsaustausch zwischen dieser Abschirmung und dem Kryostat zu bewerten, sozusagen einen effektiven Emissionsgrad zu bestimmen, welcher annähernd den Betrag der zweiten Wand angibt. Somit wird es möglich, das von COMSOL Multiphysics angebotene „Surface-to-Ambient“-Modell zu benutzen.

higer PC benötigt. Ein anderer Weg ist, erst den Strahlungsaustausch zwischen dieser Abschirmung und dem Kryostat zu bewerten, sozusagen einen effektiven Emissionsgrad zu bestimmen, welcher annähernd den Betrag der zweiten Wand angibt. Somit wird es möglich, das von COMSOL Multiphysics angebotene „Surface-to-Ambient“-Modell zu benutzen.

Simulationsergebnisse

Vier Hauptfaktoren bestimmen die gesamten Wärmeverluste: der Emissionsgrad, die Größe der strahlenden Oberfläche, die Raumtemperatur und die Temperatur des Kühlfingers. Für die Berechnungen sind die letzten zwei Faktoren als Konstanten angenommen, die Raumtemperatur mit 300 K und die Kühlfingertemperatur mit 77 K.

ϵ	\dot{q} in W	T_{\max} in K
0,02	0,82	78,14
0,04	1,64	79,27
0,06	2,45	80,41
0,08	3,27	81,54
0,10	4,09	82,68
0,12	4,91	83,81
0,14	5,72	84,94
0,16	6,74	86,07

Tab. Wärmeverluste \dot{q} und die maximale Temperatur T_{\max} für den zusammengesetzten Germanium-Detektor in Abhängigkeit vom Emissionsgrad ϵ .

Der Emissionsgrad ϵ lässt sich durch die Bearbeitung der Oberfläche stark beeinflussen. Für poliertes Aluminium ist der Emissionsgrad minimal und beträgt typischerweise ca. 0,05. Die Oxidierung der Oberfläche führt zu einem fast dreifachen Anstieg des Emissionsgrades, z. B. hat handelsübliches Aluminium einen Emissionsgrad von 0,14. Da die Kapseloberflächen relativ rau sind, aber nicht weiter bearbeitet werden dürfen, bleibt nur die Möglichkeit, die thermische Abschirmungsoberfläche gut zu polieren, um die Wärmeverluste zu minimieren.

Um die Wärmekapazität des Kühlgeräts bestimmen zu können, wurde erst ein einzelner Germanium-Detektor simuliert (Abb. 2). Die Temperaturverteilung, berechnet für den Emissionsgrad von 0,14, ist dargestellt und die festgestellte Wärmeleistung beträgt 2,5 W. Danach wurden zwei Aufbauten für den HyperTriple-Detektor, einer mit und einer ohne thermische Abschirmung, systematisch studiert (Abb. 3). Die Wärmeverluste bzw. die maximale Temperatur der Kristalle bei verschiedenen Emissionsgraden sind in der Tabelle aufgeführt.

Die durchgeführten Simulationen haben uns gezeigt, dass sich ein HyperTriple-Detektor mit einer eingebauten thermischen Abschirmung ($\epsilon = 0,05$) durch ein Kühlgerät mit einer Leistung von 2,5 W betreiben lässt.